

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL



**Variación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en  
relación con la gradiente altitudinal en las lomas de Atocongo (Lima –  
Perú)**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN ECOLOGÍA  
Y GESTIÓN AMBIENTAL

Autor: Bach. Cuya Matos Oscar Alejandro

Asesora: Dra. HAYDEE MONTOYA

**Lima, Perú**

**2016**

*DEDICATORIA*

*Dedico este trabajo a mi padre, Juvenal Alejandro Cuya Álvarez (1930-2012), quien, además, fue mi primer profesor de botánica, agrotecnia, horticultura y jardinería.*

*Me contaba él, que cuando niño iba a las quebradas Retamal, Picapiedra, Guayabo y Quebrada Verde a ver el ganado de la familia, que pastaba libremente por las lomas. Él recordaba que había pobladores que producían, al pie de las lomas, carbón de los troncos de Huarango.*

*Con mucho orgullo, narraba que siendo niño aprendió todas las labores de agricultor, en la Hacienda Lote B (distrito de Pachacamac – Lima). Su padre, mi abuelo, fue “yanacón” en dicha hacienda.*

# INDICE

AGRADECIMIENTO .....	xxi
RESUMEN.....	22
SUMMARY .....	24
CAPÍTULO I : PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	26
1.1 INTRODUCCIÓN .....	26
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	28
1.3 ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL TEMA.....	31
1.3.1 GRADIENTE ALTITUDINAL Y DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES .....	31
1.3.2 NDVI, ATRIBUTOS DE VEGETACIÓN Y GRADIENTE ALTITUDINAL.....	33
1.3.3 GRADIENTE ALTITUDINAL, FACTORES AMBIENTALES Y BIOMASA .....	37
1.4 PRESENTACIÓN DE OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS .....	38
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	38
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	39
1.5 LIMITACIONES DEL ESTUDIO .....	39
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	40
2.1 BASES TEÓRICAS.....	40
2.1.1 MODELAMIENTO DE ESPECIES EN GRADIENTES AMBIENTALES .....	40
2.1.2 ANÁLISIS DIRECTO DE GRADIENTES AMBIENTALES .....	42
2.1.3 MODELOS ESTADÍSTICOS PARA EL ANÁLISIS DIRECTO DE GRADIENTES.....	44
2.1.4 LOS MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES Y LA DEPENDENCIA ESPACIAL.....	50
2.1.5 LA GRADIENTE ALTITUDINAL.....	51
2.1.6 LA COBERTURA VEGETAL.....	53
2.2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....	57
2.3 HIPÓTESIS.....	60
2.4 VARIABLES .....	60

CAPÍTULO III : METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	61
3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	61
3.1.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN .....	61
3.1.2 TIPOS DE INVESTIGACIÓN .....	62
3.1.3 NIVELES DE INVESTIGACIÓN.....	63
3.1.4 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	64
3.1.5 ACERCA DE LA UNIDAD DE ESTUDIO.....	65
3.1.6 ACERCA DEL ENUNCIADO DEL ESTUDIO .....	66
3.1.7 ACERCA DE LA DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO.....	67
3.1.8 TABLAS DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	68
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	71
3.2.1 POBLACIÓN.....	71
3.2.2 DISEÑO MUESTRAL.....	71
3.2.3 RELACIÓN ENTRE VARIABLES .....	72
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	74
3.3.1 PRUEBAS DE NORMALIDAD DE DATOS .....	74
3.3.2 PRUEBAS DE INDEPENDENCIA DE DATOS .....	75
3.3.3 PRUEBAS DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL.....	75
3.3.4 PRUEBAS DE ANISOTROPÍA DE DATOS .....	75
3.3.5 PRUEBAS DE EXPLORACIÓN DE DATOS Y COMPARACIÓN DE MUESTRAS .....	75
3.3.6 MODELAMIENTO DE DATOS .....	76
3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS .....	76
3.4.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	76
3.4.2 SELECCIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE.....	76
3.4.3 SELECCIÓN DE LOS INVENTARIOS DE VEGETACIÓN.....	77
3.4.4 OBTENCIÓN DE LOS NDVI.....	77
3.4.5 OBTENCIÓN DE LAS SERIES ESPACIALES E ISOLÍNEAS .....	78
CAPÍTULO IV : RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	79
4.1 RESULTADOS.....	79
4.1.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS .....	79
4.1.2 MODELAMIENTO DE DATOS .....	145
4.1.3 ANÁLISIS DE SERIES DE GRADIENTES ALTITUDINALES DE NDVI.....	179

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	204
4.2.1 ESTRUCTURA ESPACIAL DE LOS DATOS .....	204
4.2.2 LA COBERTURA VEGETAL EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD.....	208
4.2.3 EL NDVI CON RESPECTO A LA COBERTURA VEGETAL.....	218
4.2.4 EL NDVI EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD.....	224
4.2.5 SERIES ESPACIALES DE NDVI CON RELACIÓN A LA ALTITUD .....	230
CAPÍTULO V : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	255
5.1 CONCLUSIONES .....	255
5.1.1 CON RELACIÓN A LA EXPLORACIÓN DE DATOS .....	255
5.1.2 RESPUESTA DE LA COBERTURA VEGETAL A LA ALTITUD ....	256
5.1.3 RESPUESTA DEL NDVI A LA COBERTURA VEGETAL.....	258
5.1.4 RESPUESTA DEL NDVI A LA ALTITUD .....	260
5.1.5 LA SERIE DE NDVI CON RELACIÓN A LA GRADIENTE ALTITUDINAL.....	262
5.2 RECOMENDACIONES .....	264
5.2.1 CON RELACIÓN A NUEVOS TEMAS DE INVESTIGACIÓN.....	264
5.2.2 CON RELACIÓN A LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....	264
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	266

## INDICE DE TABLAS

Correspondencia de escalas subjetivas de cobertura vegetal .....	55
Transformación ordinal de la escala de cobertura-abundancia .....	57
Definición de variables .....	68
Dimensiones y atributos de las variables .....	68
Consistencia entre la pregunta general de investigación, objetivos, hipótesis, variables e indicadores .....	69
Consistencia entre las hipótesis y los instrumentos de colecta de datos .....	70
Transectos del sector Atocongo, setiembre 2000.....	82
Gradiente en Quebrada Lúcumo, setiembre de 2000 .....	82
Gradiente en Quebrada Guayabo, setiembre de 2000 .....	82
Transectos del sector Atocongo (zona 1), abril de 2001 .....	85
Gradiente en Quebrada Lúcumo, abril 2001 .....	85
Gradiente en Quebrada Verde, abril 2001.....	85
Transectos del sector Atocongo, setiembre de 2001 .....	88
Gradiente en Quebrada El Lúcumo, setiembre del 2001 .....	88
Gradiente en Quebrada Verde, setiembre del 2001 .....	88
Transectos en Quebrada Lúcumo, octubre del 2002.....	90
Transectos del sector Atocongo, setiembre del 2007.....	91
Transectos del sector Atocongo, diciembre del 2007 .....	92
Transectos del sector Atocongo, enero del 2011 .....	92
Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk .....	99
Prueba de Shapiro-Wilk para datos transformados.....	100
Prueba de rachas para una muestra .....	102
Índices de Moran y Coeficiente de Geary .....	104
Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Lúcumo .....	119
Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Puquio .....	119
Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Guayabo .....	119
Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Verde BG .....	119
Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Verde BN .....	120

Prueba de correlación angular para verificar anisotropía.....	126
Correlación angular para Q. Lúcumo.....	141
Correlación angular para Q. Puquio.....	141
Correlación angular para Q. Guayabo.....	141
Correlación angular para Q. Verde BG.....	142
Correlación angular para Q. Verde BN.....	142
Regresión lineal para la cobertura, altitud y NDVI Ikonos de época seca en lomas de Atocongo, 2001 a 2002 .....	147
Regresión lineal para cobertura, altitud y NDVI en época húmeda.....	148
Regresión lineal para la cobertura, altitud y NDVI Spot de época húmeda en lomas de Atocongo, año 2007 .....	149
Prueba de correlación entre matrices o test de Mantel.....	151
Regresión cuadrática para la cobertura, altitud y NDVI Ikonos de época seca en lomas de Atocongo, años 2001 y 2002 .....	153
Regresión cuadrática para la cobertura, altitud y NDVI Spot de época húmeda en lomas de Atocongo, años 2000, 2001 y 2002 .....	154
Regresión cuadrática para la cobertura, altitud y NDVI Spot de época húmeda en lomas de Atocongo, años 2002 y 2007 .....	155
Modelo lineal generalizado para el NDVI y la cobertura vegetal (%) de lomas de Atocongo.....	156
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) y la altitud en las lomas de Atocongo.....	156
Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en las lomas de Atocongo...	156
Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la cobertura vegetal (%) en lomas de Atocongo.....	157
Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) y la altitud en lomas de Atocongo.....	157
Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en las lomas de Atocongo.	157
Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Lúcumo .....	180
Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Puquio .....	181
Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Guayabo .....	181
Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Verde BN ...	181
Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Verde BG ...	182
Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Lúcumo ....	182

Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Puquio .....	182
Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Guayabo ...	183
Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Verde BN .	183
Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Verde BG .	183
Episodios El Niño y La Niña para los datos de monitoreo de lomas de Atocongo .	209
Comparaciones por pares (Conover-Iman) de los juegos de datos de cobertura vegetal para episodios El Niño y La Niña.....	211
Episodios El Niño y La Niña para las imágenes de satélite.....	225
Modelo lineal generalizado por quebradas para el NDVI SPOT.....	243
Modelo lineal generalizado por quebradas para el NDVI ASTER.....	243
Modelo lineal generalizado por quebradas para el NDVI IKONOS.....	243
Modelo lineal generalizado para el NDVI WORLD VIEW .....	244
Modelo aditivo generalizado por quebradas para el NDVI SPOT.....	246
Modelo aditivo generalizado por quebradas para el NDVI ASTER.....	246
Modelo aditivo generalizado por quebrada para el NDVI IKONOS.....	246
Modelo aditivo generalizado por quebradas para el NDVI WORLD VIEW .....	247

## INDICE DE FIGURAS

Localización de los puntos de muestreo setiembre del 2000 .....	83
Localización de los puntos de muestreo abril 2001 .....	86
Localización de los puntos de setiembre del 2001 .....	89
Localización de los puntos de muestreo setiembre del 2000 y puntos adicionales para generar la malla de datos geoestadísticos.....	94
Vista de la localización de los puntos de la malla sobrepuesta sobre la imagen NDVI de Spot, curvas a nivel y divisoria de aguas.....	94
Imagen de cobertura vegetal obtenida mediante interpolación geoestadística a partir de los puntos de muestreo setiembre del 2000 y puntos adicionales sin vegetación .	95
Ventana del programa informático en el que se muestra el modelo (esférico) y el tamaño del Lag o alcance (200 m) empleados para obtener el semivariograma teórico .....	95
Correlogramas de Moran y Geary correspondiente para la altitud en datos de abril del 2001.....	105
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Ikonos en datos de abril del 2001	106
Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de abril del 2001 .....	106
Correlogramas de Moran y Geary para la altitud en datos de junio del 2002.....	107
Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de junio del 2002.....	108
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Ikonos en datos de junio del 2002 .....	108
Correlogramas de Moran y Geary para la altitud en datos de setiembre del 2000 ..	109
Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de setiembre del 2000.....	109
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Spot en datos de setiembre del 2000 .....	110
Correlogramas de Moran y Geary para la altitud en datos de setiembre del 2001 ..	111

Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de setiembre del 2001.....	111
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Spot 1998 en datos de setiembre del 2001.....	112
Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de octubre del 2002.....	113
Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de octubre del 2002.....	113
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Spot 1998 en datos de octubre del 2002.....	114
Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la altitud en datos de setiembre del 2007.....	114
Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la cobertura vegetal en datos de diciembre del 2007.....	115
Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la altitud en datos de diciembre del 2007.....	116
Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la cobertura vegetal en datos de diciembre del 2007.....	116
Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la altitud en datos de enero del 2011.....	117
Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la cobertura vegetal en datos de enero del 2011.....	118
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI World View 2011 en datos de enero del 2011.....	118
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Lúcumo.....	120
Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Lúcumo.....	121
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Puquio.....	121
Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Puquio.....	122
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Guayabo.....	122

Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Guayabo .....	123
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Verde BG .....	123
Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Verde BG .....	124
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Verde BN .....	124
Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Verde BN .....	125
Correlación angular de los valores de altitud (msnm) para setiembre del 2000 .....	128
Correlación angular de los valores de NDVI para setiembre del 2000.....	128
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal (%) para setiembre del 2000 .....	129
Correlación angular de los valores de altitud para setiembre del 2000 (generados)	129
Correlación angular de los valores de NDVI para setiembre del 2000 (generados)	130
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para setiembre del 2000 (generados).....	130
Correlación angular de los valores de altitud (msnm) para abril 2001 .....	131
Correlación angular de los valores de NDVI para abril 2001 .....	131
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para abril 2001 .....	132
Correlación angular de los valores de altitud para setiembre del 2001.....	132
Correlación angular de los valores de NDVI para setiembre del 2001 .....	133
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para setiembre del 2001 ..	133
Correlación angular de los valores de altitud (msnm) para junio 2002 .....	134
Correlación angular de los valores de NDVI para junio del 2002 .....	134
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para junio del 2002 .....	135
Correlación angular de los valores de altitud para octubre del 2002 .....	135
Correlación angular de los valores de NDVI para octubre del 2002 .....	136
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para octubre del 2002.....	136
Correlación angular de los valores de altitud para diciembre del 2002 .....	137
Correlación angular de los valores de NDVI para diciembre del 2002 .....	137
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para diciembre del 2002..	138
Correlación angular de los valores de altitud para setiembre del 2007.....	138

Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para setiembre del 2007 ..	139
Correlación angular de los valores de altitud para diciembre del 2007 .....	139
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para diciembre del 2007..	140
Correlación angular de los valores de altitud (rojo) y cobertura vegetal (azul) para enero del 2011 .....	140
Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Landsat, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Lúcumo.....	142
Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Puquio.....	143
Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Landsat, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Guayabo.....	143
Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Verde BG.....	144
Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Landsat, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Verde BN.....	144
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 54.20$ , p-valor = 0.03, AIC = 0.25 y $r^2$ loess residuales = 0.21.....	161
Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 54.20$ , p-valor = 0.04, AIC = 0.26 y $r^2$ loess residuales = 0.21.....	162
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 56.96$ , p-valor = 0.08, AIC = 1.59 y $r^2$ loess residuales = 0.53 .....	162
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 56.64$ , p-valor = 0.14, AIC = 1.97 y $r^2$ loess residuales = 0.40.....	163
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000, generados, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 41.28$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 18.65 y $r^2$ loess residuales = 0.08 .....	163
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000, generados, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 44.63$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 2.43 y $r^2$ loess residuales = 0.02 .....	164

Modelo lineal generalizado para datos generados de cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 12.56$ , p-valor = 0.000002, AIC = 49.08y $r^2$ loess residuales = 0.04 .....	164
Modelo aditivo generalizado para datos generados de cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000 en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 14.03$ , p-valor = 0.000004, AIC = 48.84y $r^2$ loess residuales = 0.01 .....	165
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir la altitud (msnm), cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 55.12$ , p-valor = < 1.0e-6, AIC = 1.96 y $r^2$ loess residuales = 0.003 .....	165
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot a partir la altitud (msnm), cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 55.37$ , p-valor = < 1.0e-6, AIC = 1.96 y $r^2$ loess residuales = 0.001 .....	166
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de abril del 2001 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 22.84$ , p-valor = 0.07, AIC = 5.456 y $r^2$ loess residuales = 0.008.....	166
Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de abril del 2001 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 22.84$ , p-valor = 0.08, AIC = 5.55 y $r^2$ loess residuales = 0.008.....	167
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos a partir la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 50.49$ , p-valor = 0.003, AIC = 1.345 y $r^2$ loess residuales = 0.05 .....	167
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos a partir la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 50.49$ , p-valor = 0.004, AIC = 1.37 y $r^2$ loess residuales = 0.05 .....	168
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot regresionado por la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2001, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 57.26$ , p-valor = 0.0008, AIC = 1.34 y $r^2$ loess residuales = 0.53 .....	168
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot regresionado por la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2001, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 57.26$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.36 y $r^2$ loess residuales = 0.53	169

Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2001 en función de la altitud (msnm), con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 23.46$ , p-valor = 0.07, AIC = 1.63 y $r^2$ loess residuales = 0.07 .....	169
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2001 en función de la altitud (msnm), con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 23.46$ , p-valor = 0.09, AIC = 1.66 y $r^2$ loess residuales = 0.07 .....	170
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de junio del 2002 en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 37.52$ , p-valor = 0.07, AIC = 6.63 y $r^2$ loess residuales = 0.40 ..	170
Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de junio del 2002 en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 34.31$ , p-valor = 0.13, AIC = 7.60 y $r^2$ loess residuales = 0.41 ..	171
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 93.50$ , p-valor = 0.03, AIC = 0.27 y $r^2$ loess residuales = 1 .....	171
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 89.47$ , p-valor = 0.02, AIC = 0.08 y $r^2$ loess residuales = 1 .....	172
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002 en función de la altitud, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 93.13$ , p-valor = 0.005, AIC = 0.20 y $r^2$ loess residuales = 1 .....	172
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002 en función de la altitud, lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 95.33$ , p-valor = 0.004, AIC = 5.45 y $r^2$ loess residuales = 1 .....	173
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 99.55$ , p-valor = 0.002, AIC = 0.02 y $r^2$ loess residuales = 0.50 .....	173
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 99.35$ , p-valor = 0.006, AIC = 0.04 y $r^2$ loess residuales = 0.75 .....	174
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de diciembre del 2002, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 60.14$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.26 y $r^2$ loess residuales = 0.22 .....	174

Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de diciembre del 2002, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 60.14$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.28 y $r^2$ loess residuales = 0.22.....	175
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2007 en función de la altitud, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 19.88$ , p-valor = 0.12, AIC = 0.36 y $r^2$ loess residuales = 0.28 .....	176
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View a partir de la cobertura vegetal (%) de enero del 2011, lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 20.46$ , p-valor = 0.13, AIC = 0.77 y $r^2$ loess residuales = 0.24.....	176
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View a partir de la cobertura vegetal (%) de enero del 2011, lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 20.44$ , p-valor = 0.12, AIC = 0.75 y $r^2$ loess residuales = 0.24.....	177
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de enero del 2011 en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 22.17$ , p-valor = 0.13, AIC = 12.39 y $r^2$ loess residuales = 0.03.....	177
Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de enero del 2011 en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 45.31$ , p-valor = 0.05, AIC = 47.69 y $r^2$ loess residuales = 0.30.....	178
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 75.66$ , p-valor = 0.0004, AIC = 1.07 y $r^2$ loess residuales = 0.001 .....	178
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 74.24$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.23 y $r^2$ loess residuales = 0.002.....	179
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 96.83$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.50 y $r^2$ loess residuales = 0.39, lomas de Lúcumo .....	184
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 89.68$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 1.62 y $r^2$ loess residuales = 0.84, lomas de Lúcumo .....	184
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 79.91$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.21 y $r^2$ loess residuales = 0.18, lomas de Lúcumo .....	185

Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 79.78$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.21 y $r^2$ loess residuales = 0.17, lomas de Lúcumo .....	185
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 46.37$ , p-valor = 0.00004, AIC = 0.96 y $r^2$ loess residuales = 0.29, lomas de Lúcumo .....	186
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 51.19$ , p-valor = 0.00001, AIC = 0.88 y $r^2$ loess residuales = 0.27, lomas de Lúcumo .....	186
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 86.37$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 1.37 y $r^2$ loess residuales = 0.26, lomas de Lúcumo .....	187
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 85.23$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.33 y $r^2$ loess residuales = 0.44, lomas de Lúcumo .....	187
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 94.71$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.86 y $r^2$ loess residuales = 0.76, lomas de Puquio .....	188
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 84.86$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 2.38 y $r^2$ loess residuales = 0.57, lomas de Puquio .....	188
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 68.96$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.14 y $r^2$ loess residuales = 0.10, lomas de Puquio .....	189
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 70.42$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.13 y $r^2$ loess residuales = 0.06, lomas de Puquio .....	189
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 18.73$ , p-valor = 0.03, AIC = 2.87 y $r^2$ loess residuales = 0.40, lomas de Puquio .....	190
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 31.44$ , p-valor = 0.003, AIC = 2.45 y $r^2$ loess residuales = 0.32, lomas de Puquio .....	190

Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 70.57$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.22 y $r^2$ loess residuales = 0.39, lomas de Puquio .....	191
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 66.50$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.25 y $r^2$ loess residuales = 0.48, lomas de Puquio .....	191
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 89.17$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.09 y $r^2$ loess residuales = 0.17, lomas de Guayabo .....	192
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 89.23$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.09 y $r^2$ loess residuales = 0.26, lomas de Guayabo .....	192
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 87.23$ , p-valor = 0.000004, AIC = 2.58 y $r^2$ loess residuales = 0.49, lomas de Guayabo .....	193
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 71.97$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.22 y $r^2$ loess residuales = 0.25, lomas de Guayabo .....	193
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 76.50$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.55 y $r^2$ loess residuales = 0.09, lomas de Guayabo .....	194
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 74.47$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.60 y $r^2$ loess residuales = 0.12, lomas de Guayabo .....	194
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico, $D^2 = 83.80$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 1.24 y $r^2$ loess residuales = 0.09, lomas de Guayabo .....	195
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 84.49$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.23 y $r^2$ loess residuales = 0.09, lomas de Guayabo .....	195
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 85.24$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.037 y $r^2$ loess residuales = 0.009, lomas de Quebrada Verde Transecto BN .....	196

Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 84.14$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.041 y $r^2$ loess residuales = 0.067, lomas de Quebrada Verde Transecto BN .....	196
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 36.98$ , p-valor = 0.0002, AIC = 0.075 y $r^2$ loess residuales = 0.022, lomas de Quebrada Verde Transecto BN .....	197
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 33.86$ , p-valor = 0.0006, AIC = 0.079 y $r^2$ loess residuales = 0.059, lomas de Quebrada Verde Transecto BN .....	197
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 21.07$ , p-valor = 0.005, AIC = 0.491 y $r^2$ loess residuales = 0.008, lomas de Quebrada Verde Transecto BN .....	198
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 19.56$ , p-valor = 0.009, AIC = 0.502 y $r^2$ loess residuales = 0.032, lomas de Quebrada Verde Transecto BN .....	198
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 42.71$ , p-valor = 0.00005, AIC = 0.279 y $r^2$ loess residuales = 0.115, lomas de Quebrada Verde Transecto BN .....	199
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 45.58$ , p-valor = 0.00003, AIC = 0.266 y $r^2$ loess residuales = 0.15, lomas de Quebrada Verde Transecto BN .....	199
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 92.34$ , p-valor = $< 1.0e-6$ AIC = 0.239 y $r^2$ loess residuales = 0.227, lomas de Quebrada Verde Transecto BG .....	200
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 91.18$ , p-valor = $< 1.0e-6$ AIC = 0.277 y $r^2$ loess residuales = 0.413, lomas de Quebrada Verde Transecto BG .....	200
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 81.10$ , p-valor = $< 1.0e-6$ AIC = 0.039 y $r^2$ loess residuales = 0.002, lomas de Quebrada Verde Transecto BG .....	201

Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 73.62$ , p-valor = $< 1.0e-6$ , AIC = 0.86 y $r^2$ loess residuales = 0.12, lomas de Quebrada Verde Transecto BG .....	201
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 45.30$ , p-valor = 0.000096, AIC = 0.806 y $r^2$ loess residuales = 0.043, lomas de Quebrada Verde Transecto BG.....	202
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 44.91$ , p-valor = 0.000135, AIC = 0.816 y $r^2$ loess residuales = 0.097, lomas de Quebrada Verde Transecto BG .....	202
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico, $D^2 = 80.73$ , p-valor = $< 1.0e-6$ = 0.806 y $r^2$ loess residuales = 0.014, lomas de Quebrada Verde Transecto BG .....	203
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso, $D^2 = 79.77$ , p-valor = $< 1.0e-6$ = 0.956 y $r^2$ loess residuales = 0.115, lomas de Quebrada Verde Transecto BG.....	203
Escalamiento multidimensional de los datos de cobertura vegetal sobre la base de sus coberturas mínimas, medias y máximas, SOI y NOI (a = La Niña, o = El Niño, x = neutro) .....	211
Serie de tiempo (2005-2011) de cobertura vegetal promedio para las lomas de Atocongo, Fuente (Cuya, 2016).....	212
Escalamiento multidimensional de los modelos GLM de cobertura vegetal en función de la altitud, sobre la base de su devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo....	214
Escalamiento multidimensional de los modelos GAM de cobertura vegetal e función de la altitud sobre la base de la devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo.....	217
Escalamiento multidimensional de los modelos GLM de NDVI con relación a la cobertura vegetal sobre la base de las características de devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo de modelo.....	222
Escalamiento multidimensional de los modelos GAM de NDVI con relación a la cobertura vegetal sobre la base de las características de devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo de modelo.....	224

Escalamiento multidimensional de los modelos GLM de NDVI con relación a la altitud sobre la base de las características de devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo de modelo .....	229
Escalamiento multidimensional de los modelos GAM de NDVI con relación a la altitud sobre la base de las características de devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo de modelo .....	230
MDS de NDVI vs altitud para los modelos GLM y diferentes imágenes.....	233
MDS de NDVI vs altitud para los modelos GAM y diferentes imágenes .....	234
Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Lúcumo .....	236
Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Puquio .....	236
Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Guayabo .....	237
Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Verde BN .....	237
Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Verde BG .....	238
Quebradas del área de estudio y ubicación de los transectos de NDVI.....	240
ACP de NDVI vs altitud para quebradas y por imagen .....	242
MDS de NDVI vs altitud para los modelos GLM y diferentes quebradas .....	244
MDS de NDVI vs altitud para los modelos GAM y diferentes quebradas .....	245
NDVI vs altitud para diferentes quebradas a partir de SPOT, 30-11-1998 .....	249
NDVI vs altitud para diferentes quebradas a partir de ASTER 03-03-2001.....	250
NDVI vs altitud para diferentes quebradas a partir de IKONOS, 10-03-2002 .....	250
NDVI vs altitud para las quebradas a partir de WORLD VIEW, 10-03-2011 .....	250
Variación estacional de la gradiente altitudinal de NDVI en lomas .....	252
Isolíneas (en color marrón) de NDVI Ikonos 10-03-2002 para Q. Lúcumo sobre curvas de nivel (en verde) y divisorias (en azul).....	253
Isolíneas (en color marrón) de NDVI Spot 30-11-1998 para Q. Lúcumo sobre curvas de nivel (en verde) y divisorias (en azul).....	254

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo se desarrolló en paralelo con mi aprendizaje en ecología, imágenes de satélite, impactos ambientales y epistemología; y en ese camino, muchos amigos, profesores, alumnos me brindaron su apoyo en todo momento por lo cual les expreso un profundo agradecimiento.

También es oportunidad para expresar mi agradecimiento a los profesores y amigos Letty Salinas, César Arana (UNMSM) y Edgar Sánchez (UNALM), ecólogos y expertos en ecosistemas de lomas, quienes influyeron decisivamente en este trabajo.

Asimismo, siempre que visité las lomas de Lúcumo, recibí el aprecio y consideración de la señora María Guillén, los señores Jacinto Mendoza y Patricio Guillén y los demás integrantes de la Asociación Circuito Eco turístico Lomas de Lúcumo (ACELL). A todos ellos mi reconocimiento y distintivo agradecimiento.

Un reconocimiento a UNACEM S.A., empresa que me proporcionó los datos de vegetación, sin más interés que el que sea usado para producir conocimiento aplicado a la conservación del ecosistema de lomas de Lúcumo.

Un agradecimiento y reconocimiento especial a mi hermano José Luis Cuya Matos, quien en múltiples ocasiones me acompañó a la zona de estudio, y participó activamente en la toma de muestras y procesamiento de la información, así como, compartió la emoción del estudio de lomas.

Un agradecimiento especial también a mis compañeros de estudio y profesores de la maestría en ecología y gestión ambiental de la Universidad Ricardo Palma; en particular, a la Dra. Haydee Montoya, quien me brindó el apoyo necesario en este trabajo.

Un agradecimiento particular para Avelina Juana Huamantínco Nuñez, mi esposa, y para Alessandra Eliana Cuya Huamantínco, mi hija, quienes pacientes y comprensivas me permitieron dedicar muchísimas horas de familia a esta Tesis.

## RESUMEN

Los oasis de neblinas, localmente denominados lomas, son parches ecológicos que se distribuyen entre los 6° a 30° de Latitud Sur, en la costa desértica de Perú y Chile, y constituyen ecosistemas frágiles. El área de estudio se localizó entre los distritos de Villa María del Triunfo y Pachacamac (Lima – Perú), en el sector de Atocongo, entre las coordenadas UTM 293372 y 294615 Easting; 8650536 y 8649292 Northing, que incluyen las lomas de Puquio, Lúcumo, Quebrada Verde y Guayabo.

Se realizó un análisis directo de gradientes, siguiendo la aproximación original de Robert Whittaker. La investigación fue retrospectiva. Se empleó inventarios de vegetación del 2000, 2001, 2002, 2007 y 2011 e imágenes SPOT, de 20 m de resolución espacial, del 30 de noviembre de 1998; IKONOS, del 10 de marzo del 2002, de 1 m de resolución espacial; ASTER, del 03 de marzo del 2001, de 15 m de resolución; WORLD VIEW, del 10 de marzo del año 2011, de 0.5 m de resolución espacial. En el análisis exploratorio se comprobó que los datos no eran normales, presentaban anisotropía y en algunos casos autocorrelación espacial. Se optó por aplicar los modelos lineales generalizados y modelos aditivos generalizados para el análisis directo de gradientes.

El estudio comprobó la existencia de una relación positiva lineal entre la cobertura vegetal como variable explicativa versus el NDVI (normalized difference vegetation index) como variable dependiente. Así también, comprobó la existencia de relaciones lineales y unimodales entre la altitud como variable explicativa versus la cobertura vegetal como variable dependiente; y entre la altitud como variable explicativa versus el NDVI como variable dependiente. Los valores de devianza, AIC (criterio de información de Akaike) y el p-valor fueron muy variables. No todos los análisis estuvieron cercanos al ideal. Para el caso de la influencia de la altitud se esperaba una alta devianza, p-valor menor que 0.05, un AIC bajo, ser cuadrático, con distribución gamma, función de enlace logarítmica y forma unimodal.

La estacionalidad climática y la orientación de cada quebrada hacia los vientos explican en gran parte la variabilidad de los modelos obtenidos. Las isóneas de NDVI mostraron núcleos de valores más elevados, sobre el cual concéntricamente se

van organizando las isolíneas. Siempre que el set de muestras intercepte un núcleo de valores altos se tendrá un comportamiento unimodal, caso contrario el comportamiento tenderá a ser lineal.

Palabras claves: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), ecosistema de lomas, gradiente altitudinal, lomas de Atocongo

## SUMMARY

The fog oases, locally called hills, are ecological patches that are distributed between 6 ° to 30 ° South Latitude, on the desert coast of Peru and Chile, and constitute fragile ecosystems. The area of study was located between the districts of Villa María del Triunfo and Pachacamac (Lima - Peru), in the sector of Atocongo, between the coordinates UTM 293372 and 294615 Easting; 8650536 and 8649292 Northing, which include the hills of Puquio, Lúcumo, Quebrada Verde and Guayabo.

A direct analysis of gradients was made, following the original approach of Robert Whittaker. The research was retrospective. Vegetation inventories were used of 2000, 2001, 2002, 2007 and 2011 and SPOT images of 20 m of spatial resolution of 30 November 1998 were used; IKONOS, dated 10 March 2002, of 1 m of spatial resolution; ASTER, dated 03 March 2001, of 15 m resolution; WORLD VIEW, dated March 10, 2011, with a 0.5 m spatial resolution. In the exploratory analysis it was verified that the data were not normal, they presented anisotropy and in some cases spatial autocorrelation. We chose to apply generalized linear models and generalized additive models for the direct analysis of gradients.

The study verified the existence of a positive linear relationship between vegetation cover as an explanatory variable versus normalized difference vegetation index (NDVI) as a dependent variable. It also verified the existence of linear and unimodal relationships between altitude as an explanatory variable versus vegetation cover as a dependent variable; and between the altitude as an explanatory variable versus the NDVI as a dependent variable. The values of deviance, AIC (Akaike's information criterion) and p-value were highly variable. Not all analyzes were close to the ideal. For the case of the influence of altitude, a high deviation was expected, p-value less than 0.05, low AIC, quadratic, with gamma distribution, logarithmic link function and unimodal form.

The seasonality of the climate and the orientation of each basin to the winds largely explain the variability of the models obtained. The NDVI isolines showed nuclei of higher values, on which the isolines are concentrically organized. Whenever the set

of samples intercepts a core of high values will have a unimodal behavior, otherwise the behavior will tend to be linear.

Key words: normalized difference vegetation index (NDVI), fog oases ecosystem, altitudinal gradient, hills of Atocongo

# CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

## 1.1 Introducción

El desierto de la costa peruana es una región árida, con un promedio anual de 5 mm de lluvia. A pesar de estas condiciones, dentro de su paisaje destacan muchas laderas de colinas en las cuales se desarrolla una vegetación herbácea y arbustiva, a veces arbórea, dependiente de la neblina costera, que conforma las comunidades biológicas conocidas como lomas. Numerosos estudiosos ha abordado el ecosistema de lomas destacándose los trabajos de Raimondi (1874), Weberbauer (1945), Ferreyra (1953), Ferreyra (1983) y Dillon, Nakazawa, Leiva, Haas y Dillon (2003).

Oka y Ogawa (1984) realizaron un trabajo sobre la distribución de la vegetación de lomas en relación con el medio climático a lo largo de la costa del Pacífico peruano, en el cual explicaron las variaciones estacionales. También se cuenta con el estudio de Cereceda, Schemenauer y Suit (1993) denominado “Producción de agua de nieblas costeras en Perú”, quienes evalúan la captación de agua de llovizna y neblina en el cerro Orara (Santa Rosa límite con Ventanilla, Callao); también, para el mismo lugar se cuenta con el estudio intitulado “Condiciones meteorológicas en un punto de captura de nieblas en Perú” desarrollado por Schemenauer y Cereceda (1993).

Con el nombre de lomas de Atocongo es más conocido todo el sector de lomas que cubren los cerros Atocongo y Lúcumo, al cual se ha denominado complejo de lomas de Atocongo en este estudio. En dicho complejo hay sectores bien conservados como son las lomas de Puquio, Lúcumo, Quebrada Verde y Guayabo, entre los límites de los distritos de Pachacamac y Villa María del Triunfo. Dicho sectores fueron objeto de estudio en la presente tesis.

Se puede afirmar que la importancia actual del complejo de lomas de Atocongo, además, de su valor como reserva de germoplasma, pasturas, endemismos y diversidad, es su potencial de ofrecer recreación natural. La recreación natural pasiva como aislamiento, contemplación, fotografía de paisajes, observación de restos

arqueológicos, conformaciones geológicas, vegetación y fauna, y también la recreación activa como la caminata, presentan posibilidades económicas para su uso ecoturístico. Un ejemplo de lo señalado es el Circuito Ecoturístico de las Lomas del Lúcumo, en el Centro Poblado Rural (CPR) Quebrada Verde del Distrito de Pachacamac. Dicho circuito forma parte de la Red de Turismo Rural del Valle del río Lurín y permite la conservación de las lomas mencionadas, así como el aprovechamiento de sus recursos ecoturísticos. Los ingresos económicos generados se revierten directamente al CPR Quebrada Verde.

La superficie del complejo de lomas de Atocongo ha disminuido considerablemente en las últimas décadas, principalmente, por la ocupación de tierras para asentamientos humanos, actividad industrial y explotación de canteras. En general, la vegetación de lomas de los cerros que bordean la ciudad de Lima viene siendo degradada por la ocupación urbana (invasión de tierras para asentamientos humanos informales), el sobrepastoreo por ganado caprino y la actividad industrial y minera.

Los problemas mencionados tienen su origen en una falta de compromiso ambiental en la planificación del crecimiento urbano de la ciudad de Lima, todo ello incrementado por el marcado nivel de pobreza de la población que se asienta en sus cerros. El crecimiento no planificado de la ciudad de Lima y la ocupación de sus áreas periféricas por las migraciones poblacionales ha ido eliminando grandes áreas de lomas. Estos problemas, finalmente, podrían llegar a eliminar totalmente la cobertura de lomas, con la consiguiente pérdida de especies de importancia económica y ecológica, y el propio ecosistema de lomas.

Existen propuestas orientadas a la solución tanto en el plano de la gestión ambiental como en el plano de la ciencia y tecnología. En el plano de la gestión ambiental se requerirá herramientas legislativas y la planificación territorial del uso y conservación de las lomas con la participación de los propios pobladores; así como, la modificación de las prácticas sociales negativas que afectan las lomas.

Las lomas, cada día, tienen más dificultades en regenerarse y no hay grupos sociales actuales que manejen sistemas productivos en lomas. Actualmente no existen dispositivos fuertes que protejan legalmente las lomas. Solo las Lomas de Lachay tienen un estado de protección mayor por su condición de Reserva Nacional. Para el

complejo de lomas de Atocongo aplica la Ordenanza N° 310 de la Municipalidad de Lima Metropolitana, de fecha 12-03-2001 que regula el ordenamiento territorial y la gestión ambiental de la cuenca baja del río Lurín, considerando la conservación de lomas.

Las lomas de Lúcumo ha sido reconocida como ecosistema frágil, mediante R.M. N°0274-2013-MINAGRI, del 01/08/2013, para proteger su diversidad biológica, paisajes y servicios ecosistémicos como provisión de recursos genéticos, formación de suelos, recreación y ecoturismo, estéticos, provisión de alimentos y educacional.

En el plano de la ciencia y tecnología, se requiere generar conocimientos para la restauración y manejo de las lomas, sobre sus especies, factores del hábitat como la influencia de la altitud, sucesión vegetal, fenología de las especies, técnicas de propagación de plantas, silvicultura y técnicas para reintroducir especies de fauna nativa (venados, vizcachas, roedores, etc.), entre otros temas.

En todo este contexto se circunscribió la presente Tesis que se orientó al conocimiento ecológico de las lomas de Atocongo, específicamente a la influencia de la altitud sobre la cobertura vegetal, como base para su restauración.

## **1.2 Formulación del problema y justificación del estudio**

La composición, fisonomía y distribución de la vegetación depende de factores climáticos y edáficos, principalmente; los cuales son influenciados en el nivel local por la altitud, la pendiente y la exposición de las laderas. Entre ellos, la altitud establece gradientes bien marcados que determinan una estratificación vertical de la cobertura vegetal y que es importante reconocer tanto para el conocimiento propio del ecosistema como para su manejo.

Por otro lado, el tratamiento digital de las imágenes de satélite ha permitido crear índices de vegetación basados en las reflectancias de la vegetación, en las longitudes de onda del rojo e infrarrojo del espectro electromagnético. Uno de tales índices es el índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI por sus siglas en inglés (normalized difference vegetation index). Este índice es un indicador de la biomasa, vigorosidad y densidad de la cobertura vegetal. Numerosos estudios han

corroborado la elevada correlación que existe entre el NDVI y las mencionadas características e incluso, con la riqueza de especies (Levin, Shmida, Levanoni, Tamari y Kark, 2007). Sin embargo, estudios de esta naturaleza no se han realizado para el ecosistema de lomas de Atocongo.

El mencionado NDVI es el cociente de la diferencia de las bandas infrarroja y roja dividida entre la sumatoria de las mismas bandas. Su escala de valores va de 0 a 1. Los valores más elevados indican una mayor presencia de cobertura vegetal. En la sección del marco teórico se añaden mayores detalles sobre el NDVI.

En otra línea de comentarios, es importante señalar que las imágenes de satélite permiten una visión integrada del área de estudio y ofrecen oportunidades para la optimización de recursos económicos en la evaluación espacial y temporal de los componentes fenosistémicos del ecosistema. También, han probado su utilidad para estudiar la vegetación, su distribución, fisonomía, fragmentación y variaciones temporales, así como, para su representación cartográfica.

Todo el potencial señalado para las imágenes de satélite no se ha aplicado en la evaluación del conjunto de lomas de Atocongo y no existen estudios que relacionen la cobertura vegetal de lomas, el gradiente altitudinal y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) obtenido de imágenes de satélite. Esta falta de información científica sobre el comportamiento altitudinal del NDVI motivó a plantear esta línea de investigación.

En síntesis, el problema para la investigación quedó formulado de la manera siguiente: a pesar que se sabe que la altitud es un factor físico-geográfico de mucha influencia (directa o indirectamente a través de otros factores físicos o biológicos) sobre los componentes biológicos de las lomas y que, asimismo, se sabe que la reflectancia espectral de las imágenes de satélite son indicadores de la cobertura vegetal, no se ha intentado estimar el grado de influencia de la altitud sobre la cobertura vegetal y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), para el caso de las lomas de Atocongo, mediante funciones matemáticas.

En atención a la problemática específica que abordó el presente trabajo, la pregunta de investigación fue la siguiente: ¿Será que la cobertura vegetal de las lomas de Atocongo presenta un comportamiento asociado al nivel altitudinal, que puede ser

expresado mediante funciones matemáticas o curvas típicas del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)?

El presente estudio se justifica pues sus resultados aportan información para manejar y monitorear el ecosistema de lomas de Atocongo, actividades que requieren el conocimiento del comportamiento de las variables mencionadas para detectar cambios en el ecosistema.

El área de interés para el estudio comprendió el conjunto o complejo de lomas de Atocongo, el cual se desarrolla sobre los cerros Atocongo y Lúculo, y connota sectores más específicos como son las lomas de las quebradas Puquio, Lúculo, Verde y Guayabo, las cuales se localizan al sur de la ciudad de Lima, entre los distritos de Villa María del Triunfo y Pachacamac.

En este estudio cuando se refiera a las lomas de Atocongo se estará haciendo referencia a este ecosistema como el conjunto o complejo de lomas de Atocongo, que reúne las lomas de las quebradas Puquio, Lúculo, Verde y Guayabo. El presente estudio ha realizado las estimaciones específicas para estas lomas, por lo que a lo largo de su texto se referirá en particular a las lomas de Puquio, Lúculo, Verde y Guayabo.

La investigación realizada es una primera aproximación para identificar la influencia de las variables físicas sobre la cobertura vegetal de las lomas de Atocongo, representada por el NDVI. Lo señalado es importante dado que los ecosistemas de lomas dependen principalmente de los factores físicos del hábitat, y diferentes combinaciones de relieve y microclima (ambos interdependientes) van a determinar la mayor o menor cobertura vegetal de lomas.

Por otro lado, los resultados de la tesis contribuirán al uso más efectivo de las imágenes de satélite, sobre la base del NDVI y los modelos de ecuaciones de gradiente altitudinal, en la clasificación, ordenación y cartografía de las lomas de Atocongo. Como se señaló, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un indicador de la cobertura vegetal, y por su obtención sencilla a partir de imágenes de satélite presenta ventajas como su capacidad para estimar la cobertura vegetal y su variación altitudinal, e indirectamente, como un indicador de la calidad de sitio o productividad del suelo.

## **1.3 Antecedentes relacionados con el tema**

Evidentemente para la restauración y manejo de las lomas se requiere conocimientos científicos sobre el ecosistema. En general, existen numerosos estudios sobre la composición florística de las lomas pero pocos sobre su ecología, y en su mayoría para las lomas de Lachay. Estudios sobre NDVI como el que se plantea en la presente tesis han sido desarrollados, principalmente, para otros ámbitos y otros ecosistemas del mundo. La literatura científica internacional reporta un número considerable de estudios sobre la influencia de la altitud en la vegetación, así como, las aplicaciones del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el estudio de la vegetación.

### **1.3.1 Gradiente altitudinal y distribución de especies**

Muenchow, Bräuning, Rodríguez y von Wehrden (2013), para las lomas del cerro Mongón, cerca de Casma, en la región Ancash desarrollaron un estudio sobre la distribución y riqueza de especies de lomas a lo largo del gradiente altitudinal. El área de estudio fue dividido en nueve fajas altitudinales, a través de modelos digitales de elevación de terreno e imágenes de satélite. Se estimaron valores de riqueza de especies, cobertura vegetal, altitud, NDVI y otras variables. Entre los resultados se anota que la gradiente altitudinal fue determinante en la distribución y riqueza de especies, observándose el típico comportamiento unimodal.

Uğurlu y Oldeland (2012), elaboraron un estudio sobre las curvas de respuestas de ocho especies de roble a gradientes climáticos en Turquía. Emplearon los modelos Huisman Olf Fresco (HOF). En el análisis de las curvas de respuestas de especies determinaron que en el 16% de los casos las respuestas fueron unimodales, mientras que el 31% mostró respuestas lineales y los restantes 31% una respuesta con umbrales. Concluyen que los factores que influyen o controlan la distribución de las especies estudiadas fueron la estacionalidad de la temperatura y precipitación.

Kessler, Kluge, Hemp y Ohlemüller (2011), señalan que las gradientes altitudinales ofrecen una excelente oportunidad para evaluar los factores que determinan la riqueza de especies. En Costa Rica, ellos compararon la riqueza de especie de helecho a lo largo de 20 transectos en una gradiente altitudinal para cuantificar la

contribución relativa del clima sobre la riqueza de especies. Concluyen que la riqueza de especie de helecho está más estrechamente relacionada con los factores climáticos que con el efecto altitudinal.

Peper, Jansen, Pietzsch y Manthey (2011), evaluaron plantas vasculares a lo largo de transectos de 900 m de longitud en un área semidesértica al este del Cáucaso (Azerbaiyán) afectada por pastoreo. Se plantearon preguntas ¿Cómo las plantas se distribuyen a lo largo del gradiente? ¿Cuál es la forma del patrón de riqueza de especies? ¿Cómo se puede probar la existencia de discontinuidades en los patrones de rotación de especies? Ellos graficaron las curvas de respuestas de especies con los modelo de Huisman Olf Fresco (HOF) y calcularon la rotación de especies por acumulación de la primera derivada de todas la curvas de respuestas de especies. Probaron la discontinuidad potencial en los cambios de composición de la vegetación a lo largo de una gradiente de pastoreo. Introdujeron un nuevo modelo nulo basado en el concepto individualista del continuum que usa permutaciones de patrones de respuesta observados. Entre los resultados, muchas especies mostraron una respuesta sigmoidea negativa al efecto de pastoreo y unas pocas respondieron con un patrón unimodal.

Grau, Grytnes y Birks (2007), evaluaron la riqueza de especies de hepáticas y musgos a lo largo de una gradiente altitudinal en el Himalaya central en Nepal (100–5 500 msnm). Ellos observaron fuertes correlaciones entre la riqueza de los grupos de plantas. Un curva combada, unimodal fue observada para la relación entre la riqueza de la especie y altitud, con la riqueza máxima a las 2 800 m y 2 500 m de altitud, respectivamente. Estas crestas contrastan con la cresta de riqueza de helechos a las 1900 m y de plantas vasculares entre 1 500 y 2 500 m. Las hepáticas endémicas presentaron su riqueza máxima a las 3 300 m, y las hepáticas no endémicas mostraron su riqueza máxima a las 2 700 m de altitud.

Kluge y Kessler (2006), estudiaron la riqueza de especie de helechos entre 100 m y 3 400 m de altitud a lo largo de una gradiente altitudinal en la costa atlántica de Costa Rica. Afirmaron que la riqueza de especies mostró un modelo combado con relación a la altitud, con una cresta de riqueza a elevaciones medianas (1 700 m).

Wang, Tang y Fang (2007), anotaron que el patrón altitudinal de la riqueza de especies y sus mecanismos subyacentes ha sido por largo tiempo un tema de controversia en la investigación de la biodiversidad y biogeografía. Ellos desarrollaron un estudio para las montañas Gaoligong (entre 215 m a 5 791 msnm) localizadas al sureste del Tíbet (China). Sus resultados muestran que la riqueza y densidad de semillas de plantas en el nivel de especies, género y familia presentan altas correlaciones con la altitud; y muestran patrones combados a lo largo del gradiente altitudinal.

Por otra parte, Krömer, Kessler y Herzog (2006) compararon la diversidad, composición taxonómica y síndromes de polinización de comunidades de bromeliáceas con la diversidad y abundancia de colibríes a lo largo de dos gradientes altitudinales climáticamente diferentes en Bolivia. Sus resultados indicaron que los patrones de elevación de riqueza de especies de bromeliáceas difirieron notoriamente entre los transectos. A lo largo del transecto permanentemente húmedo de Carrasco, la riqueza de las especies alcanzó su punto máximo en elevaciones intermedias; mientras que en Masicurí, la mayoría de las especies se encontraron en tierras bajas, calientes y semiáridas.

Keizer (2000), realizó un estudio sobre la vegetación montana neotropical de una de las tres cordilleras de los Andes Colombianos, con el fin de contribuir al conocimiento de los patrones altitudinales de la diversidad, los tipos de vegetación y las relaciones vegetación-ambiente en las montañas tropicales. Utiliza el nivel taxonómico de familia dado que las taxa no estuvieron identificadas al nivel de género o especie. Concluye que altitud es la variable que mejor se asocia con la variación de la composición de árboles y arbustos en comparación con otras variables como la pendiente y la orientación. La riqueza de especies de árboles y arbusto decrece con la altitud. Anota que si bien el rol de la altitud es indirecto, puede ser considerado como el factor ecológico predominante.

### **1.3.2 NDVI, atributos de vegetación y gradiente altitudinal**

Chuvieco (1990), señala que el índice de vegetación de diferencia normalizada, nominado NDVI por sus siglas en inglés (normalized difference vegetation index) es

el cociente de la diferencia de las bandas infrarroja y roja entre la sumatoria de las mismas bandas.

Según Carlson, Perry y Schugge (1990), de su definición se desprende claramente que el NDVI (como la mayoría de los otros índices de vegetación de percepción remota) no es una cantidad física intrínseca, aunque sí está correlacionada con ciertas propiedades físicas de la vegetación como el índice de área foliar (IAF), condición de la vegetación y biomasa. Por lo mismo, los índices de vegetación son mediciones muy útiles a pesar de sus limitaciones.

Pettorelli (2013), proporciona una apreciación global de los principios y posibles aplicaciones del NDVI en la ecología, medioambiente, gestión de la fauna y conservación. Señala dicha autora que los datos de NDVI pueden proporcionar una valiosa información sobre los cambios temporales y espaciales de la distribución de la vegetación, productividad y dinámica; permitiendo supervisar la degradación del hábitat y fragmentación o estimar los efectos ecológicos de sequías e incendios forestales.

El NDVI también permite relacionar la vegetación con la distribución animal, abundancia, movimiento, supervivencia y parámetros reproductores. Durante las últimas décadas, numerosos estudios han resaltado la importancia de los datos del satélite y los NDVI en macroecología, paleoecología, ecología vegetal, dinámica de la población animal, supervisión medioambiental, selección y uso del hábitat (Pettorelli, 2013).

La escala del NDVI oscila de -1 a 1. El rango común para la vegetación verde es 0.2 a 0.8 (Rouse Jr, Haas, Schell y Deering, 1974). Las áreas de roca estéril, arena o nieve por lo general muestran valores muy bajos de NDVI (por ejemplo, 0.1 o menos). La vegetación escasa tal como arbustos y pastizales o cultivos en senescencia pueden resultar con valores moderados de NDVI (es decir, de 0.2 a 0.5). Los valores altos de NDVI (0.6 a 0.9) corresponden a una vegetación densa como las que se encuentra en los bosques templados y tropicales o en los cultivos en su etapa de crecimiento máximo (Crippen, 1990).

De acuerdo con Carlson y Ripley (1997), el NDVI se incrementa a medida que el índice de área foliar (IAF) o la densidad de la vegetación aumentan, aunque a cierto

umbral la relación se hace asintótica. Dicho umbral puede estar entre un NDVI de 0.5 a 0.8 y el IAF entre 3 y 4. Tales valores dependen del tipo de vegetación, edad y contenido de humedad de la hoja. El umbral puede ser arbitrariamente definido, pero es claro que después de cierto IAF, los cambios en el NDVI y el IAF se tornan insignificantes. Es importante tener en cuenta que para suelos desnudos el NDVI se presenta con valores de -0.1 a 0.2.

Zorogastúa, Quiróz y Garatuza (2012), evaluaron la dinámica de los bofedales en el altiplano peruano - boliviano, considerando las variables cobertura y uso de la tierra, biomasa aérea, escala espacial de trabajo y el área del ecosistema de bofedales, a dos resoluciones espaciales, a través de la variación anual y multianual del NDVI y la biomasa aérea de estos pastizales. Ellos relacionaron valores de NDVI provenientes de imágenes AVHRR de NOAA con valores de materia seca de biomasa aérea y obtuvieron la relación siguiente: materia seca =  $1.615 * (\text{NDVI})^{1.318}$ . Indican los autores que los cambios del NDVI durante el tiempo estudiado explicaron el 90% de la variación de la materia seca verde.

Box, Holben y Kalb (1989), anotan que los datos de NDVI parecen ser predictores relativamente fiables de la productividad primaria, excepto en áreas de terreno complejo como el caso de altas montañas, zonas costeras, áreas de regadío en climas secos, etcétera, debido a píxeles mixtos; también excepto en latitudes altas en las que las variaciones estacionales son altas y en desiertos extremos. Por otro lado, el NDVI no cae a cero en desiertos sin vegetación o sobre cubierta de nieve, debido a los efectos de fondo. Se encontró poca relación consistente entre diferentes tipos de vegetación, entre NDVI y cantidades de biomasa o flujo neto de  $\text{CO}_2$  biosférico.

Para otros lugares y otros tipos de ecosistemas existen numerosos trabajos relacionados. Amaral et al. (1996), indica que el NDVI es un buen indicador de la biomasa de la vegetación secundaria en los inicios de la sucesión vegetal, para el caso de la vegetación secundaria en un bosque amazónico de Rondonia (Brasil). Del análisis de gráficos de NDVI versus área basal y NDVI versus el índice de área foliar (IAF), se observa una relación lineal con valores de  $r^2 = 0.77$ .

También se puede citar el trabajo de Wellens (1997) quien usó el NDVI para investigar la dinámica de vegetación en Túnez. Anota que las imágenes de NDVI

proporcionan la información sobre variaciones de crecimiento de la vegetación, al interior de cada año e interanuales. Indican también que la comparación del NDVI con los parámetros ecológicos presentó una relación fuerte para el caso del porcentaje de cobertura vegetal, no así para el caso de la biomasa.

También puede citarse a Boelman et al. (2003), quienes exploraron la relación entre el NDVI y la biomasa de la parte aérea para dos tipos de tundra y hallaron una correlación del orden de  $r^2 = 0.59$ . Por otro lado, Jiang, Wang, Yang y Wang (2003) trabajaron con valores de NDVI diarios y de cada 10 días, para cultivos. Anotaron que el NDVI y el cultivo de trigo de invierno presentaron una fuerte relación. Dicha relación puede ser descrita con una curva de regresión lineal, polinomial cúbica y exponencial.

Por otro parte, Fairbanks y Mcgwire (2004), evaluaron la relación multitemporal del NDVI con la riqueza de especies de comunidades vegetales de California USA. El chaparral, matorral costero de salvia y el bosque de pino amarillo presentaron correlaciones elevadas entre la riqueza de especie y el NDVI. Concluyeron que la riqueza de especies puede ser caracterizada y monitoreada en el nivel regional y sobre largos periodos de tiempo usando datos de NDVI.

Morawitz, Blewett, Cohen y Alberti (2006), usaron el NDVI para evaluar los cambios en la cobertura vegetal de 42 cuencas, con datos de 1986 a 1999. Anotaron que la influencia humana generaba variaciones negativas en el NDVI. Por ejemplo, la densidad de la población presentó correlación negativa con el NDVI ( $r = -0.66$ ,  $p < 0.01$ ), al igual que la densidad del camino ( $r = -0.71$ ,  $p < 0.01$ ).

Ding et al. (2007), evaluaron las variaciones temporales y espaciales del NDVI para la meseta del Tíbet; así como la relaciones entre el NDVI y la precipitación. Para evaluar los cambios estacionales emplearon los valores máximos mensuales de NDVI y precipitación del periodo 1982 a 1999. Concluyeron que los valores más altos de NDVI se presentaron entre julio y noviembre. La correlación entre los valores mensuales del NDVI y la precipitación fue más alta en la zona central de la meseta. Por otra parte, la distribución espacial de los coeficientes de correlación entre la precipitación anual y los valores máximos anuales de NDVI fueron más elevados en la zona de praderas.

Levin et al. (2007), desarrollaron un estudio para evaluar la relación de la riqueza de especies y el NDVI. Establecieron 34 cuadrantes de 1 000 m<sup>2</sup> a lo largo de una gradiente altitudinal entre 300 y 2 200 m en Mount Hermon. Emplearon imágenes Landsat, Aster y QuickBird. Sus resultados les permitieron afirmar que todas las imágenes mostraron una correlación significativa con la riqueza de especies y el porcentaje de cobertura arbórea (con  $r^2$  tan altos como 0.87 entre el NDVI y la riqueza de especies).

### **1.3.3 Gradiente altitudinal, factores ambientales y biomasa**

Se puede anotar con especial relevancia los trabajos realizados por Torres (1981) y Torres y Arias (1989) en los cuales se infiere una relación positiva entre la altitud y la productividad primaria para el caso de las lomas de Lachay y Atiquipa. También, igualmente para las lomas de Lachay, el estudio de Ordóñez y Faustino (1982), que presenta una tendencia asociada entre el contenido de humedad del suelo y la altitud. Podemos considerar relacionado este estudio dado que la humedad del suelo determina la mayor o menor presencia de cobertura vegetal.

Perez y Frangi (2000), evaluaron la dinámica de la biomasa y necromasa, aérea y subterránea, de tres sitios de pastizal ubicados a 550, 850 y 1 025 m de elevación en un sierra de Argentina. El objetivo fue determinar si existían diferencias en la estructura de la materia seca, la micorrización, la producción primaria neta (NPP) de tejidos aéreos y subterráneos, la senescencia y conformación de mantillo y los patrones de los flujos de materia seca en relación con la altitud. La porción subterránea de la productividad primaria neta se incrementó con la altitud. La masa y la proporción de raíces finas, como también el porcentaje de micorrización, aumentaron también con la altitud. Las tasas de renovación aérea y subterránea decrecieron con el aumento de la altitud pero las tasas fueron más rápidas para los tejidos aéreos.

Zhou *et al.* (2007), evaluaron la producción de hojarasca durante el periodo de 1982-2001 en la Reserva de Biósfera de Dinghushan de la provincia de Guangdong China. Obtuvieron un decrecimiento de la producción de hojarasca a lo largo del gradiente altitudinal, desde la parte baja a la de mayor altitud.

Monty y Mahy (2009), realizaron un estudio para la población de la especie *Senecio inaequidens* (asterácea), una especie invasiva originaria de Sud África. Los resultados luego de dos años de estudio demuestran que con el incremento en la altitud, se presenta una reducción en tres rasgos de crecimiento: altura en la madurez, altura final de la planta y biomasa de parte aérea. Los rasgos fenológicos no exhibieron una clara variación clina a lo largo de los transectos altitudinales.

Zhong Wang, Luo, Li, Tang y Du (2013), estudiaron las causas del patrón unimodal de la biomasa y la productividad en prados alpino a lo largo del gradiente altitudinal en regiones semiáridas. Sus resultados señalan que la riqueza de especies es poco afectada con la gradiente altitudinal aunque si las respuestas del prado al cambio de los factores que limitan el crecimiento. El crecimiento es limitado por la sequedad a las altitudes bajas y en altitudes mayores por las temperaturas bajas, lo cual produce un modelo unimodal de biomasa y productividad asociado a una combinación óptima de temperatura y disponibilidad de agua.

## **1.4 Presentación de objetivos generales y específicos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Determinar la influencia de la altitud en la cobertura vegetal de lomas de Atocongo, expresando la relación mediante funciones matemáticas, a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), con el fin de aportar al diagnóstico ecológico de lomas y al desarrollo de aplicaciones de imágenes de satélite en el estudio de lomas.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

Evidenciar funciones matemáticas que relacionen la altitud y la cobertura vegetal.

Evidenciar funciones matemáticas que relacionen la cobertura vegetal y la reflectancia espectral expresada como NDVI.

Evidenciar funciones matemáticas que relacionen la altitud y la reflectancia espectral expresada como NDVI.

### **1.5 Limitaciones del estudio**

El desarrollo del estudio consideró las aplicaciones de las imágenes de satélites en los estudios ecológicos. En este propósito se encontraron dificultades para lograr un juego completo de imágenes de satélite. Dada la escasa disponibilidad de imágenes de alta resolución para la zona de estudio no se pudo contar con un juego amplio de imágenes, aunque sí se logró conseguir un set básico y representativo.

El presente trabajo de investigación fue de tipo retrospectivo, sobre la base de los inventarios de vegetación del Programa de Monitoreo Biológico de las lomas de Atocongo, que la empresa UNACEM implementa como parte de sus compromisos ambientales con el Ministerio de la Producción. No fue posible tener información coincidente entre la fecha de las imágenes de satélite y un respectivo inventario de vegetación.

El estudio se circunscribe a los aspectos físicos del hábitat de lomas de Atocongo. No enfatiza aspectos específicos como la comunidad vegetal y la dinámica de sistemas. Los aspectos de gestión de los problemas y manejo de los recursos culturales no son tratados en el presente estudio, sin que ello quiera significar que son irrelevantes.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen las bases teóricas relacionadas con el tema de la presente tesis, la definición de términos usados, las hipótesis y las variables.

### 2.1 BASES TEÓRICAS

#### 2.1.1 Modelamiento de especies en gradientes ambientales

Señala Shimwell (1972), que el análisis de gradientes es simplemente el estudio de los patrones espaciales, que presenta la vegetación en relación con tres tipos de variables: factores ambientales; composición y estructura de la población; y composición y estructura de la comunidad.

Alcaraz (2013), explica que si se selecciona un factor ambiental y se representa gráficamente la abundancia de una especie a lo largo del rango de variación del factor, el resultado posiblemente se aproxime a una curva unimodal. Esta variación continua de un factor ambiental se denomina un gradiente ambiental. Si varias especies están asociadas en una comunidad, se asume que sus curvas de abundancia en relación a un factor ambiental serán similares.

El enfoque de respuesta de las especies a la gradiente ambiental fue sugerido por Gleason (1926). Este autor propuso la hipótesis individualista que enfatiza la importancia de las especies por encima de los aspectos de la comunidad. Cada especie vegetal tiene una distribución distinta o rango de tolerancia y abundancia único, por tanto tiene curvas de respuestas, frente a un gradiente, con una forma y tamaño distinto a la de cualquier otra especie. Su planteamiento es conocido como el enfoque del continuum. Argumentaba que las especies de plantas responden individualmente a las variaciones de los factores ambientales que cambian de forma continua, tanto espacial como temporalmente; y como resultado la combinación de especies de plantas que se da en un punto dado de la superficie terrestre era única.

Alcaraz (2013), anota que las especies que crecen juntas muestran rangos de tolerancia similares y las especies subordinadas están estrechamente correlacionadas con las dominantes. Si las especies crecen en asociación unas con otras, muchas de ellas deberían tener curvas de respuestas y tolerancia similares, aunque rara vez idénticas, frente a las condiciones ambientales más importantes. Señala que en la actualidad, los ecólogos, aún no tienen un acuerdo último en el concepto de comunidad vegetal; aunque la mayoría comparte la idea del continuum en un espacio abstracto de dimensiones que corresponden a los factores ecológicos.

De acuerdo con Austin (1980) y Austin (1987), la respuesta de una especie a los parámetros ecológicos puede ser descrita a través de técnicas estadísticas que ajustan un modelo de regresión basado en la ocurrencia de la especie a lo largo de un gradiente ambiental, generando curvas de respuesta de la especie.

Jansen (2012), anota que el modelamiento de respuestas de las especies a lo largo de un gradiente ambiental es todavía una actividad frecuente en la ecología vegetal. Este análisis fue introducido por Ramenskij a comienzos del siglo 20 y nominado análisis de gradientes por Whittaker. Anota que se han creado algoritmos para reconocer la respuesta de una especie a lo largo de variaciones de las condiciones ecológicas. A menudo es difícil decidir el nivel de complejidad necesario para conseguir una adecuada simplificación de los datos.

De acuerdo con Shimwell (1972), los desarrollos teóricos sobre el tema de gradientes ambientales han compartido, en primer término, la representación de la data como matrices y el tratamiento de la similaridad entre muestras; y en segundo término, la técnica estadística conocida como análisis factorial, que se orienta al análisis de ciertos parámetros o factores subyacentes inicialmente desconocidos, que determinan la correlación entre especies o muestras. El mismo autor considera que las aproximaciones teóricas sobre el análisis de gradientes se pueden reunir en dos amplios grupos: análisis directo y análisis indirecto de gradientes. Ambas aproximaciones enfatizan la continuidad de la vegetación y procuran demostrar un continuum antes que una clasificación.

En el análisis directo de gradientes, las muestras de vegetación son dispuestas a lo largo de una gradiente ambiental. Esta aproximación fue originalmente aplicada por

Whittaker (1951). Los métodos de análisis de gradientes pueden ser divididos en tres grupos de acuerdo con la técnica empleada, así: el simple transecto de gradiente, el ordenamiento de muestras en un transecto compuesto o una gráfica hemisférica y el análisis de patrones ambientales ordenados como isolíneas (Shimwell, 1972).

El análisis indirecto de gradientes compara las muestras con respecto a su composición de especies y luego los ordena a lo largo de ejes o en un hiperespacio tridimensional a partir de las medidas de similaridad. La aproximación a la gradiente ambiental siempre es abstracta, inferida e indirecta (Shimwell, 1972).

### **2.1.2 Análisis directo de gradientes ambientales**

Todas las especies se presentan en un característico y limitado rango de hábitats; y dentro de ese rango, ellas tienden a ser más abundantes alrededor de un particular óptimo ambiental. La composición de la comunidad biótica cambia a lo largo de los gradientes ambientales. Los remplazos sucesivos de especies ocurren como una función de la variación del ambiente, o como respuesta a la sucesión vegetal. Los gradientes no necesariamente tiene una realidad física continua ni en el espacio ni el tiempo, pero es útil la abstracción para explicar la distribución en el espacio y en el tiempo. El análisis de gradiente *sensu lato* incluye el análisis directo de gradiente, en el cual cada abundancia de especies (o probabilidad de ocurrencia) es descrita cómo una función de variables ambientales medidas (Ter Braak y Prentice, 1988).

El análisis directo de gradiente es utilizado para observar la variación de la vegetación en relación con los factores ambientales. Como el nombre lo sugiere, los datos ambientales son utilizados directamente para organizar la información de la vegetación. Cuando no se conocen las gradientes ambientales o no es clara su influencia se utiliza el análisis indirecto de gradientes cuyas técnicas tratan el conjunto de la información de la vegetación para examinar la variación dentro de esta y asociarlas a alguna variable ambiental.

Los trabajos de Austin y Austin (1980); Austin, Cunningham y Fleming (1984); y Austin y Smith (1989), señalan que las curvas de respuestas de las especies a gradientes ambientales varían enormemente. La anchura y altura de la curva para

cada especie es diferente, lo cual indica que los rangos de tolerancia son distintos. Por otro lado, la forma de la curva en muy pocas ocasiones se ajusta a la idea de perfecta forma de campana; por el contrario las curvas suelen ser asimétricas, bimodales o con forma de meseta.

Oksanen y Minchin (2002), examinaron un amplio rango de posibles formas de curvas de modelos de respuesta a las gradientes. Señalan que no hay data sobre el cual establecer una base para estimar los límites de las especies por lo mismo no es conveniente establecer modelos sobre una teorización confusa.

Alcaraz (2013), anota que una complicación adicional para el análisis es el hecho de que las especies que conviven en un punto de la superficie terrestre están respondiendo simultáneamente a más de un factor ambiental. Así, cada especie tiene una curva de respuesta ambiental diferente por cada factor ambiental y cada curva difiere en su forma. Las ventajas o desventajas de un lugar para el crecimiento de una determinada especie serán representadas por la posición colectiva del lugar en cada una de las curvas de respuesta ambiental.

Gauch y Whittaker (1972), realizaron estudios a lo largo de una gradiente de temperatura usando 750 sitios. Sus conclusiones fueron: (a) las curvas en forma de campana como respuestas a la gradiente ambiental no son universales, (b) las curvas con asimetría positiva son características para bosques de eucaliptus (c) la riqueza de especies se incrementa con la temperatura a lo largo del gradiente.

Austin y Smith (1989), a partir de sus investigaciones, anotan las generalizaciones siguientes: (1) las gradientes ambientales son de dos tipos, gradiente de recurso y gradiente fisiológica; (2) las respuestas del nicho fundamental a la gradiente de recursos es una serie de curvas anidadas; (3) la respuesta del nicho fundamental a la gradiente directa es una serie de curvas separadas, independientes, superponiéndose en sus curvas de respuesta; (4) la curva de respuesta de las especies señala una sección de la curva en la cual la especie tiene un desarrollo ventajoso; (5) la forma del nicho realizado es bimodal; (6-8) la riqueza de especies es bimodal, la dominancia trimodal y el la producción vegetal es unimodal.

### **2.1.3 Modelos estadísticos para el análisis directo de gradientes**

Austin (1971), indica que el análisis directo de gradiente es un problema de regresión. Se ajustan curvas o superficies a la relación entre cada abundancia de especie o probabilidad de ocurrencia (la variable respuesta) y una o más variables ambientales (la variable predictora, una o más variables). Austin (1999), explica que tres componentes son necesarios en los modelos estadísticos: un modelo ecológico correspondiente a la teoría a ser usada o probada; un modelo de los datos correspondiente a la colección y medición de los datos; un modelo estadístico correspondiente a la teoría estadística y métodos probados. Los modelos ecológicos pueden ser usados para explorar la teoría ecológica. La mejora en los modelos estadísticos debe ser basada en conceptos ecológicos.

Leps y Smilauer (2003), indican que para el análisis directo de gradientes ambientales se emplean los modelos de regresión en amplio sentido, los cuales incluyen los métodos de regresión tradicionales, métodos de análisis de varianza (ANOVA) y análisis de covarianza (ANCOVA). Este grupo de métodos está unificado bajo el nombre de modelo lineal general. Los métodos tradicionales de regresión para el análisis directo de gradientes son los modelos típicos de regresión lineal y curvilínea, los modelos lineales generalizados (general linear model, GLM), los modelos aditivos generalizados (generalized additive models, GAM), los modelos Loess y los árboles de clasificación y regresión (classification and regression trees, CART).

La respuesta lineal es usualmente ajustada por los clásicos métodos de regresión (mínimos cuadrados). Para un modelo de respuesta unimodal, lo más simple es estimar el óptimo de la especie a partir de la media ponderada de los valores de las variables ambientales en la “n” muestras en las cuales la especie está presente. En cuanto al modelo de regresión lineal las técnicas basadas en modelos de respuesta lineal son apropiadas para datos homogéneos y las técnicas de la media ponderada son propias para datos heterogéneos (Leps y Smilauer, 2003).

En ecología, los datos están rara vez dispuestos adecuadamente para un modelo de regresión lineal. Si se aplica un modelo de regresión lineal a los datos, se está implícitamente asumiendo una serie de asunciones (normalidad, homogeneidad,

valores fijos de la variable explicatoria, independencia y especificación correcta del modelo) y una vez que los resultados se obtengan se necesita verificarlos. Esto es llamado proceso de validación (Zuur, Leno, Walker, Saveliev y Smith, 2009).

### Modelos lineales generales

Las variables cuantitativas y cualitativas (factores) pueden ser empleadas como predictoras. Cuando todas las variables son continuas, el modelo es denominado modelo lineal múltiple. Cuando entre las variables predictoras se incluye variables cualitativas se está frente a un análisis factorial. Es conveniente anotar que los métodos de análisis de varianza (ANOVA) pertenecen a la familia de los modelos lineales generales.

Entre las hipótesis del modelo de regresión lineal general se plantea la linealidad en los parámetros en la relación entre la variable endógena (a explicar) y las exógenas (explicativas). No debe confundirse esta hipótesis de linealidad en los parámetros con una relación lineal entre las variables. Se puede dar el caso de una relación que no es formalmente lineal entre las variables, sin embargo cumplir la hipótesis de linealidad en los parámetros. A veces, la transformación logarítmica, linealiza el modelo. También se puede dar el caso de una relación lineal entre variables y no lineal entre los parámetros (Leps y Smilauer, 2003).

### Modelos lineales generalizados (GLM)

Tanto en ciencias biológicas como en ciencias sociales, frecuentemente, se analizan variables respuesta que por su distribución y/o características no pueden ser analizadas utilizando la estadística paramétrica clásica. Debido a que los Modelos Lineales Generalizados (GLM) ofrecen una alternativa robusta y muy versátil respecto a la estadística clásica (distintas distribuciones, funciones de varianza, etcétera), en los últimos 20 años se ha dado un crecimiento explosivo en la aplicación de los GLM a estudios biológicos (Leps y Smilauer, 2003).

El modelo lineal generalizado (GLM) es una generalización de la regresión lineal ordinaria, que relaciona la distribución aleatoria de la variable dependiente en el experimento (la «función de distribución») con la parte sistemática (no aleatoria) (o «predictor lineal») a través de una función llamada la «función de enlace». El

modelo GLM consiste de tres elementos: una función de distribución, perteneciente a la familia exponencial, un predictor lineal y una función de enlace (Leps y Smilauer, 2003).

En el modelo GLM se asume que la variable dependiente está generada por una función de distribución de la familia exponencial. La media de la distribución depende de las variables independientes. Los parámetros desconocidos son generalmente estimados por máxima verosimilitud, máxima cuasi-verosimilitud, o técnicas de inferencia bayesiana (Leps y Smilauer, 2003).

Los modelos GLM permiten la unificación de una amplia variedad de métodos estadísticos como la regresión, los modelos ANOVA y los modelos de datos categóricos. En realidad se usa el mismo algoritmo para obtener los estimadores de máxima verosimilitud en todos los casos (Leps y Smilauer, 2003).

Pese a su notable generalidad, los GLM no están exentos de limitaciones. Una de la más relevante deriva de su carácter de modelos “lineales”. Las variables explicativas entran en el modelo a través de un predictor lineal que no es más que una combinación lineal de las variables explicativas. Una forma de introducir efectos no lineales en el modelo es discretizando las variables explicativas o aplicando modelos aditivos generalizados (GAM) (Leps y Smilauer, 2003).

Si los modelos lineales generalizados (GLM) constituyen una propuesta para casos en los cuales no se cumple con la normalidad de la variable respuesta (y los errores) si deben cumplir con la exigencia de observaciones independientes. Si los datos no son independientes o están correlacionados, los modelos mixtos se convierten en el modelo estadístico adecuado pues permiten modelizar la variabilidad y la presencia de observaciones correlacionadas. Es conveniente tener en cuenta que los modelos mixtos son pertinentes cuando la variable respuesta sigue una distribución Normal, Sin los datos no son normales y están autocorrelacionados se debe acudir a los modelos lineales generalizados mixtos (GLMM), los cuales constituyen una fusión entre el modelo lineal mixto y el modelo lineal generalizado (Zuur et al., 2009).

Los modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) y modelos aditivos generalizados (GAMM) son usados para modelar datos anidados y estructuras de correlación espacial y temporal en datos de conteo o datos binomiales. Estos modelos

combinan los modelos de efectos mixtos y los modelos GLM y GAM. Los modelos de efectos mixtos aditivos y modelos de efectos mixtos son útiles para datos anidados (también llamados datos de panel o datos jerárquicos), mediciones repetidas y datos correlacionados temporal y espacialmente (Zuur et al., 2009).

Guisan, Weiss, y Weiss (1999), comparan el modelo GLM con el modelo de análisis de correspondencia canónica (CCA, por sus siglas en inglés, canonical corresponde analysis). Los autores concluyen que la distribución espacial de las individuos específicos es mejor modelada por GLM que por CCA. Sin embargo, CCA puede tener algunas ventajas para especies raras con pocas observaciones.

Vayssières, Plant y Allen-Diaz (2000), examinaron las respuestas de tres especies de robles en California, para comparar los modelos GLM con los árboles de clasificación y regresión (CART). Emplearon una regresión logística múltiple (una forma de GLM). Concluyen en que si bien la regresión logística resultó más adaptada para probar teorías, los modelos CART son más intuitivos, fáciles de desarrollar e interpretar, y constituyen una herramienta valiosa para modelar la distribución de especies.

Austin (2002), indica que los modelos lineales generalizados (GLM) y los modelos aditivos generalizados (GAM) con regresión logística, con datos de presencia ausencia, han ido incrementado su popularidad como modelos estadísticos estándar para el análisis de gradientes ambientales y las respuestas de las especies. Guisan, Edwards Jr. y Hastie (2002), indican que los modelos lineales generalizados y modelos aditivos generalizados son un avance significativo en el análisis de la regresión de gradientes ambientales.

#### Modelos aditivos generalizados (GAM)

Los modelos aditivos generalizados (GAM) se basan en polinomios continuos por intervalos (splines). Los GAM son una generalización de los GLM, de los que se diferencian en cuanto al predictor lineal, que no es una combinación lineal de las variables explicativas, sino una combinación lineal

de funciones de dichas variables explicativas, por lo que el modelo puede incluir efectos y relaciones no lineales entre variables (Zuur et al., 2009).

Los GAM se consideran modelos “semiparamétricos” (no es necesario estimar los parámetros  $\beta_i$ ). Ello supone un buen compromiso entre los modelos lineales puramente paramétricos (fáciles de construir e interpretar, pero poco flexibles) y modelos totalmente no-paramétricos (modelos muy flexibles, pero difíciles de estimar y de interpretar) (Zuur et al., 2009).

Una solución sencilla para tener en cuenta los efectos no lineales hubiese sido incorporar en el predictor lineal términos cuadráticos, cúbicos, etc., de las variables explicativas (es decir, términos de la forma  $x^2$ ,  $x^3$ , etc.) de forma que el predictor deje de ser lineal y se convierta en un polinomio de las variables explicativas. Sin embargo, esta solución plantea problemas bien conocidos derivados del hecho de que los polinomios son funciones de soporte no acotado (su dominio se extiende sobre todo el eje real), de manera que, en general, cualquier intento de mejorar su ajuste en un punto determinado se consigue a expensas de empeorarlo en otros puntos muy alejados (Zuur et al., 2009).

Lo anterior supone que los polinomios pueden proporcionar una solución adecuada cuando se busca un buen ajuste en el entorno de un punto concreto, pero no sobre todo un intervalo. Una alternativa ampliamente utilizada consiste en emplear splines. Los splines son polinomios definidos sobre intervalos y que toman valor nulo fuera de esos intervalos. Con esto se consigue graduar el ajuste de la regresión de forma que los cambios que se produzcan para mejorar ese ajuste tengan un efecto local y no se extiendan más allá de los intervalos en los que están definidos los splines involucrados en cada caso (Zuur et al., 2009).

Los modelos GAM han sido empleados desde mucho tiempo atrás. Bio, Alkemade, y Barendgret (1998), evaluaron las formas de respuestas de 156 especies en relación con 6 variables ambientales usando GAM. Los resultados obtenidos señalan que el 23 % presentaron curvas sigmoideas y gaussianas; y los restantes 77% se presentaron más complejos. Yee y

Mitchell (1991), indican que los GAM son una extensión no paramétrica de los GLM. Un resultado importante es que si la curva de respuesta debe ser unimodal y simétrica ello no puede ser probada mediante los modelos GAM. Los modelos GAM no proporcionan test para probar la asimetría y curtosis de las curvas de respuesta (Oksanen y Minchin, 2002)

Austin, Belbin, Meyers, Doherty y Luoto (2006), evaluaron datos generados (en gabinete) para el modelamiento de distribución de especies. Tanto el modelo GLM como el GAM tuvieron mejor desempeño para respuestas unimodales y predictores directos. GAM tuvo un desempeño mejor para las modelos unimodales asimétricos y para los predictores indirectos. Moisen et al. (2006) desarrollaron un estudio para predecir la presencia de especies forestales y su área basal, en incluyeron modelos GAM en la comparación. Concluyen que estos modelos permiten mejores resultados.

Tian et al. (2013), investigaron las comunidades vegetales a lo largo de un gradiente altitudinal en las montañas Usun, Xinjiang (China). Emplean una clasificación mediante el programa informático TWINSpan, ajustan índices de diversidad con modelos GAM y con un análisis de correspondencia canónica libre de tendencia (DCCA, por sus siglas en inglés, detrended canonical corresponde analysis). Entre otras conclusiones señalan que la riqueza de especies, índices de Simpson, índice de Shannon-Wiener, índice de Pielou mostraron múltiples picos con el incremento de la altitud.

#### Modelos jerarquizados de regresión logística

Huisman, Olf y Fresco (1993), introdujeron un set de modelos jerárquicos que posibilitan una simple interpretación de múltiples modelos que se pueden obtener a partir de los datos y tipos de nicho ecológico. Señalan estos autores que las respuestas de las especies a lo largo del gradiente ambiental son secciones de cruce de los hipernichos de las especies. Si se asume que el nicho fitosociológico de una especie debe ser simple (por ejemplo unimodal) se puede esperar que el nicho realizado sea también simple. Pero debido al elevado número de gradientes escondidos en los datos de campo, no es aconsejable el uso de modelos no controlados como el GAM (modelo aditivo general) sino modelos más conservativos.

Huisman et al. (1993), sugirieron cinco formas de respuesta o cinco modelos de regresión anidada jerárquica, cada uno incrementado gradualmente su complejidad. El modelo de mejor ajuste es identificado como la más probable curva de respuesta de la especie. Adicionalmente, Jansen y Oksanen (2013), añadieron dos tipos de modelos bimodales totalizando siete modelos jerárquicos.

Jansen y Oksanen (2013), desarrollaron un estudio acerca de los modelos de respuestas de especies a los gradientes ambientales obtenidos mediante los modelos revisados de Huisman Olf Fresco. Estuvieron interesados en el modelamiento de las respuestas de especie y responder cuestiones como ¿puede la regresión logística jerárquica competir contra los modelos GAM en cuanto se refiere a la inferencia estadística? ¿Son las formas bimodales útiles como modelos de respuestas a los gradientes ecológicos? Ellos concluyen en que los modelos jerárquicos de regresión logística ofrecen una manera flexible para ajustar las respuestas de las especies.

En un modelo jerarquizado de regresión logística (también conocido como modelos de Huisman, Olf, Fresco (HOF) el mejor modelo es seleccionado desde una set de modelos predeterminados usando el estadístico Criterio de Información de Akaike (AIC, Akaike Information Criterion), un balance entre el modelo ajustado a los datos y una simplicidad del modelo (Jansen, 2012).

#### **2.1.4 Los modelos de distribución de especies y la dependencia espacial**

Guisan y Thuiller (2005), señalan que la independencia de las observaciones es un prerrequisito fundamental para aplicar la mayoría de los métodos estadísticos. Las soluciones a este problema incluyen: (i) corrección del número de grados de libertad usados en el modelo del test estadístico. (ii) Añadir al término de la autocorrelación espacial, los predictores lineales hasta que se elimine la estructura espacial y no pueda ser detectada en los residuales. (iii) remuestrear los plot a suficiente distancia espacial para evitar la autocorrelación. La decisión final sobre que aproximación usar dependerá de los objetivos del estudio y los marcos temporales y espaciales para la predicción.

Eliminar la estructura espacial es la solución a la que más acuden los ecólogos. Sin embargo los patrones espaciales observados en los residuales podría ser el resultado de la no inclusión de la autocorrelación espacial entre las variables predictoras a pesar de ser natural en los procesos biológicos. Como resultado los modelos que eliminan la estructura espacial reflejan el ambiente más que la estructura biológica espacial. Es necesario tener en cuenta que la dependencia espacial de origen biológico (dispersión, demografía o conducta) es parte intrínseca de los datos ecológicos (Guisan y Thuiller, 2005).

Miller, Franklin, y Aspinall (2007), resaltan la importancia de incluir la dependencia espacial en los modelos de predicción de especies. Describen cuatro métodos estadísticos para incluir la dependencia espacial: modelos autoregresivos, geoestadística, regresión ponderada geográficamente y estimación de parámetros.

Rosenberg y Anderson (2011), desarrollaron un programa informático denominado Pattern Analysis, Spatial Statistics and Geographic Exegesis (PASSaGE), en cuyo manual se describen numerosas técnicas para el análisis de la dependencia espacial (correlogramas de Moran, Geary y Mantel; variogramas; análisis de anisotropías)

### **2.1.5 La gradiente altitudinal**

Benito de Pando y Peñas de Giles (2007), anotan que “las variables predictoras seleccionadas, idealmente, deberían ser aquellas que se consideren las causantes directas de la distribución de la especie; aunque es habitual que se utilicen únicamente las disponibles, generalmente derivadas de modelos digitales de elevaciones ó interpolación espacial a partir de datos de estaciones climáticas”. “La colinealidad entre variables también es un factor a tener en cuenta, pues añade información redundante al algoritmo de modelización y puede generar resultados de difícil interpretación por sobreajuste del modelo” (p. 101).

Guisan et al., 1999, y Guisan y Zimmermann, 2000, citados por Benito de Pando y Peñas de Giles (2007) anotan que la variables predictoras pueden clasificarse como: gradientes de recursos directamente consumidos (nutrientes, agua, luz, etc.); gradientes directos, que son parámetros con importancia fisiológica (temperatura,

pH, etcétera.) y gradientes indirectos, relativos a las características físicas del territorio (latitud, altitud, orientación, elevación, pendiente, geología, etc.), pero que muestran una buena correlación con los patrones de distribución de las especies porque habitualmente reemplazan distintas combinaciones de gradientes de recursos y gradientes directos.

Austin y Austin (1980), explican que las variables ambientales (predictoras) pueden ser próximas o distales (distantes), en cuanto a la posición del predictor en la cadena de procesos que lo enlazan con las respuestas de las plantas. Las gradientes próximas serán la causa que origina la respuesta de la planta. Por ejemplo, el fósforo soluble en el suelo alrededor de la raíz de la planta sería la más próxima gradiente de recurso. Las gradientes indirectas son claramente variables distales. Cuando se usen variables distales los modelos de distribución de especies tendrán un uso restringido al lugar (uso local). Los modelos que consideran gradientes directos o recursos próximos serán más robustos y de aplicación amplia. A su vez estos modelos serán menos prácticos por la exigencia para su obtención, en términos de tiempo y recursos de investigación; así, en la elaboración de un mapa de predicción de la distribución de especies resultará muy exigido obtener una cobertura cartográfica y SIG para variables próximas o gradientes directos.

La discusión teórica sobre gradientes ambientales no distingue usualmente entre tipos de gradientes directas o próximas e indirectas o distantes (ter Braak, 1985; ter Braak, 1986; Austin y Smith, 1989; Guisan y Zimmermann, 2000).

La forma esperada de la respuesta de especies variará con la naturaleza de la gradiente directa o indirecta. Las respuestas a gradientes indirectas podrían tomar alguna forma que dependa de la naturaleza de las correlaciones entre la variable indirecta y la variable causal o directa. Las variables indirectas usualmente reemplazan una combinación de diferentes recursos y gradientes directas en una simple variables. Los modelos predictivos serán robustos solamente en los casos en los que la gradiente causal o directa está correlacionada linealmente con la gradiente indirecta. Las gradientes de altitudes pueden mostrar estas características; así

también la posición topográfica. Se ha discutido bastante sobre las formas de respuesta considerando gradientes directas, indirectas y de recursos pero no se tienen conclusiones definitivas (Austin y Smith, 1989; Guisan et al., 1999; Guisan y Zimmermann, 2000; Franklin, McCullough y Gray, 2000; Meentemeyer, Moody y Franklin, 2001)

Shimwell (1972), señala que a lo largo de la gradiente altitudinal numerosas y complejas interacciones de ambientes producen adaptaciones fisiológicas a la temperatura, precipitación, humedad, longitud de la estación de crecimiento, exposición al viento, evaporación, etcétera. Todas estas variables ambientales contribuyen a una gradiente climática compleja para la cual la altitud es una variable útil para su aproximación. La evaluación del rol individual de cada variable climática en la gradiente ambiental es solamente posible por extensos y laboriosos experimentos y en general, las relaciones observadas quedarán siempre como una generalización relativa de la aproximación altitudinal (p. 237).

Keizer (2000) estudia la vegetación montana Neotropical de una de las tres cordilleras de los Andes Colombianos, con el fin de contribuir al conocimiento de los patrones altitudinales de la diversidad, los tipos de vegetación y las relaciones vegetación - ambiente en las montañas tropicales. Sus resultados indican que la altitud explica mejor la composición familiar de los árboles y arbustos del pie del monte hasta el límite altitudinal del bosque, en comparación con el tipo de vertiente (amazónico o interandino) o la inclinación del terreno. Mientras que la altitud parece ser más importante que cualquier otro factor o complejo de factores ecológicos, debe resaltarse que no existe ninguna base fisiológica para la influencia de la altitud por sí mismo. En el caso de los bosques entre 2 250 y 3 500 m existe, por lo menos teóricamente, una variable ambiental más importante que la altitud; posiblemente, esta variable se relaciona con el régimen de las lluvias y / o de las nieblas.

### **2.1.6 La cobertura vegetal**

Un número de medidas básicas son empleadas para describir las poblaciones y comunidades. Entre estas están la densidad, frecuencia, cobertura y biomasa. Desde ellas se pueden determinar otras medidas como la distribución de la población,

diversidad de especies y productividad. A continuación se describe la variable cobertura vegetal, su muestreo y medición, sobre la base de Brower, Zar y von Ende (1990).

La cobertura es la proporción de suelo cubierta por la proyección perpendicular de las copas o parte área de las plantas de una especie. Es calculada como el área cubierta por las plantas de una especie dividida en el total del área, por ejemplo 180 m<sup>2</sup>/ha (Brower et al., 1990).

La cobertura relativa (RC) de la especie es la proporción de su cobertura comparada con el de todas las especies en la comunidad. El grado de cobertura algunas veces es considerado como una medida de dominancia en la comunidad. Sin embargo, la dominancia puede incluir factores adicionales, por lo que el término cobertura es preferido (Brower et al., 1990)

La cobertura ha sido utilizada con mucha frecuencia como medida de la abundancia de los atributos de la comunidad, especialmente cuando la estimación de la densidad resulta difícil por la ausencia de límites netos visibles entre los individuos, como ocurre en los pastizales, en el caso de plantas macollantes y cespitosas o en cojín (Brower et al., 1990).

Por otro lado, esta variable es factible de evaluación subjetiva, lo que no ocurre con las demás. En el sistema de clasificación de Braun Blanquet se emplea la evaluación visual de la cobertura al igual que en los métodos descriptivos de Kuchler y Fosberg, todos ellos con sus propias escalas de valores. Estas escalas han sido aplicadas muy a menudo en su versión original o modificada (Matteucci y Colma, 1982).

Una manera de poner límites a la subjetividad de las evaluaciones consiste en establecer intervalos de clases, a los cuales se asignan las evaluaciones visuales. En la Tabla 1 se muestra, a modo ilustrativo, las escalas de categorización de las mediciones de cobertura vegetal (Matteucci y Colma, 1982).

## Correspondencia de escalas subjetivas de cobertura vegetal

Braun-Blanquet	Kuchler	Fosberg
Continuo (5): mayor del 75%	Continuo (c): mayor de 75%	Cerrado: las copas o vástagos se tocan
Interrumpido (4): 50 a 75%	Interrumpido (i): 50 a 75%	Abierto: las copas o vástago no se tocan pero cubren por lo menos el 30% de la superficie
Disperso (3): 25 a 50%	Parque (p): 25 a 50%, en manchones	
Raro (2): 15 a 25%	Raro (r): 6 a 25%	Disperso: la distancia entre las copas o los vástagos es el doble de su diámetro
Muy raro (2): 5 a 2%	Esporádico (b): 1 a 5%	
Esporádico (1): 1 a 5%	Esporádico (b): 1 a 5%	
Casi ausente (r): menos que 1%	Casi ausente (a): menos que 1%	

Fuente: Tabla VI. Escalas de cobertura de Braun-Blanquet (modificada), de Fosberg y de Kuchler, p. 45

En algunos tipos de vegetación, el empleo del plot o parcela puede ser impracticable y prohibitivo por el tiempo que consume. En este caso los transectos son útiles, y mucho más en los estudios que requieren de estaciones contiguas para el estudio de la sucesión ecológica o comunidades de zonas de transición (Matteucci y Colma, 1982).

Existen tres tipos de transectos: el transecto de faja, la línea de intercepción y el transecto lineal. En el método de la línea de intercepción, los datos que se registran corresponden a las plantas que se encuentran o son tocadas por una línea extendida a través de la comunidad bajo estudio. Dado que en esta técnica no se asocia áreas, solamente puede estimarse los índices de densidad y otras estimaciones relativas de densidad. Las líneas de intercepción son usadas ampliamente en comunidades cespitosas (Brower et al., 1990).

En las líneas de intercepción se extiende una cuerda a través de dos puntos identificados. Las líneas pueden ser 10, 25, 50 o 100 m de largo. En la longitud se puede establecer intervalos para efectos de obtener otros registros como el caso de las frecuencias. Se empieza contando en un lado de la línea y se registra por intervalo. En vegetación densa como el césped, se cuenta solamente las plantas que físicamente son interceptadas por la línea respectiva. Los datos de cobertura vegetal obtenidos por la técnica de línea de intercepción varían con relación a los obtenidos por los otros métodos (Brower et al., 1990).

En las líneas de intercepción, la medida de longitud interceptada o distancia de intercepción es usado para estimar la cobertura. Esta longitud es la porción de la

longitud de transecto interceptada por la planta o por la proyección de follajes o copa. Para cada planta contada, se mide la longitud de intercepción (Brower et al., 1990).

El “índice de cobertura lineal” (ICL) se obtiene a partir de la formulación  $ICL = l / L$ ; donde  $l$  es la suma de las longitudes interceptadas para una especie; y  $L$  es la longitud total de todos los transectos muestreados. La cobertura basal y la cobertura aérea de varias plantas pueden superponerse, por lo que la longitud de intercepción puede ser mucho más grande que la longitud del transecto (Brower et al., 1990).

Con relación a la variable bidimensional o variable combinada cobertura-abundancia, van der Maarel (2005), señala que en la tradición europea, la cobertura es usualmente estimada mediante una escala de cobertura-abundancia. Las dos escalas todavía en uso son la Escala de Domin-Krajina y la escala de Braun-Blanquet; esta última con algunas variaciones, ha sido usada profusamente desde 1920.

Los críticos de la escala de cobertura-abundancia consideran que es una errada combinación de dos parámetros independientes; sin embargo, otros especialistas lo resaltan como una brillante aproximación a la integración. Varios defensores de la estimación combinada de cobertura-abundancia lo han encontrado realista; no obstante han creado modos de convertir las categorías de abundancia en valores de cobertura aproximada; y van der Maarel (1979) sugiere una “Escala de Transformación Ordinal” (OTV) que reemplazan los puntos de la escala modificada de Braun-Blanquet por valores del 1 al 9. Estos valores, si bien no son aritméticos por menos son ordinales, según anota su autor, quien propone una ecuación de regresión lineal para obtener los mencionados valores ordinales ( $OTV = 1.415 \ln C + 2$ ; donde  $C$  es el valor de cobertura en %).

La Tabla 2 muestra la escala ampliada de cobertura-abundancia de Braun-Blanquet y su transformación ordinal de valores (OTV) de acuerdo a van der Maarel (1979).

## Transformación ordinal de la escala de cobertura-abundancia

Braun-Blanquet	Categoría de abundancia	Cobertura: intervalos interpretados	OTV Intervalo de cobertura	OTV
	1-3 individuos	$c \leq 5\%$		1
+	Pocos individuos	$c \leq 5\%$	$0.5 < c \leq 1.5\%$	2
1	abundante	$c \leq 5\%$	$1.5 < c \leq 3\%$	3
2m	Muy abundantes	$c \leq 5\%$	$3 < c \leq 5\%$	4
2a	Irrelevantes	$5 < c \leq 12.5\%$		5
2b		$12.5 < c \leq 25\%$		6
3		$25 < c \leq 50\%$		7
4		$50 < c \leq 75\%$		8
5		$c \leq 75\%$		9

Fuente: van der Maarel (2005), p. 16, Table 1.3 Extended Braun-Blanquet cover-abundance scale and ordinal transform values (OTV) according to van der Maarel (1979) with interpreted cover value intervals for low cover values.

## 2.2 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Los términos que se han empleado en el presente estudio corresponden en su mayoría al campo disciplinario de la ecología de comunidades y la teledetección espacial.

### Análisis directo de gradientes

En el análisis directo de gradientes, se está interesado en una particular variable y su influencia sobre las especies, que puede ser modelado como una regresión (Shimwell, 1972, p. 236).

### Banda espectral

Franjas del espectro electromagnético que son registradas por los sensores de imágenes de satélite. Tales franjas son seleccionadas y fijadas en el diseño del sensor para registrar características particulares de los diferentes elementos del terreno los cuales tienen respuestas de reflectancia espectral propias de su constitución natural (Chuvieco, 2010).

### Cobertura vegetal

Cobertura vegetal es la proporción del área ocupada por una proyección perpendicular de las partes aéreas de las plantas. Se puede expresar como el área total de cobertura vegetal dividida por el total del área del hábitat (Brower et al., 1990).

#### Ecoclina

Es la manifestación concreta de un gradiente ecológico. Ecotononía en que dos comunidades en contacto presentan límites más graduados o menos discontinuos interdigitados y difusos (Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2005, p.372)

#### Flora

Conjunto de las especies y variedades de plantas de un territorio dado. Su estudio da como resultado una lista de las especies presentes sin incluir otra información que no fuera la taxonómica, geográfica y de usos (Mateucci y Colma, 1982).

#### Gradiente

Cambio unidireccional, más o menos continuo de algunas propiedades en un espacio. Se aplica normalmente a la variación de la temperatura y la presión con la altura. También se aplica al descenso de la superficie de un terreno, o del eje de un camino, zanja u otra construcción lineal, expresados por la relación entre una unidad vertical y tantas unidades horizontales, y también en porcentaje, o en grado de inclinación (Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2005, p.537)

#### Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés, normalized difference vegetation index) es el cociente de la diferencia de las bandas infrarroja y roja entre la sumatoria de las mismas bandas (Chuvieco, 1990).

#### Lomas

Weberbauer (1945), describe la formación de las lomas indicando que “Lomas llama el habitante de la Costa peruana, aquella vegetación que, despertada por la humedad de las neblinas, comienza enverdecer a mediados de invierno y se seca a principios del verano. Sin embargo, este término puede tener otro sentido también; pues en la

región andina se denomina lomas, los cerros de laderas suavemente inclinadas y cubiertas de una vegetación baja” (Weberbauer, 1945, p. 222)

### Reflectancia

La reflectancia es la razón de la luz reflejada respecto a la luz incidente; a diferencia de la transmitancia que es la razón de la luz transmitida respecto a la luz incidente. También puede mencionarse a la absortancia que es la razón de la luz absorbida respecto a la luz incidente. El adjetivo espectral alude a la energía del espectro electromagnética (Chuvieco, 1990).

### Vegetación

Conjunto que resulta de la disposición en el espacio de los diferentes tipos vegetales presentes en una porción cualquiera del territorio geográfico. Su estudio conlleva el tratamiento de las comunidades vegetales (Mateucci y Colma, 1982).

### Vertiente

El término vertiente, designa algunos pequeños elementos o porciones de la superficie terrestre que se inclina respecto a la horizontal. Se extienden desde las divisorias y cumbre hasta los fondos de valle. Adoptan las formas de sistemas de drenajes en los que el flujo de escorrentía converge a los ríos (Strahler, 1974, p. 429)

## **2.3 HIPÓTESIS**

La presente investigación sobre la variación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en relación con la gradiente altitudinal en las lomas de Atocongo (Lima – Perú) ha tenido las hipótesis siguientes:

Un incremento en la altitud determina una mayor cobertura vegetal, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal.

El aumento de la cobertura vegetal determina el incremento de la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática lineal.

Un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal.

## **2.4 VARIABLES**

En el presente estudio las variables consideradas fueron:

Cobertura vegetal

Nivel altitudinal

Reflectancia espectral de la vegetación

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se describe la metodología de investigación científica empleada en la Tesis, con especial énfasis en el diseño de la investigación, la población y muestra, las técnicas, instrumentos y la recolección de datos.

### 3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1.1 Enfoque de la investigación

La presente Tesis ha empleado el enfoque cuantitativo, si atendemos a Hernández et al. (2010), quien hace referencia a la existencia de los enfoques cualitativo, mixto y cuantitativo en la investigación. Señala este autor que "el enfoque cuantitativo usa la recolección de datos para probar hipótesis, sobre la base de la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer patrones de comportamiento de la variable y probar teorías" (p.4). Sobre el particular, Tovar (2008), hace mención a estrategias cuantitativas y cualitativas, evitando el uso de los términos 'enfoque cuantitativo' o 'cuantitativo'.

A decir de Hernández et al. (2010), el enfoque cuantitativo se fundamenta en el método hipotético-deductivo, considerando las siguientes premisas: (1) delinea teorías y de ellas deriva hipótesis; (2) las hipótesis se someten a prueba utilizando los diseños de investigación apropiados; (3) si los resultados corroboran las hipótesis o son consistentes se aporta evidencia en su favor; si las refutan, se descartan en busca de mejores explicaciones e hipótesis. La investigación en la presente Tesis ha empleado el método hipotético – deductivo.

Tam, Vera y Oliveros (2008), proponen cuatro tipos de investigación sobre la base de un criterio de utilidad, a saber: básica, estratégica, aplicada y adaptativa. En atención a esta propuesta, la investigación realizada en la presente Tesis puede clasificarse como básica, dado que este tipo de investigación "tiene como objetivo mejorar los

conocimientos *per se*, más que generar resultados o tecnología que beneficien a la sociedad en el futuro” (p. 146).

Piscoya (1995), clasifica la investigación científica en teórica y tecnológica. La primera puede subdividirse en dos grupos: investigación científica teórica - empírica e investigación científica teórica - conceptual. Desde esta categorización la investigación realizada, en la presente Tesis, corresponde a una investigación teórica - empírica, pues trata sobre fenómenos físicos (no conceptuales, lógicos o matemáticos).

El mismo autor plantea tres niveles de conocimiento científico, en la medida de la organización lógica del conocimiento: (1) clasificadorio o taxonómico, (2) de relaciones de funcionalidad y (3) el teórico. En el primer nivel se establecen semejanzas y diferencias entre los objetos estudiados, sobre la base de la comparación, sin precisar las relaciones internas entre ellos; por lo que no permiten explicar o predecir comportamientos. El segundo nivel considera comparaciones sobre la base de la alguna función matemática (medición) e informa sobre ciertas leyes o regularidades en el mundo, para predecir ciertos eventos a partir de otros. El tercer nivel es el que corresponde a las teorías científicas, las cuales constituyen un sistema hipotético deductivo de enunciados, proposiciones o leyes científicas (Piscoya, 1995).

Atendiendo a Piscoya (1995), la investigación realizada como parte de la presente Tesis es una investigación teórica y corresponde al nivel de una investigación de relaciones de funcionalidad.

### **3.1.2 Tipos de investigación**

Indica, Supo (2012), que los tipos de investigación pueden clasificarse según la intervención del investigador (observacional o experimental), según la planificación de la toma de datos (prospectivos o retrospectivos), según el número de ocasiones en que se mide la variable de estudio (transversal o longitudinal) y según el número de variables de interés (descriptivo o analítico).

Sobre la base de dicho planteamiento, la presente Tesis correspondió: según la intervención del investigador, a un trabajo de investigación de tipo observacional (no experimental). Según la planificación de la toma de datos fue retrospectivo (datos recogidos de registros). Según el número de ocasiones en que se mide la variable de estudio, la Tesis fue longitudinal puesto que las variables estudiadas fueron medidas más de una vez en el tiempo. Según el número de variables fue analítico y no descriptivo dado que el análisis estadístico consideró más de una variable y puso a prueba una hipótesis para establecer la asociación entre variables.

Es importante señalar que el término descriptivo (que implica una sola variable) no es sinónimo de observacional. Un estudio observacional (por tanto no experimental) puede ser analítico como es este caso (Supo, 2012, p.1)

Por otro lado, Tam et al. (2008), presenta una taxonomía bastante parecida a la de Supo (2012). Así: en el nivel exploratorio se identifican las variables relevantes en el sistema; en el descriptivo, se miden las variables relevantes; en el correlacional, se mide el grado de asociación entre dos variables; y en el causal, se mide la relación funcional causa-efecto entre una variable independiente y una variable dependiente. Bajo este criterio, la presente tesis ha desarrollado una investigación no - experimental longitudinal y causal.

En ecología los estudios son observacionales o experimentales. En el estudio observacional hay un escaso o nulo control de los factores ambientales; se detectan relaciones, procesos y patrones; se emplean múltiples escalas espaciales; aunque por otra parte se dificulta la demostración de relaciones causa-efecto y generalmente la realidad se presenta excesivamente compleja.

### **3.1.3 Niveles de investigación**

Supo (2012), elabora una taxonomía de la investigación y hace referencia a los niveles de investigación exploratorio, descriptivo, relacional, explicativo, predictivo y aplicativo. Para este autor, los niveles de la investigación están en concordancia con la línea de investigación, con el análisis estadístico y con los objetivos estadísticos.

El presente trabajo de investigación ha sido realizado en el nivel explicativo. Este nivel se caracteriza por pretender demostrar relaciones de causalidad entre variables independientes y dependientes, en las que pueden participar un conjunto de variables intervinientes (coordinadas geográficas en este estudio), con el fin de esclarecer la relación entre la variable independiente y la variable dependiente.

El primer principio para demostrar causalidad es encontrar una relación entre la variable independiente y la variable dependiente, que no sea aleatoria, que no se deba a la casualidad, sino que realmente una esté produciendo la otra. El análisis estadístico buscará descartar las asociaciones aleatorias, casuales o espurias, respecto de las verdaderas asociaciones (Supo, 2012).

Atendiendo a lo señalado, la presente Tesis tuvo un nivel explicativo pues se procuró determinar alguna dependencia entre las variables cobertura vegetal y NDVI, con relación a la altitud, a fin de establecer relaciones de causa y efecto.

La teoría ecológica para explicar las relaciones de las variables mencionadas fue el análisis directo de gradientes. Señala Shimwell (1972), que el análisis de gradientes es simplemente el estudio de los patrones espaciales, que presenta la vegetación en relación con tres tipos de variables: factores ambientales; composición y estructura de la población; y composición y estructura de la comunidad.

### **3.1.4 Diseño de investigación**

El diseño de la investigación es “la estrategia metodológica y estadística formulada para atender el objetivo de investigación” (Supo, 2010, p.3). Las hipótesis se someten a prueba utilizando los diseños de investigación apropiados (Hernández et al., 2010). Habrá tantos diseños como ideas de investigación se proponga y ellos siempre dependerán del campo del conocimiento (Supo, 2010).

Tam et al. (2008), hace referencia a dos métodos de investigación, el experimental y el no – experimental; y con un criterio similar, Hernández et ál. (2010), diferencia los diseños experimentales y no experimentales. Atendiendo a la clasificación de los autores mencionados, líneas arriba, la presente Tesis ha empleado un método no – experimental; es decir, un método observacional.

Supo (2012), explica que los diseños de investigación pueden corresponder a cuatro tipos básicos: epidemiológicos (proviene de las ciencias de la salud), experimentales (proviene de las ciencias naturales), estudios poblacionales o comunitarios (proviene de las ciencias sociales) y validación de instrumentos (proviene de las ciencias del comportamiento). Atendiendo a este autor, la presente tesis ha empleado una estrategia del tipo de estudios poblacionales o comunitarios (estrategia no experimental).

### **3.1.5 Acerca de la unidad de estudio**

En la investigación es importante precisar las unidades de estudio, observación, análisis, muestreo e información. A continuación una precisión sobre este tema.

La unidad de estudio es la entidad que va ser objeto de medición. Ella presenta el problema que genera la línea de investigación del investigador y siempre es la misma a lo largo de la mencionada línea; y contiene, además, a la variable de estudio y todas las variables analíticas.

La unidad de observación es la unidad dimensional para evaluar las variables de estudio y se corresponde con ellas. La unidad de análisis es la porción indivisible de la unidad de observación. La unidad de muestreo es la entidad (en caso se considere el muestreo) que se somete al proceso de aleatorización. La unidad experimental es la entidad que sufre variación por la intervención del investigador. La unidad de información corresponde a las fuentes de información como documentos e informes y brinda información, directa o indirecta.

Para el caso de la presente investigación se anota a continuación lo concerniente a sus unidades de estudio, observación, análisis, muestreo e información.

Línea de investigación: ecología de lomas

Unidad de estudio: lomas

Unidad de información: informes de monitoreos biológicos

Unidad de observación: plantas de lomas

Unidad de análisis: diámetro de la copa de la planta, localización altitudinal de las plantas, nivel de reflectancia espectral obtenido de la correspondiente imagen de satélite

Unidad de muestreo: transecto lineal de 30 m

Unidad de experimentación: no cuenta con unidad experimental

### **3.1.6 Acerca del enunciado del estudio**

El enunciado del estudio expresa la intencionalidad de la investigación sintetizándola en términos muy concretos y precisos. Contiene cinco elementos: propósito del estudio, las variables analíticas, la unidad de estudio, la delimitación espacial y la delimitación temporal (Supo 2012).

Para el caso de la presente investigación el enunciado fue el siguiente: determinar la influencia de la altitud en la cobertura vegetal de lomas de Atocongo, expresando la relación mediante funciones matemáticas, a partir del NDVI, con el fin de aportar al diagnóstico ecológico de lomas y al desarrollo de aplicaciones de imágenes de satélite en el estudio de lomas.

Se anota a continuación los elementos del enunciado del estudio:

Propósito del estudio: evidenciar la influencia de la altitud en la cobertura vegetal de lomas de Atocongo, expresando la relación mediante funciones matemáticas, a partir del NDVI

Variables analíticas: altitud, cobertura vegetal, NDVI

Unidad de estudio: lomas

Delimitación espacial: lomas de Atocongo (Lima – Perú)

Delimitación temporal: periodo 2000-2002, 2007, 2011

### **3.1.7 Acerca de la delimitación del estudio**

El alcance o delimitación del estudio implica establecer los límites dentro del cual las conclusiones del estudio se consideran válidas. El propio enunciado estableció esta delimitación e incluyó incluso una delimitación espacial (lomas de Atocongo, Lima – Perú) y temporal para las conclusiones (periodo 2000-2002, 2007, 2011)

En cuanto a la delimitación espacial puede agregarse además que el presente estudio fue realizado a la escala cartográfica de 1:10 000. Definir la escala espacial es muy importante pues dependiendo de la escala de observación, los procesos pueden aparecer homogéneos en escalas de detalle y heterogéneos en escalas panorámicas. Además, diferentes procesos espaciales actúan en diferentes escalas y la interpretación realizada a una escala puede no ser apropiada a otra escala. (Lam y Quattrochi, 1992)

También fue conveniente localizar el estudio dentro del campo y áreas del conocimiento científico, que se correspondan con la línea de investigación, el marco teórico y las variables estudiadas; que a continuación se anotan:

Campo del conocimiento: ciencias naturales

Área general de conocimiento: ciencias ecológicas

Área específica: ecología de comunidades

Línea de investigación: ecología de lomas

Marco teórico: principios del análisis directo de gradientes ambientales

Antecedentes investigativos: no existen estudios similares para lomas de Atocongo

VARIABLES DEL ESTUDIO: altitud, cobertura vegetal, NDVI

### 3.1.8 Tablas de operacionalización de variables

#### Definición de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
Nivel altitudinal	Altura de un punto de la tierra con relación al nivel del mar (Salvat, 2004). Brack (1986) incluye a la altitud como factor geográfico juntamente con la latitud.	<u>Altitud</u> Altura de un punto con relación al nivel del mar expresado en metros sobre el nivel del mar (msnm)
Cobertura vegetal	Cobertura vegetal es la proporción del área ocupada por una proyección perpendicular de las partes aéreas de las plantas. (Brower et ál. 1990).	<u>Porcentaje de índice de cobertura vegetal</u> Relación porcentual entre la sumatoria total de las longitudes de intercepción de copa de todas las plantas de la muestra y la longitud total de la muestra de intercepción lineal
Reflectancia espectral de la vegetación	La reflectancia es la razón de la luz reflejada respecto a la luz incidente. Esta energía reflejada es captada por el sensor como una radiancia y registrada como nivel digital (ND) en la imagen de satélite.  El adjetivo espectral alude a la energía del espectro electromagnético.  Para cada valor del espectro electromagnético los diferentes tipos de vegetación presentan respuestas de reflectancia espectral propias de su constitución natural, las cuales constituyen su firma espectral. (Chuvieco, 1990).	<u>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)</u>  Cociente de la diferencia de los niveles digitales (ND) de las bandas espectrales infrarroja y roja de la imagen de satélite entre la sumatoria de los niveles digitales (ND) de las mismas bandas espectrales

#### Dimensiones y atributos de las variables

Variables	Indicadores	Unidades	Escala
Nivel altitudinal (variable objetiva unidimensional)	Metros sobre el nivel del mar	Metros (m)	Cociente (magnitud extensional)
Cobertura vegetal (variable objetiva unidimensional)	Porcentaje de índice de cobertura vegetal	Porcentaje (%)	Cociente (magnitud extensional)
Reflectancia espectral de la vegetación (variable objetiva multidimensional)	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	Valor numérico (0 a 1)	Intervalo (magnitud intensional)

## Consistencia entre la pregunta general de investigación, objetivos, hipótesis, variables e indicadores

Problema u oportunidad de investigación	Pregunta general derivada del problema u oportunidad	Objetivo general	Objetivos específicos	Hipótesis	Variables	Indicadores
La altitud es un factor físico-geográfico que influye directa o indirectamente sobre los componentes biológicos de las lomas.	¿Será que la cobertura vegetal de las lomas de Atocongo presenta un comportamiento asociado al nivel altitudinal, que puede ser expresado mediante funciones matemáticas o curvas típicas de Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)?	Determinar la influencia de la altitud en la cobertura vegetal de lomas de Atocongo, expresando la relación mediante funciones matemáticas, a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), con el fin de aportar al diagnóstico ecológico de lomas y al desarrollo de aplicaciones de imágenes de satélite en el estudio de lomas.	Evidenciar funciones matemáticas que relacionen la altitud y la cobertura vegetal.	Un incremento en la altitud determina una mayor cobertura vegetal, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal.	Nivel altitudinal	Metros sobre el nivel del mar
La reflectancia espectral estimadas mediante imágenes de satélite mide atributos de la cobertura vegetal.		Evidenciar funciones matemáticas que relacionen la cobertura vegetal y la reflectancia espectral expresada como NDVI.	El aumento de la cobertura vegetal determina el incremento de la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática lineal.	Cobertura vegetal	Porcentaje de índice de cobertura vegetal	
No se tienen estudios que midan o evalúen el grado de influencia de la altitud sobre la cobertura vegetal, y relacionen las variables altitud, cobertura vegetal y reflectancia espectral en las lomas		Evidenciar funciones matemáticas que relacionen la altitud y la reflectancia espectral expresada como NDVI.	Un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal.	Cobertura vegetal	Porcentaje de índice de cobertura vegetal	
				Reflectancia espectral de la vegetación	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	
					Nivel altitudinal	Metros sobre el nivel del mar
					Reflectancia espectral de la vegetación	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

## Consistencia entre las hipótesis y los instrumentos de colecta de datos

Hipótesis	Variables	Indicadores	Unidades de análisis	Fuentes de información	Técnicas de investigación	Instrumentos de colecta de datos
Un incremento en la altitud determina una mayor cobertura vegetal, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal	Nivel altitudinal	Metros sobre el nivel del mar	Laderas de lomas	Curvas a nivel en formato digital	Observación de campo y gabinete, Muestreo	Ficha de relevamiento de muestras
	Cobertura vegetal	Porcentaje de índice de cobertura vegetal	Vegetación de lomas	Registro de inventario de vegetación	Observación de campo Reconocimiento de sitio de inventario	Ficha de reconocimiento
El aumento de la cobertura vegetal determina el incremento de la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática lineal	Cobertura vegetal	Porcentaje de índice cobertura vegetal	Vegetación de lomas	Registros de inventario de vegetación	Observación de campo Reconocimiento de sitio de inventario	Ficha de reconocimiento
	Reflectancia espectral de la vegetación	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	Niveles digitales (ND) de imágenes de satélite	Imágenes de satélite en formato digital	Observación de campo y laboratorio, Muestreo	Ficha de relevamiento de muestras
Un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal	Nivel altitudinal	Metros sobre el nivel del mar	Laderas de lomas	Curvas a nivel en formato digital	Observación de campo y laboratorio, Muestreo	Ficha de relevamiento de muestras
	Reflectancia espectral de la vegetación	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	Niveles digitales (ND) de imágenes de satélite	Imágenes de satélite en formato digital	Observación de campo y laboratorio, Muestreo	Ficha de relevamiento de muestras

## **3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA**

### **3.2.1 Población**

La población estadística es el conjunto finito o infinito de elementos sobre los cuales se realizan las observaciones. En el caso del presente estudio la población estuvo conformada por las plantas de las lomas de Atocongo. Ellas constituyeron la unidad de observación.

Los diámetros de copa de las plantas en la línea del transecto establecido fueron medidos, registrándose también la altitud del transecto en su punto central. Se obtuvo además en gabinete el NDVI del referido punto a partir de una imagen de satélite. Estos datos conformaron las unidades de análisis del estudio.

Los datos utilizados en el presente estudio retrospectivo fueron proporcionados por UNACEM S.A. Dicha empresa envía oficialmente a la autoridad ambiental, tal información, como parte de sus compromiso de monitoreo biológico de lomas en su área de influencia.

### **3.2.2 Diseño Muestral**

El diseño muestral comprende todos los procedimientos y aspectos relacionados con la obtención de una muestra representativa de la población; así como, con la decisión sobre la forma de inferir los resultados poblacionales y proporcionar una medida de la precisión de las estimaciones.

Los métodos de muestreo pueden ser probabilísticos (muestreo aleatorio simple, muestreo estratificado, muestreo sistemático, muestreo polietápico o por conglomerados) o no probabilísticos (de conveniencia, juicios o por cuotas de bola de nieve discrecional). Estos métodos deben ser insesgados, consistentes, eficientes y suficientes.

Dado que la presente tesis fue de tipo retrospectivo no tuvo control sobre el diseño muestral y colecta de la información. Luego de la revisión de las unidades o fuentes de información (los informes de monitoreo biológico del 2002-2002, 2007 y 2011) se pudo anotar que los datos provienen de un muestreo aleatorio. La localización de las

muestras no siguió algún criterio de estratificación para controlar gradientes o anisotropía de los datos.

El número de muestras varió entre 10 y 13 por evaluación (época seca y húmeda). El transecto de intercepción lineal fue el tipo de muestreo para registrar los valores de cobertura vegetal. Sobre una línea de 30 m dispuesta sobre el terreno, transversalmente a la pendiente, todos los diámetros de copas de las plantas interceptadas por el transecto lineal fueron medidos. Todos los valores obtenidos se sumaron y luego se dividieron entre 30 m para luego ser expresados en porcentaje, obteniéndose así el denominado índice de cobertura lineal.

Para el caso del análisis del NDVI, la presente Tesis consideró un transecto lineal dispuesto sobre la imagen de satélite. Desde las cotas altitudinales más bajas (150 msnm) se localizaron transectos que se extendieron a lo largo de la gradiente altitudinal siguiendo el fondo de valle, hasta la cima de las laderas (generalmente sobre los 500 msnm). En cada transecto o gradiente altitudinal se registró información de NDVI cada 10 m de altitud. Se considero un transecto por cada quebrada (Q. Lúcumo, Q. Verde, Q. Guayabo y Q. Puquio. Esta información no se encontró en los informes de monitoreo biológico y fue expresamente generada para el presente estudio.

### **3.2.3 RELACIÓN ENTRE VARIABLES**

El estudio relacionó la altitud y la cobertura vegetal, la altitud y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la cobertura y el NDVI, mediante la regresión lineal y curvilínea, los modelos lineales generalizados (GLM), los modelos aditivos generalizados (GAM) y el test de Mantel.

El modelo teórico propuesto para la relación de cobertura vegetal versus NDVI fue lineal. En cambio, para las otras dos relaciones, altitud vs cobertura vegetal y altitud vs NDVI el modelo teórico planteado fue unimodal. Estas asunciones se sustentan en la teoría de análisis de gradientes, expuesta en el capítulo 2.

Modelos GLM y GAM

Una alternativa a la transformación de la variable respuesta cuando falta normalidad en los datos y se desea utilizar regresiones lineales o curvilíneas es el uso de los modelos lineales generalizados (GLM) y modelos aditivos generalizados (GAM). Dichos modelos son una extensión de los modelos lineales y permiten utilizar distribuciones no normales de los errores (como por ejemplo binomiales, poisson, gamma, etcétera) y varianzas no constantes.

Para los casos en los que la relación entre la variable respuesta y la variable independiente no son lineales, los GLM y GAM incluyen una función de vínculo para linealizar la relación entre la variable respuesta y la variable independiente, tales como identidad, recíproca, logarítmica, logit, etcétera.

Para conocer la significación y grado de ajuste de los modelos generalizados es conveniente acudir a la devianza, el AIC (criterio de información de Akaike) y el p-valor.

Para efectos de las pruebas de hipótesis de la presente investigación, el modelo hipotético (MH) o modelo ideal debe tener una alta devianza, un p-valor menor que 0.05, un AIC bajo, ser cuadrático, con distribución gamma y función de enlace logarítmica y forma unimodal.

### Devianza

Es como una medida de error en los modelos lineales generalizados; representa la cantidad de varianza explicada por el modelo y proporciona una idea de la variabilidad de los datos. La devianza reemplaza el concepto de suma residual de cuadrados.

Para obtener una medida de la variabilidad explicada por el modelo se compara la devianza del modelo nulo con la devianza residual. Con ambos valores se puede calcular el  $D^2$  que es un valor porcentual de la diferencia de las devianzas del modelo nulo y residual con respecto al modelo nulo. Cuanto mayor es este porcentaje mayor es el ajuste del modelo a los datos.

### Criterio de Información de Akaike (AIC)

Es un índice que evalúa tanto el ajuste del modelo a los datos como la complejidad del modelo. Cuanto más pequeño es el AIC mejor es el ajuste. El AIC es muy útil para comparar modelos similares con distintos grados de complejidad o modelos iguales (mismas variables) pero con funciones de vínculo distintas. El AIC no proporciona una prueba de un modelo en el sentido de probar una hipótesis nula, es decir el AIC no dice nada acerca de la calidad del modelo.

### Test de Mantel

Se empleó el test de Mantel para evaluar la relación entre la cobertura vegetal y el NDVI. Se decidió emplear el referido test con el fin de comprobar la posible confusión que puede generar la variable distancia o ubicación geográfica y la altitud en la relación cobertura vegetal y NDVI. Dicho test estima el grado de correlación existente entre dos matrices, frente a una tercera matriz.

## **3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS**

Dado que la investigación fue de tipo retrospectivo las técnicas fueron de orden estadístico y los instrumentos, del tipo lógico o documental, atendiendo a Supo (2012).

### **3.3.1 Pruebas de normalidad de datos**

Como es práctica establecida en el análisis estadístico se inició la evaluación exploratoria revisando la normalidad de los datos. Se empleó la prueba de Shapiro – Wilk; y complementariamente las pruebas de Anderson – Darling, Lilliefors y Jarque - Bera.

### **3.3.2 Pruebas de independencia de datos**

Una de las exigencias del modelo de regresión lineal, además de la normalidad de los datos, es la independencia de los datos. Para atender esta premisa se aplicó una prueba de rachas para una muestra.

### **3.3.3 Pruebas de autocorrelación espacial**

La autocorrelación espacial se evaluó a partir del Índice de Moran y el Coeficiente de Geary. Se elaboraron los respectivos correlogramas para determinar el alcance u horizonte de autocorrelación. Se empleó el programa informático PASSaGE desarrollado por Rosenberg y Anderson (2011). Cuando fue necesario se empleó la prueba de tendencia de Mann-Kendall, a partir del programa informático XLSTAT.

### **3.3.4 Pruebas de anisotropía de datos**

Para evaluar la anisotropía de datos se empleó el programa informático PASSaGE y la técnica de correlación angular propuesto por Simon, 1997, citado por Rosenberg (2011). Este programa reporta el valor del “r” máximo, el ángulo de máxima correlación y los p valores.

### **3.3.5 Pruebas de exploración de datos y comparación de muestras**

Se empleó la prueba de Kruskal Wallis para comparar juegos de datos; también el análisis de componentes principales y el escalamiento multidimensional para apoyar la interpretación de resultados. Estas pruebas se realizaron con aplicación del programa informático XLSTAT.

Se incluyó la comparación por pares de acuerdo con Conover e Iman (1979) para los juegos de datos de cobertura vegetal para los episodios El Niño y La Niña.

### **3.3.6 Modelamiento de datos**

Se considero las opciones que ofrece el programa informático Canoco para el análisis de los modelos lineales generalizados (GLM) y modelos aditivos generalizados (GAM). El test de Mantel fue obtenido a partir del programa informático XLTAT.

Para la representación espacial de los resultados, en formato vectorial, se empleo el programa informático Arc View y su módulo Image Analysis para el procesamiento de imágenes. Para las estimaciones geoestadísticas se empleo el modulo respectivo del programa Arc Gis.

## **3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS**

### **3.4.1 Localización del área de estudio**

El área de estudio se localizó entre los distritos de Villa María del Triunfo y Pachacamac (Lima Metropolitana – Perú), en el lugar dominado por los cerros Atocongo y Lúcumo. Se presenta allí la vegetación natural arbustiva conocida como “lomas”. Geográficamente el área corresponde a una extensión cuadrada de 1 200 x 1 200 m, localizada en coordenadas UTM 293 372 y 294 615 Easting; 8 650 536 y 8 649 292 Northing. El relieve es colinoso con altitudes entre 150 y 585 msnm. Los materiales que se emplearon fueron imágenes de satélite, cartas nacionales a escala 1:10 000 y 1:25 000, información de inventarios de vegetación y fichas de reconocimiento de campo.

### **3.4.2 Selección de imágenes de satélite**

En la búsqueda especializada se localizó una imagen SPOT del 30 de noviembre del 1998, con 20 m de resolución espacial, una IKONOS, del 10 de marzo del 2002, de 1 m de resolución espacial (composición de las bandas del pancromático y multiespectrales), una imagen ASTER del 03 de marzo del 2001, de 15 m de resolución, y una imagen WORLD VIEW del 10 de marzo del año 2011 de 0.5 m de resolución espacial.

### **3.4.3 Selección de los inventarios de vegetación**

Dada la naturaleza retrospectiva de la presente investigación hubo necesidad de considerar especial cuidado en la selección de los inventarios de vegetación. Para las lomas de Atocongo se cuenta con inventarios de vegetación desde el año 1999 hasta la actualidad (como parte del monitoreo ambiental de la Empresa UNACEM S.A. localizada en Atocongo). Para el presente estudio, se seleccionaron los inventarios de vegetación de los años, lo más cercano posible, a las fechas de las imágenes de satélite. Así, para el área específica de estudio se eligieron los inventarios de los años 2000, 2001 y 2002; y para tener una descripción más actualizada se eligieron los inventarios del 2007 y 2011.

### **3.4.4 Obtención de los NDVI**

Para obtener los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), se usó técnicas de interpretación de imágenes de satélite. Se seleccionaron imágenes pertinentes. Las imágenes seleccionadas recibieron un pre-procesamiento digital con fines de su corrección geométrica y radiométrica. Para la corrección radiométrica se emplearon preferentemente las técnicas de corrección del histograma por sus valores mínimos. Una corrección radiométrica modifica los valores digitales con el objeto de acercarlos al ideal sin las distorsiones de la atmósfera y algún mal funcionamiento del sensor. Referente a la corrección geométrica, se seleccionarán puntos de control, se aplicó una función de primer grado y una convolución cúbica. La corrección geométrica estuvo destinada a conseguir que las posiciones de los píxeles estén referenciados cartográficamente y puedan superponerse sobre mapas convencionales.

Luego de este proceso se obtuvo una imagen del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) mediante el módulo “Image Análisis” del programa informático Arc View. Se superpuso la imagen sobre la carta topográfica (altimétrica) para obtener los datos de altitud e índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

### **3.4.5 Obtención de las series espaciales e isolíneas**

Para los propósitos del análisis de gradiente altitudinal del presente estudio se obtuvo series de datos espaciales de NDVI, tomando los valores en la intersección de una línea de gradiente con las curvas de nivel sobrepuestas sobre la imagen NDVI. Estas gradientes correspondían a transectos que siguieron la orientación del fondo de cada quebrada evaluada.

Las quebradas contempladas fueron: Lúcumo, Verde, Guayabo y Puquio, para todas las imágenes seleccionadas SPOT, IKONOS, ASTER y WORLVIEW.

Para obtener las isolíneas se siguió los procedimientos estándar, que implica elaborar una malla de cuadrículas o grilla, sobreponer sobre la imagen de NDVI y paso seguido extraer la información de NDVI en los puntos de la malla. Con el set de puntos obtenidos, con sus respectivas ubicaciones geográficas, se interpola usando el inverso de la distancia.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se presentan los resultados y análisis de las interrelaciones entre la altitud, la cobertura vegetal y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

### 4.1 RESULTADOS

#### 4.1.1 Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos consideró las pruebas de normalidad e independencia de datos, autocorrelación espacial, análisis de anisotropía y análisis de tendencia.

##### Selección de datos

Dada la naturaleza retrospectiva de la presente investigación hubo necesidad de considerar especial cuidado en la selección de los inventarios de vegetación e imágenes de satélite. Para el lugar de estudio se dispone de inventarios anuales de vegetación, con registros desde hace más de una década, por lo mismo, ello no fue una restricción. En cambio, la consecución de imágenes de satélite, pertinentes para el estudio, si constituyó una dificultad, sobre todo por qué las lomas de Atocongo permanecen cubiertas de nubes, total o parcialmente, durante el invierno, estación en la que presentan su mejor desarrollo. Tal limitación imposibilita la disposición de imágenes factibles (sin cobertura de nubes) para atender una investigación sobre el comportamiento de la cobertura vegetal y su NDVI, en la época en que las lomas presentan su mayor cobertura vegetal.

Referente a las imágenes de satélite, para la época invernal, periodo en el cual la cobertura vegetal es máxima debido al desarrollo de las plantas estacionales que aprovechan la mayor humedad de esta estación, se contó con una imagen SPOT, con resolución espacial de 20 m, del 30 de noviembre de 1998. En dicho año la cobertura vegetal de lomas alcanzó un desarrollo extraordinario por ello es clave dicha fecha

para realizar estudios retrospectivos sobre las lomas de Atocongo. Cano et al. (1999) señala que «la ocurrencia de un evento “El Niño” como el 1997-98, genera condiciones de alta humedad e inclusive de precipitación, favoreciendo el desarrollo de un periodo de “lomas” en el verano.

Como se anotó, debido a la permanente neblina y nubes que cubren las lomas en invierno, son escasas las imágenes aptas en esta estación. En cambio, para la época de verano es menos restrictiva la posibilidad de contar con imágenes de satélite dada las mejores condiciones climáticas (menor presencia de nubes). Solo la ausencia de un registro histórico de imágenes se convierte en un escollo, puesto que la captura de una imagen de alta resolución no es automática; se hace por encargo, previo pago del servicio.

En resumen, no se cuenta con imágenes de satélite de los meses y años que se desee o necesite, sino que se está supeditado a la eventual programación del satélite. Es poco probable que exista un registro abundante de imágenes de alta resolución, para las lomas, en época invernal, debido a la presencia de nubes.

A pesar de los inconvenientes señalados se localizó una imagen IKONOS, del 10 de marzo del 2002, de 1 m de resolución espacial (composición de las bandas del pancromático y multiespectrales), una imagen ASTER del 03 de marzo del 2001, de 15 m de resolución, y una imagen WORLD VIEW del 10 de marzo del año 2011 de 0.5 m de resolución espacial.

A partir de cada imagen seleccionada se obtuvo los índices de diferencia normalizada (NDVI) de acuerdo con la metodología estándar, que se describe en el Capítulo III Metodología de la Investigación.

Con relación a los inventarios de vegetación, para las lomas de Atocongo se cuenta con inventarios desde el año 1999 hasta la actualidad, como parte del monitoreo ambiental de la Empresa UNACEM S.A. en su área de operaciones localizada en Atocongo. Para el presente estudio, se seleccionaron los inventarios de vegetación de los años correspondientes o cercanos a las fechas de las imágenes de satélite. Así, para el área específica de estudio se consiguieron inventarios de setiembre del 2000; abril y setiembre del 2001, junio, octubre y diciembre del 2002, setiembre y

diciembre del 2007 y enero del 2011. No se consideró el inventario de 1999 pues sus puntos de muestreo quedaban fuera del área específica de estudio.

#### Inventario de vegetación de setiembre del 2000

Entre el 23 y el 30 de setiembre del año 2000 se efectuó una evaluación biológica en la zona de Atocongo, a cargo de Walsh Perú S.A. (empresa de consultoría ambiental), como parte de un estudio de impacto ambiental encargado por UNACEM S.A. Este estudio evaluó solo la época húmeda, por lo mismo no se dispone de datos de vegetación de la época seca para el área de estudio, en dicho año.

Arana (2000), científico responsable del estudio mencionado, anotó que la evaluación consideró 14 transectos de 30 x 2 m, cada uno dividido en tres parcelas de 10 x 2 m. En cada transecto se registraron las especies, así como la abundancia, frecuencia y cobertura (por intersección del eje medio) para el caso de arbustos; en el caso de las herbáceas, además de las especies, solo se consideraron la cobertura y frecuencia. También, se colectaron ejemplares botánicos de todas las especies de plantas vasculares, las cuales fueron herborizadas e identificadas en el Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

## Transectos del sector Atocongo, setiembre 2000

Transectos	Easting	Northing	Fecha	Altitud (m)	Especies	H'	J	Cobertura %	Tipo de vegetación
TV-AT-3	294442	8650697	23/set	500	14	2.09	0.55	79.3	Croton
TV-AT-4	294730	8650880	23/set	490	18	2.6	0.62	83	Ophyosporus
TV-AT-5	295123	8650940	23/set	400	21	3.14	0.71	94.1	Ophyosporus
TV-AT-7	295325	8650966	24/set	310	23	3.26	0.72	63.6	Ophyosporus y Senna
TV-AT-8	295876	8650613	24/set	360	20	2.84	0.66	81.98	Croton
TV-AT-9	293650	8649800	30/set	180	14	1.82	0.48	50.5	Trixis
TV-AT-10	294070	8650181	30/set	290	24	3.65	0.8	61.7	Croton
TV-AT-11	294251	8650402	30/set	400	23	3.3	0.73	54.63	Croton

Fuente: Arana, César (2000). Evaluación de la Vegetación del Sector Atocongo. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A.

Lima, SNT

## Gradiente en Quebrada Lúcumo, setiembre de 2000

Transectos	Easting	Northing	Fecha	Altitud (m)	Especies	H'	J	Cobertura %	Tipo de vegetación
TV-AT-9	293650	8649800	30/set	180	14	1.82	0.48	50.5	Trixis
TV-AT-10	294070	8650181	30/set	290	24	3.65	0.8	61.7	Croton
TV-AT-11	294251	8650402	30/set	400	23	3.3	0.73	54.63	Croton
TV-AT-3	294442	8650697	23/set	500	14	2.09	0.55	79.3	Croton

Fuente: Arana, César (2000). Evaluación de la Vegetación del Sector Atocongo. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A.

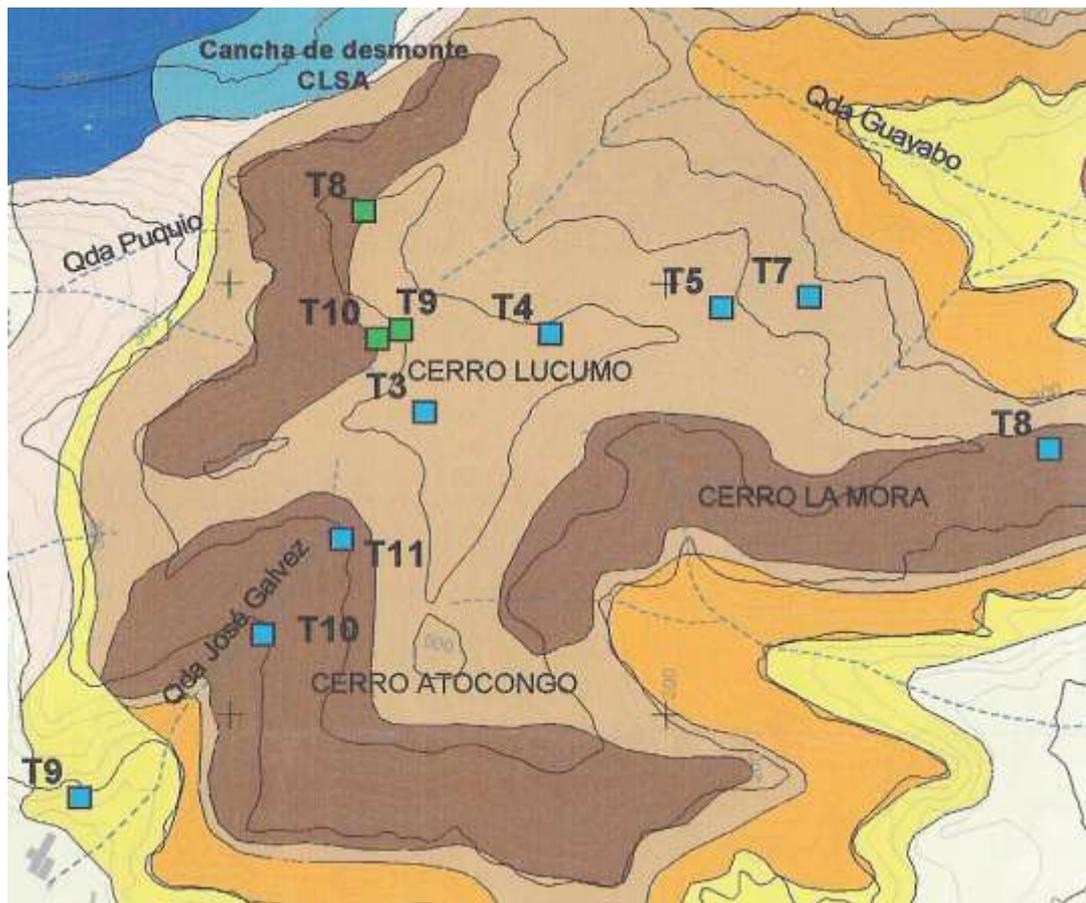
Lima, SNT

## Gradiente en Quebrada Guayabo, setiembre de 2000

Transectos	Easting	Northing	Fecha	Altitud (m)	Especies	H'	J	Cobertura %	Tipo de vegetación
TV-AT-7	295325	8650966	24/set	310	23	3.26	0.72	63.6	Ophyosporus y Senna
TV-AT-5	295123	8650940	23/set	400	21	3.14	0.71	94.1	Ophyosporus
TV-AT-4	294730	8650880	23/set	490	18	2.6	0.62	83	Ophyosporus

Fuente: Arana, César (2000). Evaluación de la Vegetación del Sector Atocongo. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A.

Lima, SNT



### Localización de los puntos de muestreo setiembre del 2000

Fuente: Walsh Perú S.A. (2001). Evaluación biológica de la zona de Atocongo. Año 2000. Proyecto IND 1078. Lima, Cementos Lima S.A. (Figura 7.1, p.8). Arana, César (2000). Evaluación de la Vegetación del Sector Atocongo. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A. Lima, SNT

Los numerales T8, T9 y T10 en simbología de cuadriláteros verdes no se ha utilizado en este estudio.

De los catorce transectos evaluados por Arana (2000), se consideraron ocho para la presente Tesis, por localizarse dentro del área de estudio. Puesto que la Tesis se proponía estudiar la gradiente altitudinal y su influencia sobre la cobertura vegetal se organizó los datos en series espaciales, obteniéndose dos gradientes, una correspondiente a la quebrada Lúcumo y otra a la quebrada Guayabo. El primero comprendió cuatro transectos, a saber, de menor a mayor altitud: TV-AT9, TV-AT10, TV-AT11 y TV-AT3; y para el caso de la quebrada Guayabo: TV-AT7, TV-AT5 y TV-AT4. A continuación se presentan un resumen de los transectos anotados

#### Inventario de vegetación de abril del año 2001

Walsh Perú S.A. realizó entre el 12 y 14 de abril del 2001 el monitoreo biológico de la zona de Atocongo, por encargo de UNACEM S.A. Arana (2001), registró en cada transecto las especies, su abundancia, frecuencia y la cobertura (por intersección del eje medio). Los transectos empleados fueron de 30 x 2 m, dividido cada uno en 3 parcelas de 10 x 2 m. Las muestras fueron herborizadas e identificadas utilizando bibliografía especializada o comparando con la colección del Herbario del Museo de Historia Natural.

El mencionado estudio dividió el área en tres zonas; cada una constituyó un estrato (muestreo estratificado al azar). En total se establecieron 40 transectos; de ellos, quince se localizaron en la zona de estudio de la presente tesis.

La Tabla 10 presenta la información correspondiente a la zona I (Cerros Lúcumo, Atocongo y La Mora), que fue de interés para la presente Tesis. Arana (2001), encontró un total de 514 individuos, con un promedio de 34 plantas por transecto. La cobertura vegetal alcanzó el 11.6%, valor bastante alto en una época seca, y la densidad total fue de 5 711 individuos por ha (Arana, 2001). Las Tablas 11 y 12 muestran series espaciales altitudinales obtenidos a partir de la Tabla 10, información original del estudio de Arana (2001)

## Transectos del sector Atocongo (zona 1), abril de 2001

Transecto	Easting	Northing	Altitud (m)	Plantas	Especies	H'	1-D	J
1	294489	8651160	470	39	5	1.60	0.61	0.69
2	294408	8651020	500	42	5	1.88	0.66	0.81
3	294947	8650835	535	20	3	0.57	0.19	0.36
4	295486	8650599	420	21	4	1.86	0.71	0.93
5	295256	8650535	400	14	4	1.69	0.64	0.84
6	295176	8650669	410	23	3	1.55	0.65	0.98
7	294517	8650616	550	48	3	0.29	0.08	0.18
8	294303	8650606	480	41	4	1.25	0.49	0.62
9	294232	8650432	400	51	7	2.11	0.72	0.75
10	294245	8650370	390	52	5	1.64	0.62	0.71
11	294192	8650230	360	25	5	0.95	0.29	0.41
12	294171	8650127	350	25	6	2.20	0.75	0.85
13	293987	8650174	300	31	5	1.86	0.67	0.80
14	295273	8650136	210	47	5	0.69	0.20	0.30
15	295074	8650187	250	35	4	1.90	0.71	0.95

Fuente: Arana, César (2001). Monitoreo de la vegetación del sector de Atocongo. Periodo seco del año 2001. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A. Lima, SNT

## Gradiente en Quebrada Lúculo, abril 2001

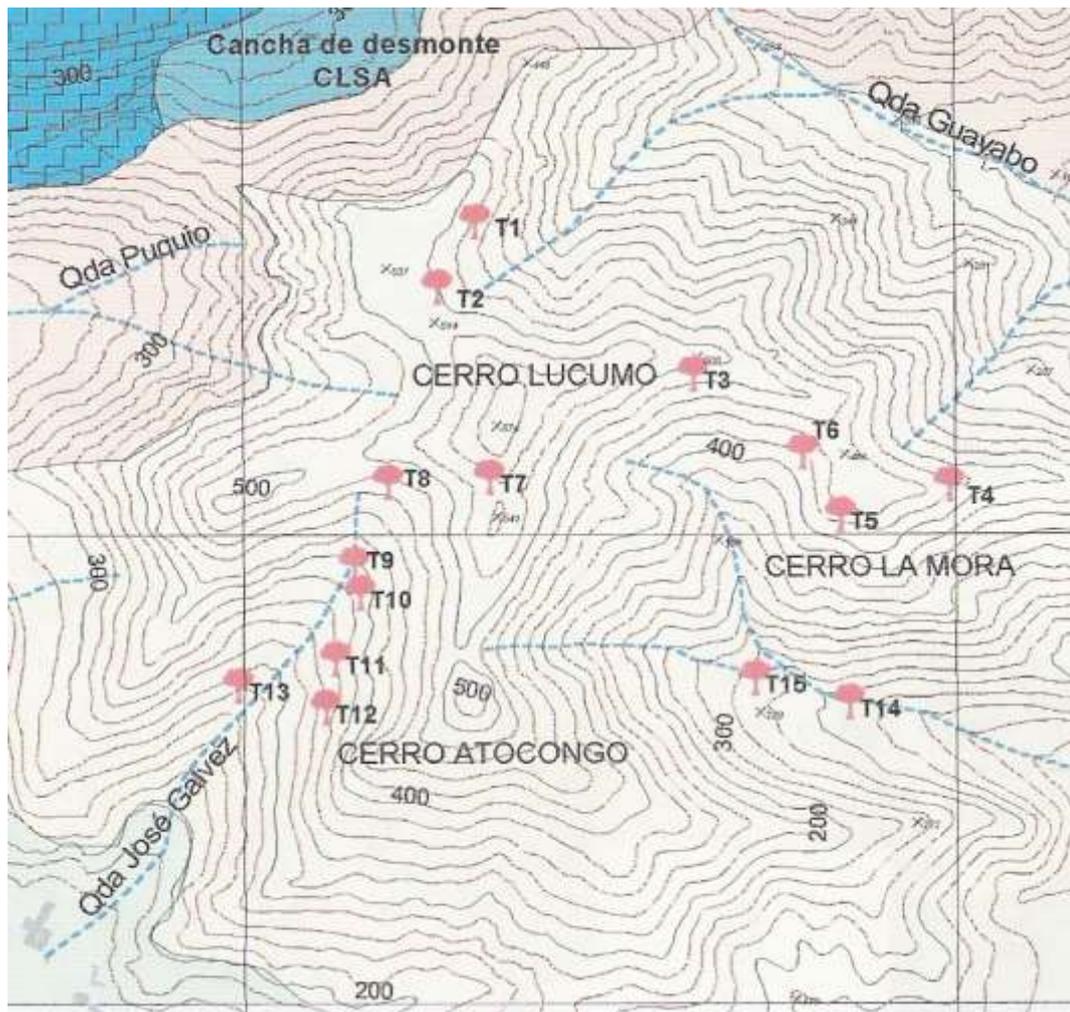
Transecto	Easting	Northing	Fecha	Altitud (m)	Especie	Plantas	H'	1-D	J
13	293987	8650174	12/04/2001	300	5	31	1.86	0.67	0.80
12	294171	8650127	12/04/2001	350	6	25	2.20	0.75	0.85
11	294192	8650230	12/04/2001	360	5	25	0.95	0.29	0.41
10	294245	8650370	12/04/2001	390	5	52	1.64	0.62	0.71
9	294232	8650432	12/04/2001	400	7	51	2.11	0.72	0.75
8	294303	8650606	12/04/2001	480	4	41	1.25	0.49	0.62
7	294517	8650616	12/04/2001	550	3	48	0.29	0.08	0.18

Adaptado de Arana, César (2001). Monitoreo de la vegetación del sector de Atocongo. Periodo seco del año 2001. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A. Lima, SNT

## Gradiente en Quebrada Verde, abril 2001

Transecto	Easting	Northing	Fecha	Altitud (m)	Especie	Plantas	H'	1-D	J
14	295273	8650136	12/04/2001	210	5	47	0.69	0.20	0.30
15	295074	8650187	12/04/2001	250	4	35	1.90	0.71	0.95
5	295256	8650535	12/04/2001	400	4	14	1.69	0.64	0.84
6	295176	8650669	12/04/2001	410	3	23	1.55	0.65	0.98
4	295486	8650599	12/04/2001	420	4	21	1.86	0.71	0.93
3	294947	8650835	12/04/2001	535	3	20	0.57	0.19	0.36

Adaptado de Arana, César (2001). Monitoreo de la vegetación del sector de Atocongo. Periodo seco del año 2001. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A. Lima, SNT



Localización de los puntos de muestreo abril 2001

Fuente: Walsh Perú S.A. (2001b). Monitoreo biológico de la zona de Atocongo. Abril 2001. Proyecto IND 1084. Lima, Walsh Perú S.A. (Mapa 2)

## Inventario de vegetación de setiembre del año 2001

Una siguiente evaluación fue realizada para la época húmeda, entre el 14 y el 18 de setiembre de 2001. Según anota Arana (2001a), el muestreo consistió en la localización y re-evaluación de los transectos antes utilizados (abril del 2001). Para toda el área de estudio se totalizó 34 transectos. El autor indicó que no todos los puntos pudieron ser localizados (al parecer por remoción de las marcas).

Al igual que los casos anteriores, cada transecto fue de 30 x 2 m, divididos en 3 parcelas de 10 x 2 m. En cada transecto se registraron las especies presentes, su abundancia, frecuencia y la cobertura (por intersección del eje medio). Adicionalmente, se registraron y en algunos casos se colectaron especies de plantas vasculares. Las muestras fueron herborizadas e identificadas en el Herbario San Marcos del Museo de Historia Natural.

Para el sector de interés de la Tesis, se seleccionaron 13 transectos, cuya información se presenta en la Tabla 13. Las Tablas 14 y 15 muestran series espaciales altitudinales obtenidas de la Tabla 13. Para este sector, Arana (2001a), anota un total de 568 individuos arbustivos, con un promedio de 80.9 plantas por transecto. Así también, un total de 72 especies de plantas vasculares, 5 especies de Liliopsidas (monocotiledóneas) y 67 de Magnoliopsidas (dicotiledóneas).

Señala Arana (2001a), que el sector se caracterizó por la marcada dominancia de la hierba rastrera *Astrephia chaerophylloides*, la cual se extiende cubriendo grandes partes del sector. Entre las especies arbustivas dominantes se puede citar a *Croton ruizianum*, *Ophryosporus pubescens*, *Tournefortia microcalyx* y *Trixis cacalioides* (Arana, 2001a).

## Transectos del sector Atocongo, setiembre de 2001

Transecto	Easting	Northing	Altitud (m)	Cobertura arbórea					Cobertura herbácea			
				S	N	H'	1-D	J	S	H'	1-D	J
1	294490	8651160	470	5	48	1.5	0.5	0.7	16	3.2	0.8	0.8
2	294405	8651020	500	4	68	1.8	0.7	0.9	16	3.0	0.8	0.8
3	294947	8650835	535	6	54	1.6	0.6	0.6	8	2.4	0.8	0.8
4	295551	8650533	370	3	53	0.8	0.3	0.5	9	2.4	0.8	0.7
5	295256	8650535	400	5	34	1.9	0.6	0.8	16	3.0	0.8	0.8
6	295200	8650660	410	7	43	2.3	0.7	0.8	10	1.9	0.6	0.6
7	294122	8650678	500	4	36	1.6	0.6	0.8	12	1.5	0.5	0.4
8	293983	8650716	450	4	13	1.1	0.4	0.6	8	1.9	0.6	0.6
9	294086	8650099	300	4	47	1.5	0.6	0.8	11	1.1	0.3	0.3
10	294065	8650006	290	6	44	1.8	0.6	0.7	13	2.3	0.7	0.6
11	293951	8649923	240	5	32	1.9	0.7	0.8	12	2.5	0.7	0.7
12	294896	8649851	380	5	51	1.8	0.7	0.8	14	2.1	0.7	0.6
13	293828	8649871	200	6	42	1.6	0.6	0.6	13	2.4	0.7	0.6

Fuente: Arana, César (2001a). Monitoreo de la vegetación del sector de Atocongo. Periodo húmedo del año 2001. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A. Lima, SNT

## Gradiente en Quebrada El Lúcumo, setiembre del 2001

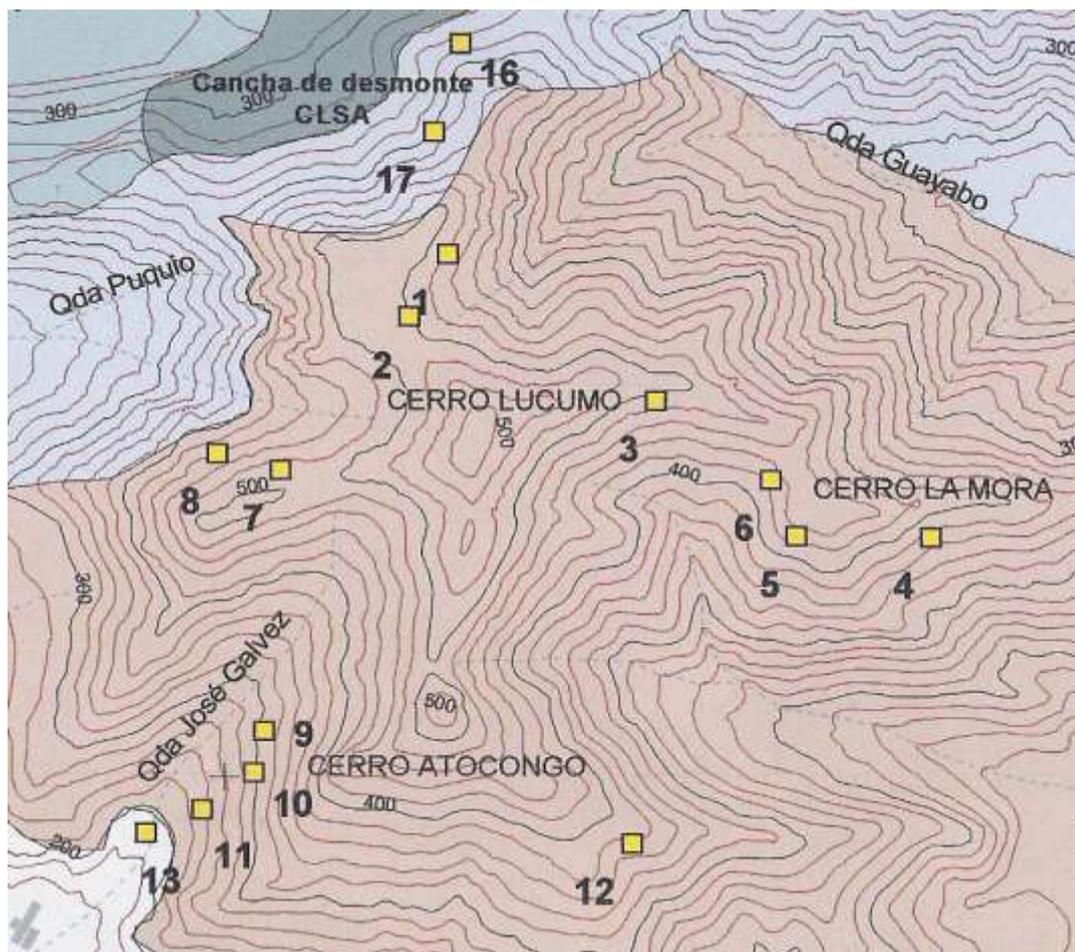
Transecto	Easting	Northing	Altitud (m)	Cobertura arbórea					Cobertura herbácea			
				S	N	H'	1-D	J	S	H'	1-D	J
13	293828	8649871	200	6	42	1.6	0.6	0.6	13	2.4	0.7	0.6
11	293951	8649923	240	5	32	1.9	0.7	0.8	12	2.5	0.7	0.7
10	294065	8650006	290	6	44	1.8	0.6	0.7	13	2.3	0.7	0.6
9	294086	8650099	300	4	47	1.5	0.6	0.8	11	1.1	0.3	0.3

Adaptado de Arana, César (2001a). Monitoreo de la vegetación del sector de Atocongo. Periodo húmedo del año 2001. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A. Lima, SNT

## Gradiente en Quebrada Verde, setiembre del 2001

Transecto	Easting	Northing	Altitud (m)	Cobertura arbórea					Cobertura herbácea			
				S	N	H'	1-D	J	S	H'	1-D	J
4	295551	8650533	370	3	53	0.8	0.3	0.5	9	2.4	0.8	0.7
5	295256	8650535	400	5	34	1.9	0.6	0.8	16	3.0	0.8	0.8
6	295200	8650660	410	7	43	2.3	0.7	0.8	10	1.9	0.6	0.6
3	294947	8650835	535	6	54	1.6	0.6	0.6	8	2.4	0.8	0.8

Adaptado de Arana, César (2001a). Monitoreo de la vegetación del sector de Atocongo. Periodo húmedo del año 2001. Informe Técnico presentado a Walsh Perú S.A. Lima, SNT



Localización de los puntos de setiembre del 2001

Fuente: Walsh Perú S.A. (2001b). Monitoreo biológico de la zona de Atocongo. Proyecto IND 1084. Lima, Walsh Perú S.A. (Mapa 2)

### Inventario de vegetación de junio y octubre 2002

Para junio del 2002 se cuenta con información producto del monitoreo biológico de las lomas de Atocongo, efectuada por la empresa Buenaventura Ingenieros S.A. (BISA) por encargo de UNACEM S.A. entre el 12 al 15 de junio. Se siguió los mismos procedimientos que usó Arana (2000, 2001). Para octubre del año 2002, Walsh registró información siguiendo una gradiente altitudinal. Sobre la base de la misma técnica de muestreo de los estudios de Arana (2000, 2001).

### Transectos en Quebrada Lúcumo, octubre del 2002

Transecto	Easting	Northing	Altitud	Vegetación	Leñosas				Total			
					Especies	Individuos	Cobertura (%)	H'	Especies	Cobertura (%)	H'	
1	293640	8649575	190	<i>Trixis</i> <i>Ophryosporus</i>	y	3	38	6	1.06	13	23	2.549
2	293871	8649902	250	<i>Croton</i>		6	28	9	1.9	14	43	2.949
3	293984	8650049	350	<i>Croton</i> <i>Acnistus</i>	con	4	27	36	1.33	16	71	2.433
4	293759	8649778	240	<i>Ophryosporus</i>		3	21	6	1.22	16	37	2.541
5	293588	8649504	140	<i>Trixis</i>		1	23	3	0	6	14	1.591

Fuente: Walsh Perú

### Inventario de vegetación de diciembre 2002 y setiembre 2007

Para los años 2002 y 2007 se cuenta con información derivada del monitoreo biológico de las lomas de Atocongo, efectuada por la empresa BISA por encargo de UNACEM S.A. En el 2002, el monitoreo se realizó del 28 al 31 de diciembre; y en el 2007, entre el 10 al 13 de setiembre. Estos inventarios han seguido los mismos procedimientos que empleó Arana (2000, 2001). Es decir, cada transecto fue de 30 x 2 m, divididos en 3 parcelas de 10 x 2 m. En cada transecto se registraron las especies presentes, su abundancia, frecuencia y la cobertura (por intersección del eje medio). La Tabla 17 muestra la información respectiva para setiembre del 2007.

### Transectos del sector Atocongo, setiembre del 2007

Transecto	Easting	Northing	Lugar	Altitud (msnm)	Cobertura (%)	Abundancia	Riqueza
T 1	294 987	8 649 764	Quebrada Verde	223	64.57	6880	26
T 2	294 526	8 650 163	Quebrada Verde	460	52.43	12800	31
T 3	294 255	8 649 960	Cerro Atocongo	525	80.87	15247	21
T 4	294 147	8 650 325	Cerro Atocongo	550	66.4	15847	32
T 5	294 186	8 650 762	Cerro Lúcumo	525	67.83	5293	30
T 6	294 299	8 650 573	Cerro Lúcumo	543	84.57	11740	20
T 7	294 215	8 650 544	Quebrada José Gálvez	348	77.67	7393	28
T 8	294 017	8 650 301	Quebrada José Gálvez	531	55.53	9073	27
T 9	293 011	8 650 189	Quebrada Puquíó	232	47.57	5293	26
T 10	293 246	8 650 189	Quebrada Puquíó	289	61.77	9313	34
T 11	293 643	8 649 698	Cerro La Mora	275	71.8	11067	40
T 12	293 974	8 650 062	Cerro La Mora	338	59.97	8980	35

Fuente: Buenaventura Ingenieros S.A. (2008)

### Inventario de vegetación de diciembre del año 2007

Para diciembre del año 2007 se cuenta con información producto del monitoreo biológico de las lomas de Atocongo, también efectuada por la empresa BISA por encargo de UNACEM S.A. entre el 28 al 30 de diciembre 2007. Se siguió los mismos procedimientos que usó Arana (2000, 2001). La Tabla 18 presenta la referida información.

### Inventario de vegetación de enero del 2011

Referente al año 2011 también se cuenta con información, obtenida por BISA, para UNACEM S.A. durante los días 30 y 31 de diciembre del 2010 y 1 enero del 2011. La Tabla 19 presenta esta información.

## Transectos del sector Atocongo, diciembre del 2007

Transecto	Easting	Northing	Lugar	Altitud (msnm)	Cobertura (%)	Abundancia	Riqueza
T 1	294 987	8 649 764	Quebrada Verde	223	5.9	37	10
T 2	294 526	8 650 163	Quebrada Verde	460	23.1	51	8
T 3	294 255	8 649 960	Cerro Atocongo	525	8.83	83	12
T 4	294 147	8 650 325	Cerro Atocongo	550	2.53	41	11
T 5	294 186	8 650 762	Cerro Lúcumo	525	4	31	14
T 6	294 299	8 650 573	Cerro Lúcumo	543	4.07	54	10
T 7	294 215	8 650 544	Quebrada José Gálvez	348	8.5	459	14
T 8	294 017	8 650 301	Quebrada José Gálvez	531	11.47	129	20
T 9	293 011	8 650 189	Quebrada Puquío	232	5.17	86	20
T 10	293 246	8 650 189	Quebrada Puquío	289	0.63	22	12
T 11	293 643	8 649 698	Cerro La Mora	275	0.23	142	5
T 12	293 974	8 650 062	Cerro La Mora	338	5.3	195	13

Fuente: Buenaventura Ingenieros S.A. (2008b)

## Transectos del sector Atocongo, enero del 2011

Transecto	Easting	Northing	Lugar	Altitud (msnm)	Cobertura (%)
T 1	294 987	8 649 764	Quebrada Verde	223	5.9
T 2	294 526	8 650 163	Quebrada Verde	460	23.1
T 3	294 255	8 649 960	Cerro Atocongo	525	8.83
T 4	294 147	8 650 325	Cerro Atocongo	550	2.53
T 5	294 186	8 650 762	Cerro Lúcumo	525	4
T 6	294 299	8 650 573	Cerro Lúcumo	543	4.07
T 7	294 215	8 650 544	Q. Lúcumo	348	8.5
T 8	294 017	8 650 301	Q. Q. Lúcumo	531	11.47
T 9	293 011	8 650 189	Quebrada Puquío	232	5.17
T 10	293 246	8 650 189	Quebrada Puquío	289	0.63
T 11	293 643	8 649 698	Cerro La Mora	275	0.23
T 12	293 974	8 650 062	Cerro La Mora	338	5.3

Fuente: Buenaventura Ingenieros S.A. (2008b)

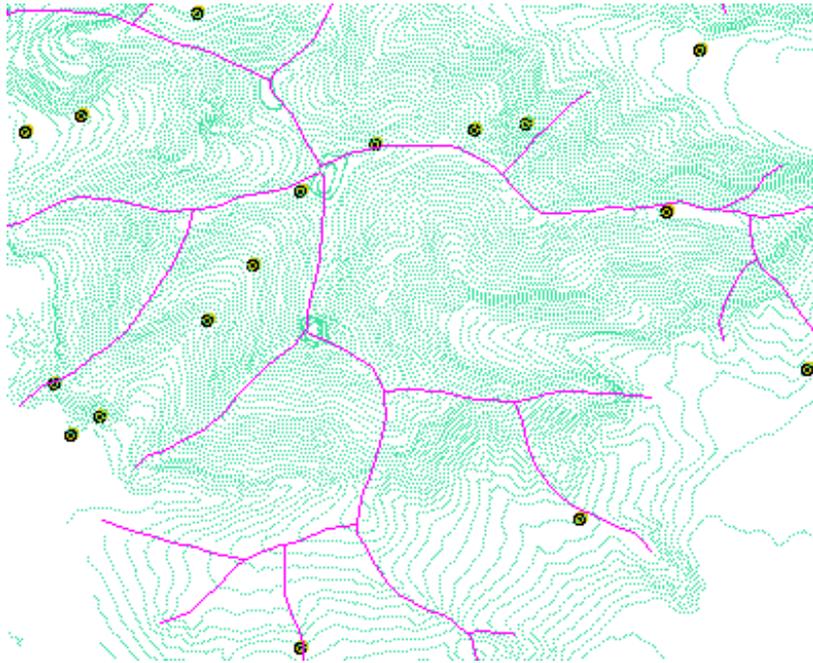
Datos generados mediante geoestadística a partir de los datos de setiembre del 2000

En todo estudio de comunidades vegetales es importante reconocer las tendencias espaciales y anisotropía de los datos para seleccionar las técnicas estadísticas más apropiadas con atención a sus exigencias o requisitos.

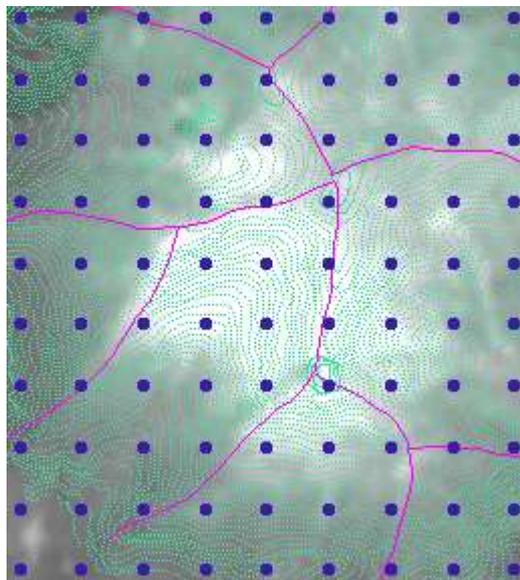
Considerando que los diferentes juegos de datos, obtenidos en campo, comprendían pocos puntos (menos de 10 datos) y que no se distribuían en toda el área de estudio se optó por generar datos, mediante la técnica del Kriging y aplicación del módulo de geoestadística del programa informático ArcGis. Se consideraron 17 puntos de muestreo correspondientes a 8 transectos evaluados en setiembre del año 2000 (ver Tabla 7) y 9 puntos adicionales registrados en áreas sin vegetación. A partir de los 17 puntos se generaron las “superficies” respectivas de cada variable.

Luego se obtuvo una malla de 90 datos (10 filas x 9 columnas) que cubrió el área de los cerros Atocongo y Lúcumo sobre una superficie de 1.6 x 1.8 km. Cada punto correspondió a una cuadrícula de 200 x 200 m. Para cada punto se tuvo un juego de datos de las variables en estudio. Al juego de datos obtenidos se aplicó todas las pruebas estadísticas suministradas a los demás datos en estudio.

Los datos generados tienen el nivel indagatorio, pues no se planteó como objetivo alguna interpolación determinística o geoestadística. Es a la inversa, los resultados del presente trabajo sobre la gradiente altitudinal y su influencia sobre la cobertura vegetal contribuirán a una pertinente generación de datos interpolados y raster de cobertura vegetal.



Localización de los puntos de muestreo setiembre del 2000 y puntos adicionales para generar la malla de datos geoestadísticos



Vista de la localización de los puntos de la malla sobrepuesta sobre la imagen NDVI de Spot, curvas a nivel y divisoria de aguas

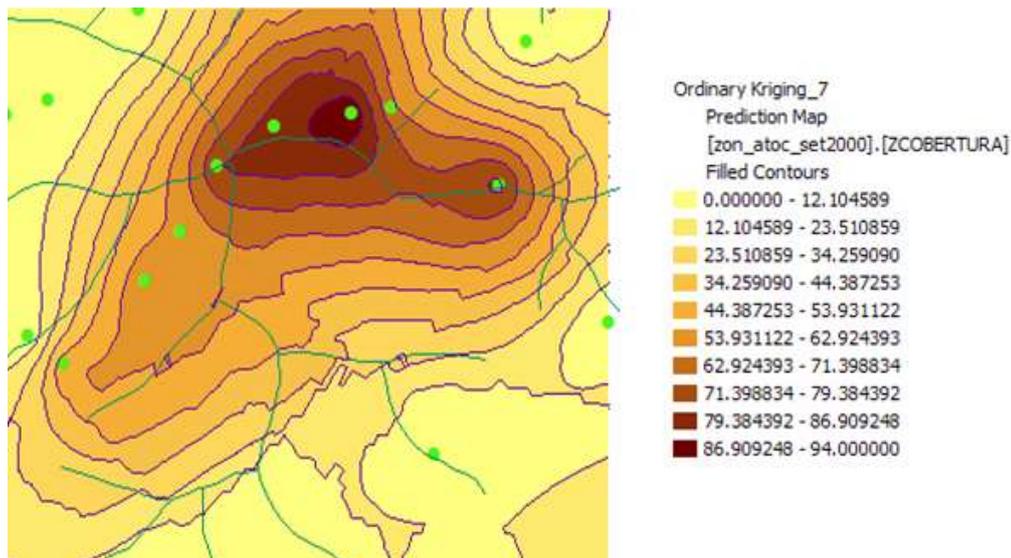
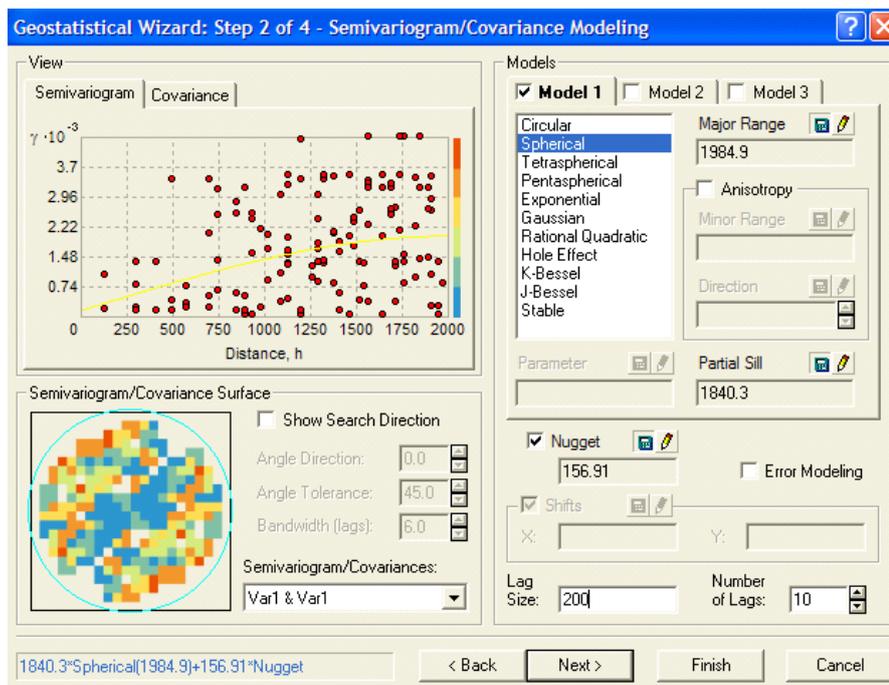


Imagen de cobertura vegetal obtenida mediante interpolación geoestadística a partir de los puntos de muestreo setiembre del 2000 y puntos adicionales sin vegetación



Ventana del programa informático en el que se muestra el modelo (esférico) y el tamaño del Lag o alcance (200 m) empleados para obtener el semivariograma teórico

## Datos de gradientes o series espaciales de altitud y NDVI

Uno de los propósitos de la presente tesis fue determinar la tendencia espacial del NDVI en función de la gradiente altitudinal, y ello implicó el análisis de series de datos espaciales. La serie de datos es una secuencia de observaciones de variables continuas o discretas (discontinuas), ordenadas a lo largo de un eje temporal o espacial (transecto). Esta secuencia puede ser descompuestas en tres componentes: una señal periódica (variabilidad sistemática), una tendencia (componente determinístico) y fluctuaciones aleatorias (componente de ruido).

Se sabe que la tendencia de la serie puede ser modelada mediante la regresión lineal, polinomial u otro tipo de curva. Cuando el interés no es la tendencia de la serie sino el componente periódico, la tendencia constituye un ruido, que debe ser extraído como un primer paso y luego realizar el detrending (operación que calcula la regresión residual).

Para los propósitos del análisis de gradiente altitudinal del presente estudio se obtuvo series de datos espaciales de NDVI, tomando los valores en la intersección de una línea de gradiente con las curvas de nivel (cada 10 m) sobrepuestas sobre la imagen NDVI. Estas gradientes correspondían a transectos que siguieron la orientación del fondo de cada quebrada evaluada.

Las quebradas contempladas fueron: Lúcumo, Verde, Guayabo y Puquio, para todas las imágenes seleccionadas SPOT, IKONOS, ASTER y WORLD VIEW.

## Pruebas de normalidad de los datos

Como es práctica establecida en el análisis estadístico se inició la evaluación exploratoria revisando la normalidad de los datos. Se empleó la Prueba de Shapiro –

Wilk; y complementariamente las pruebas de Anderson – Darling, Lilliefors y Jarque - Bera.

Dado que el procedimiento metodológico de la Tesis incluía regresiones entre las variables de estudio (cobertura vegetal, NDVI y altitud) se tuvo especial cuidado en esta fase del análisis, puesto que las técnicas de regresión exigen que los datos de la variable dependiente 'y' tengan una distribución normal (los errores deben tener una distribución normal).

Con el fin de lograr una distribución normal, el camino usual para superar el impase es la transformación de datos. Sin embargo, las transformaciones no siempre logran corregir la falta de normalidad, heterocedasticidad y ausencia de linealidad de los datos; y si se logra, queda la dificultad respecto a que la interpretación de los resultados, a partir de datos transformados, no es sencilla. En este punto se pensó en los modelos lineales generalizados y modelos aditivos generalizados, que en secciones más adelante se detallan.

En atención a la prueba de Shapiro – Wilk, los datos de la cobertura vegetal de abril del 2001, setiembre del 2000 (datos generados), diciembre del 2002 y diciembre del 2007 no presentaron normalidad. Asimismo, los datos de NDVI spot (1998) para setiembre del 2000 (generados), setiembre del 2001 y diciembre 2002 no fueron normales. En cuanto a la altitud, los datos de setiembre y diciembre del 2007 tampoco fueron normales.

Los datos de la cobertura vegetal de abril del 2001 en todas las pruebas de normalidad empleadas en este estudio (pruebas de Shapiro – Wilk, Anderson – Darling, Lilliefors y Jarque – Bera) no presentaron normalidad, por lo mismo se planteo su transformación. De la misma manera ocurrió para el NDVI de setiembre del 2001, todas las pruebas señalaron su falta de normalidad.

En el caso de los datos de cobertura vegetal de diciembre del 2000 (generados mediante geoestadística) si bien no presentaron normalidad en la prueba de Shapiro – Wilk; las otras pruebas (Anderson – Darling, Lilliefors y Jarque – Bera) indicaron su normalidad, por lo mismo no se recurrió a la estrategia de transformación; lo contrario ocurrió para el caso del NDVI Spot 1998.

Para los datos de NDVI Spot de setiembre del 2001, NDVI Spot y cobertura de diciembre del 2002, tanto la prueba de Shapiro – Wilk como las pruebas de Anderson – Darling y Lilliefors tampoco señalaron normalidad. Solo la prueba de Jarque – Bera indico normalidad. Dado que más pruebas indicaron la falta de normalidad se recurrió a la estrategia de la transformación de datos.

Para el caso de los datos de cobertura vegetal de diciembre del 2007, no indicaron normalidad, además de la prueba de Shapiro – Wilk, las pruebas de Anderson – Darling y Jarque – Bera. Solo la prueba Lilliefors indicó normalidad. Puesto que la mayoría de las pruebas señalaron la falta de distribución normal se recurrió a la transformación. Se empleo la transformación de Box-Cox.

Se sabe que una opción actual frente a la falta de normalidad de los datos es acudir a los modelos lineales generalizados (GLM, por sus siglas en inglés) o a los modelos aditivos generalizados (GAM). Tales modelos permiten incluir respuestas no normales, como binomial, Poisson o Gamma e incluso pueden modelar variables respuestas continuas o categóricas con distribuciones del error no necesariamente homocedásticas. Las distribuciones para las cuales los modelos lineales generalizados están definidos son aquellas que pertenecen a la familia exponencial (a diferencia de la regresión lineal que exige que la distribución sea normal o gaussiana).

El presente estudio consideró también la opción que ofrecen los modelos lineales generalizados (GLM por sus siglas en inglés) y los modelos aditivos generalizados (GAM por sus siglas en inglés), especialmente para los casos en los cuales era notoria la falta de normalidad de los datos.

La Tabla 20 muestra los resultados de la aplicación de la prueba de Shapiro-Wilk. Este Tabla resume los cálculos efectuados. La Tabla 21 incluye la anotación de la transformación y el valor de lambda considerado.

## Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk

Época	Fecha de datos	Variables	W	p-valor	Interpretación
Estación seca	Abril del 2001	Altitud	0.949	0.512	Normal
		Cobertura vegetal	0.734	0.001*	No normal
		NDVI Ikonos de marzo del 2001	0.921	0.198	Normal
	Junio del 2002	Altitud	0.963	0.831	Normal
		Cobertura vegetal	0.882	0.093	Normal
		NDVI Ikonos de marzo del 2001	0.941	0.516	Normal
Estación húmeda	Setiembre del 2000	Altitud	0.968	0.880	Normal
		Cobertura vegetal	0.933	0.547	Normal
		NDVI Spot de noviembre del 1998	0.941	0.618	Normal
	Setiembre del 2000 (generados)	Altitud	0.975	0.079	Normal
		Cobertura vegetal	0.969	0.032*	No normal
		NDVI Spot de noviembre del 1998	0.937	0.000*	No normal
	Setiembre del 2001	Altitud	0.973	0.929	Normal
		Cobertura vegetal	0.919	0.246	Normal
		NDVI Spot de noviembre del 1998	0.858	0.036	No normal
	Octubre del 2002	Altitud	0.968	0.862	Normal
		Cobertura vegetal	0.953	0.755	Normal
		NDVI Spot de noviembre del 1998	0.894	0.377	Normal
	Diciembre del 2002	Altitud	0.985	0.987	Normal
		Cobertura vegetal	0.766	0.003*	No normal
		NDVI Spot de noviembre del 1998	0.803	0.010*	No normal
Setiembre 2007	Altitud	0.804	0.010*	No normal	
	Cobertura vegetal	0.979	0.979	Normal	
Diciembre 2007	Altitud	0.804	0.010*	No normal	
	Cobertura vegetal	0.824	0.018*	No normal	

H<sub>0</sub>: La variable de la cual se extrajo la muestra sigue una distribución Normal. Cuando el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0,05$  no se puede rechazar la hipótesis nula H<sub>0</sub>

H<sub>A</sub>: La variable de la cual se extrajo la muestra no sigue una distribución Normal. Cuando el p-valor computado es menor que el nivel de significación  $\alpha=0,05$  se debe rechazar la hipótesis nula H<sub>0</sub> y aceptar la hipótesis alternativa

W: Estadístico del test de Shapiro-Wilk

## Prueba de Shapiro-Wilk para datos transformados

Fecha de datos	Variables y tipo de transformación	W	p-valor	Interpretación
Abril del 2001	Cobertura vegetal Transformación Box-Cox. Lambda -0.133	0.959	0.682	Normal
	NDVI Ikonos de marzo del 2001 Transformación Box-Cox. Lambda -0.245	0.981	0.975	Normal
Setiembre del 2000 (generados)	NDVI Spot de noviembre del 1998 Transformación Box-Cox. Lambda 0.314	0.996	0.993	Normal
Setiembre del 2001	Cobertura vegetal Transformación Box-Cox. Lambda 0.451	0.920	0.251	Normal
	NDVI Spot de noviembre del 1998 Transformación Box-Cox. Lambda - 0.679	0.928	0.320	Normal
Diciembre del 2002	Cobertura vegetal Transformación Box-Cox. Lambda -1.851	0.882	0.112	Normal
	NDVI Spot de noviembre del 1998 Transformación Box-Cox. Lambda -1.237	0.882	0.112	Normal
Diciembre del 2007	Cobertura vegetal Transformación Box-Cox. Lambda 0.354	0.967	0.875	Normal

$H_0$ : La variable de la cual se extrajo la muestra sigue una distribución Normal. Cuando el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0,05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula  $H_0$

$H_a$ : La variable de la cual se extrajo la muestra no sigue una distribución Normal. Cuando el p-valor computado es menor que el nivel de significación  $\alpha=0,05$ , se debe rechazar la hipótesis nula  $H_0$ , y aceptar la hipótesis alternativa  $H_a$

W: Estadístico del test de Shapiro-Wilk

## Pruebas de independencia de los datos

Una de las exigencias del modelo de regresión lineal es la aleatoriedad de los datos de la variable respuesta, es decir deben mostrar independencia. Una forma de probar la independencia de los datos es mediante la Prueba de rachas para una muestra. La Tabla 22 muestra los resultados de la aplicación de la prueba a los datos del estudio.

La mencionada tabla permite advertir que en el inventario de abril del 2001, los datos de las variables altitud y NDVI Ikonos no son independientes o aleatorios. Así también, en el juego de datos generados, a partir del inventario de setiembre del 2000, los datos de altitud no son aleatorios. En setiembre del 2001, los datos de cobertura no presentan independencia, tampoco la cobertura de diciembre del 2002.

Del mismo modo, en los inventarios de setiembre y diciembre del 2007 los datos de altitud no muestran aleatoriedad.

Dado que la falta de independencia de los datos no ocurre para todos los inventarios es posible la aplicación de los modelos lineales generalizados (sin transformar los datos para superar alguna falta de normalidad), en las regresiones siguientes: altitud vs cobertura vegetal (para el inventario de abril 2001); altitud vs cobertura vegetal, cobertura vegetal vs NDVI Ikonos 2001 y altitud vs NDVI Ikonos (para junio 2002).

Asimismo, continuando con la relación del párrafo anterior, se pueden aplicar regresiones para altitud vs cobertura vegetal, cobertura vegetal vs NDVI Spot, altitud vs NDVI Spot (datos de setiembre del 2000); para altitud vs cobertura vegetal, cobertura vegetal vs NDVI Spot, altitud vs NDVI Spot (datos de setiembre del 2000, generado); cobertura vegetal vs NDVI Spot, altitud vs NDVI Spot (datos de setiembre del 2001); para altitud vs cobertura vegetal, cobertura vegetal vs NDVI Spot, altitud vs NDVI Spot (datos de octubre del 2002); para cobertura vegetal vs NDVI Spot, altitud vs NDVI Spot (datos de diciembre del 2002); y para altitud vs cobertura vegetal (datos de setiembre y diciembre del 2007).

## Prueba de rachas para una muestra

Condición climática	Fecha de datos	Variables	R	R Esperanza	p-valor (bilateral)	Interpretación
Estación seca	Abril del 2001	Altitud	4.00	8.467	0.031*	Aleatorios
		Cobertura vegetal	7.00	6.867	0.747	No aleatorios
		NDVI Ikonos 2001	3.00	8.467	0.005*	Aleatorios
	Junio del 2002	Altitud	4.00	7.00	0.134	No aleatorios
		Cobertura vegetal	4.00	6.333	0.218	No aleatorios
		NDVI Ikonos 2001	6.00	6.833	0.848	No aleatorios
Estación húmeda	Setiembre del 2000	Altitud	3.00	5.00	0.229	No aleatorios
		Cobertura vegetal	4.00	5.00	0.743	No aleatorios
		NDVI Spot 1998	5.00	4.75	0.857	No aleatorios
	Setiembre del 2000 (generada)	Altitud	17.00	45.978	< 0.0001*	Aleatorios
		Cobertura vegetal	20.00	45.444	< 0.0001	Aleatorios
		NDVI Spot 1998	17.00	44.578	< 0.0001	Aleatorios
	Setiembre del 2001	Altitud	4.00	7.462	0.085	No aleatorios
		Cobertura vegetal	2.00	7.462	0.002*	Aleatorios
		NDVI Spot 1998	6.00	7.154	0.695	No aleatorios
	Octubre del 2002	Altitud	3.00	3.400	1.000	No aleatorios
		Cobertura vegetal	3.00	3.400	1.000	No aleatorios
		NDVI Spot 1998	3.00	3.400	1.000	No aleatorios
Diciembre del 2002	Altitud	4.00	6.455	0.221	No aleatorios	
	Cobertura vegetal	2.00	5.364	0.024*	Aleatorios	
	NDVI Spot 1998	4.00	6.091	0.285	No aleatorios	
Setiembre 2007	Altitud	3.00	6.833	0.030*	Aleatorios	
	Cobertura vegetal	5.00	7.000	0.351	No aleatorios	
Diciembre 2007	Altitud	3.00	6.833	0.030*	Aleatorios	
	Cobertura vegetal	5.00	6.333	0.558	No aleatorios	

H<sub>0</sub>: Los datos no están distribuidos al azar (no son independientes). Cuando el p-valor computado es menor que el nivel de significación  $\alpha=0,05$  se debe rechazar la hipótesis nula H<sub>0</sub> y aceptar la hipótesis alternativa H<sub>a</sub>.

H<sub>A</sub>: Los datos están distribuidos al azar (son independientes). Cuando el p-valor calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0,05$  no se puede rechazar la hipótesis nula H<sub>0</sub>.

## Pruebas de autocorrelación espacial de datos

Los datos están autocorrelacionados si el valor de una variable en un punto en el espacio está asociado con el valor de la misma variable en los puntos vecinos. La autocorrelación espacial representa la falta de aleatoriedad de los valores de las variables debido a una estructura espacial. Esta asociación puede denominarse autocorrelación positiva cuando los puntos cercanos tienden a ser similares; y negativa, cuando los puntos cercanos tienen valores diferentes.

Cuando se analiza datos espaciales, puede ocurrir que ellos estén correlacionados; y en ese caso, las pruebas estadísticas convencionales no serán válidas dado que la asunción de independencia de datos estaría violándose. Cuando los datos están autocorrelacionados resulta algo así como un pseudoreplicación, que infla los tamaños de muestra y los grados de libertad.

Si se tiene el propósito de estudiar el comportamiento espacial de una variable, el horizonte de autocorrelación espacial, que es la distancia mínima entre los puntos a partir de la cual la correlación espacial se hace cero, es un parámetro indispensable para el diseño de muestras. En general, no es apropiado analizar el comportamiento espacial de una variable si la distancia mínima entre los puntos que forman la muestra es menor que su horizonte de autocorrelación o alcance.

En este estudio, como parte del análisis exploratorio se revisó la autocorrelación de los datos, sobre la base del Índice de Moran y el Coeficiente de Geary. Se elaboraron los respectivos correlogramas para determinar el alcance u horizonte de autocorrelación. En el capítulo III se da cuenta de la metodología respectiva.

La Tabla 23 presenta los valores del alcance (m), el índice de Moran, el coeficiente de Geary y los respectivos p-valor de las pruebas respectivas. Se puede observar que los datos correspondientes a la época seca o veraniega no muestran autocorrelaciones para la cobertura vegetal; en cambio, si presentan autocorrelaciones para los valores de altitud y NDVI.

## Índices de Moran y Coeficiente de Geary

Época	Fecha de datos	VARIABLES	Alcance (m)	Índice de Moran (I)	p-valor para I	Coeficiente de Geary (C)	p-valor para C	Interpretación
Estación seca	Abril del 2001	Altitud	400	0.82	0.00334*	0.33	0.08641	Autocorrelacionado
		Cobertura vegetal	100	0.15	0.76307	4.79	0.05666	No correlacionado
		NDVI Ikonos	200	1.05	0.00363*	0.39	0.22317	Autocorrelacionado
	Junio del 2002	Altitud	200	0.85	0.01723*	0.33	0.19695	Autocorrelacionado
		Cobertura vegetal	200	0.16	0.47818	0.16	0.29290	No correlacionado
		NDVI Ikonos	200	1.05	0.00377*	0.43	0.30335	Autocorrelacionado
	Setiembre del 2000	Altitud	237	-0.19	0.95619	0.36	0.57625	No correlacionado
		Cobertura vegetal	237	-0.79	0.48994	1.90	0.37579	No correlacionado
		NDVI Spot	237	-0.04	0.90590	0.09	0.44749	No correlacionado
Setiembre del 2001	Altitud	231	0.51	0.09752	0.13	0.03968*	Autocorrelacionado	
	Cobertura vegetal	461	0.82	0.01244*	0.23	0.04504*	Autocorrelacionado	
	NDVI Spot	461	0.79	0.01400*	0.26	0.07384	Autocorrelacionado	
Octubre del 2002	Altitud	100	1.09	0.13004	0.03	0.29285	No correlacionado	
	Cobertura vegetal	100	0.90	0.15135	0.08	0.37683	No correlacionado	
	NDVI Spot	100	0.86	0.19950	0.01	0.29601	No correlacionado	
Estación húmeda	Setiembre del 2007	Altitud	100	0.85	0.33117	0.00	0.33970	No correlacionado
		Cobertura vegetal	100	1.84	0.04110*	0.18	0.47720	Autocorrelacionado
	Diciembre del 2007	Altitud	100	-0.49	0.68368	1.11	0.91387	No correlacionado
		Cobertura vegetal	100	-0.14	0.95096	0.26	0.66110	No correlacionado

$H_0$ : Los datos son independientes (no están autocorrelacionados). Si p-valor es mayor a 0.05 se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna. Si p-valor es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna

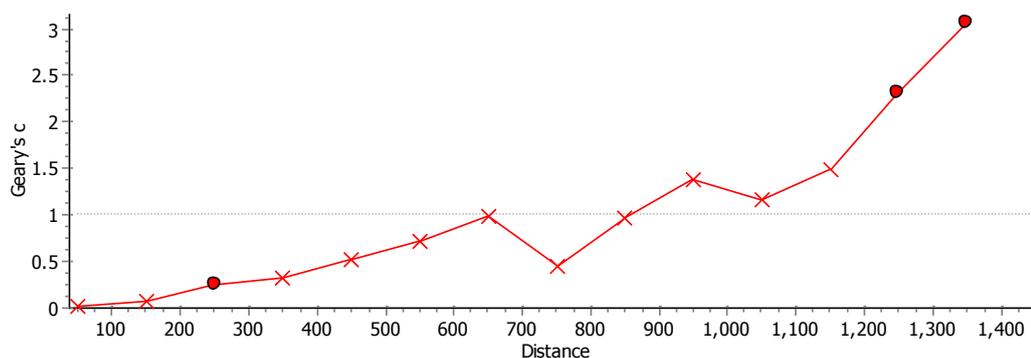
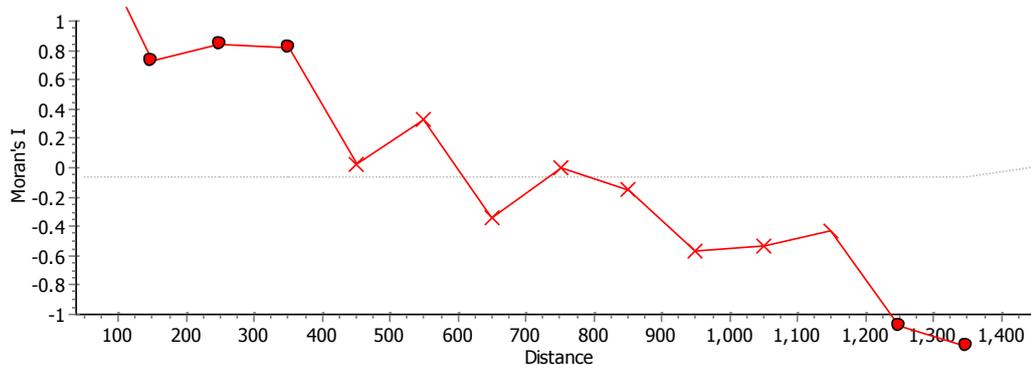
$H_a$ : Los datos no son independientes (están autocorrelacionados). Si el p-valor computado es menor que el nivel de significación  $\alpha=0,05$ , se debe rechazar la hipótesis nula  $H_0$  y aceptar la hipótesis alternativa  $H_a$ .

Para el caso de la época húmeda, en setiembre del 2001 la cobertura vegetal y el NDVI se muestran autocorrelacionados significativamente; así también, la cobertura de setiembre del 2007. Los demás datos de las variables estudiadas para otros años no muestran autocorrelaciones significativas.

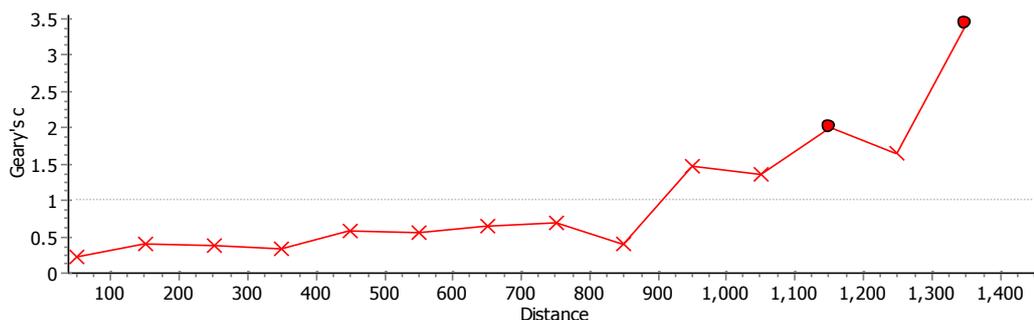
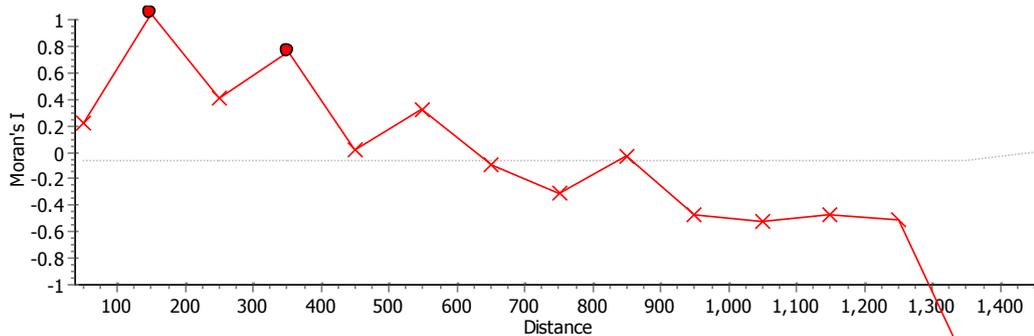
A continuación se presentan los correlogramas obtenidos. En las figuras, los puntos sólidos indican autocorrelaciones estadísticamente significativas (no así los puntos representados con una “x”).

#### Autocorrelación para datos de abril del 2001

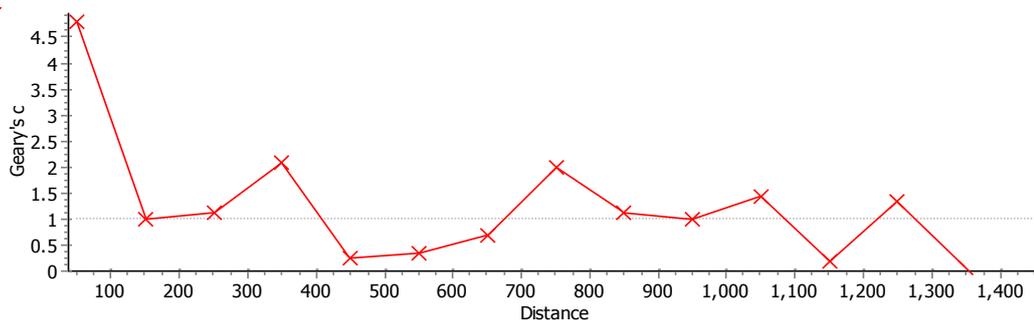
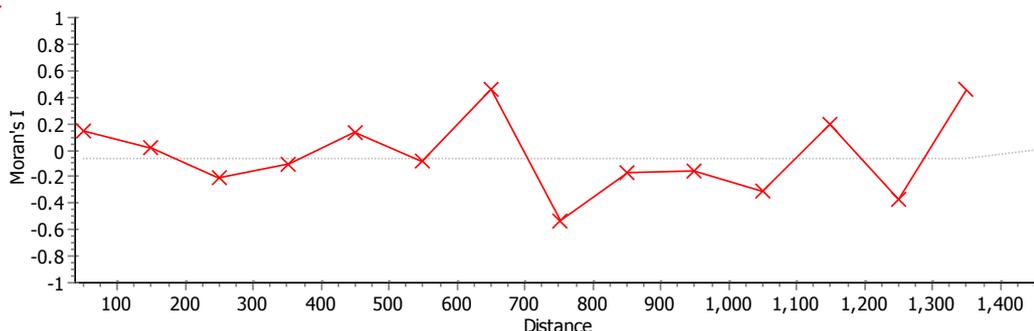
Los datos de altitud y NDVI para el inventario de abril del 2001 se muestran correlacionados positivamente hasta los 400 m; en cambio los valores de la cobertura vegetal no se muestran autocorrelacionados. Se puede decir que para el caso de los datos de abril solo la altitud muestra autocorrelaciones positivas, no así los datos de cobertura vegetal y NDVI.



Correlogramas de Moran y Geary correspondiente para la altitud en datos de abril del 2001



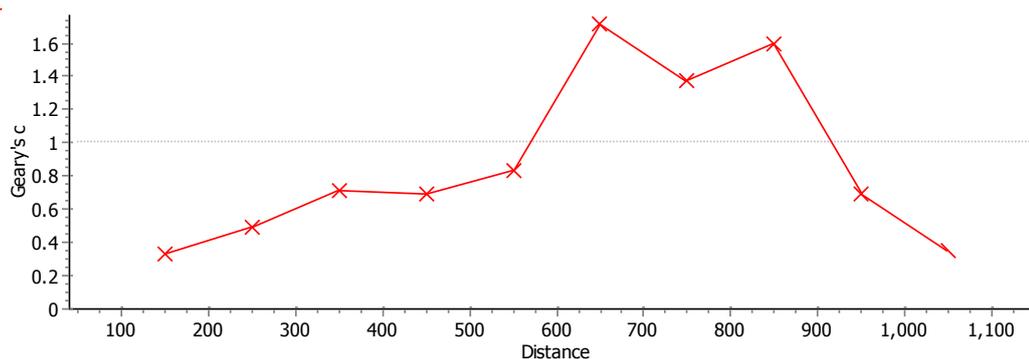
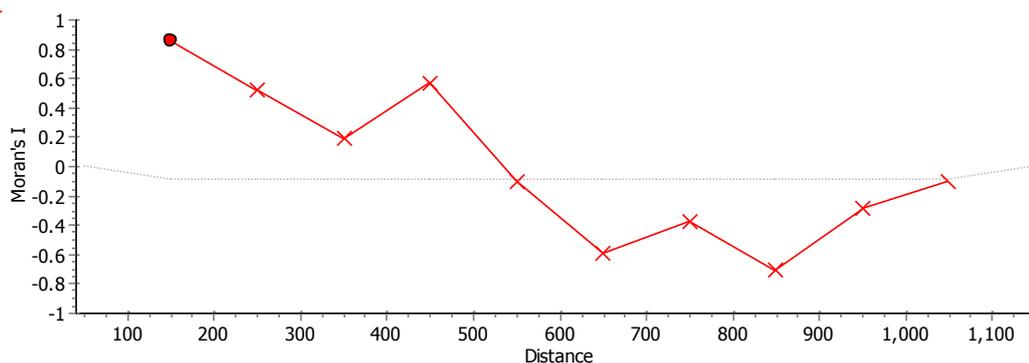
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Ikonos en datos de abril del 2001



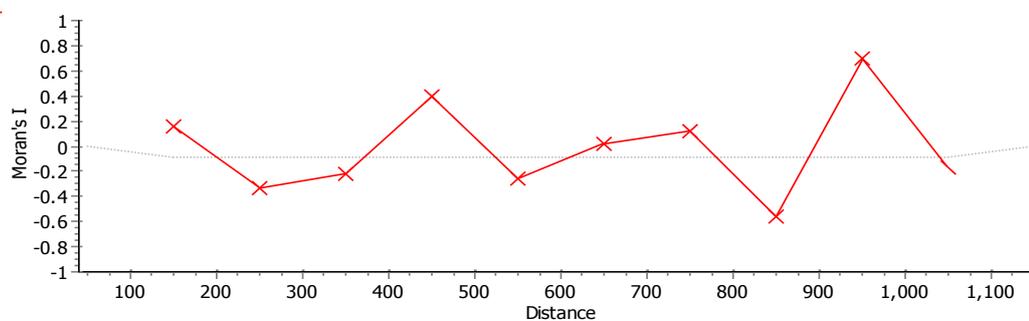
Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de abril del 2001

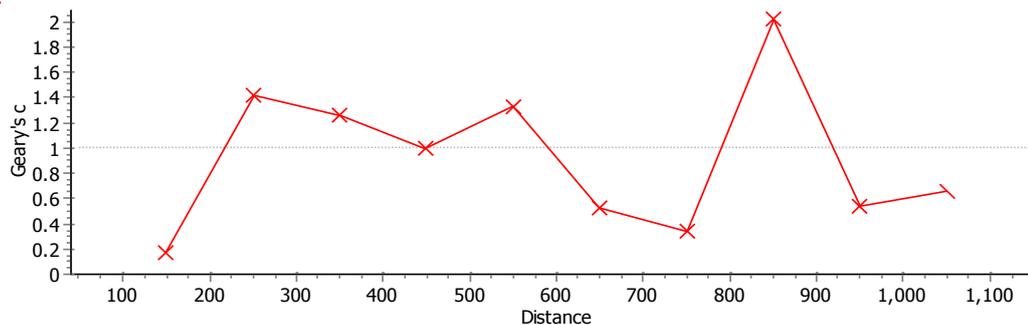
### Autocorrelación para datos de junio del 2002

Con relación a los datos de las variables altitud y cobertura vegetal del inventario de junio del 2002 se puede afirmar que no presentan autocorrelaciones significativas, atendiendo a los índices de Moran y el coeficiente de Geary. Si bien el índice de Moran produjo algunos valores significativos, el coeficiente de Geary no mostró autocorrelaciones que pudieran ser significativas.

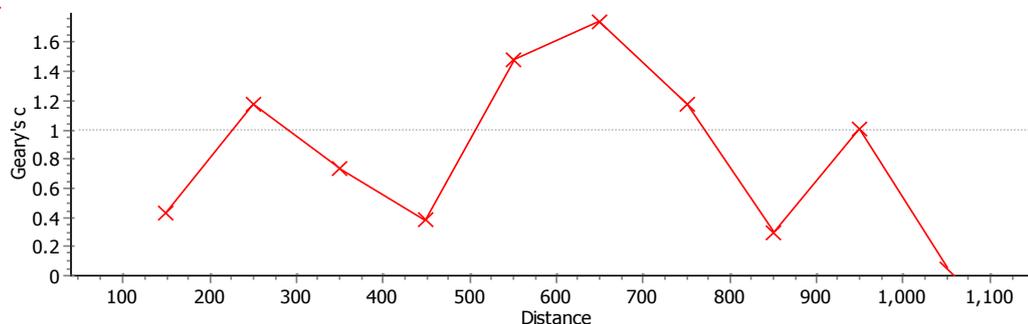
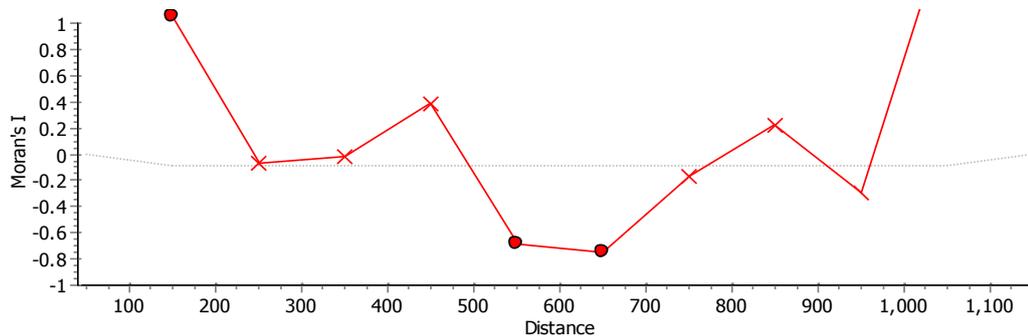


### Correlogramas de Moran y Geary para la altitud en datos de junio del 2002





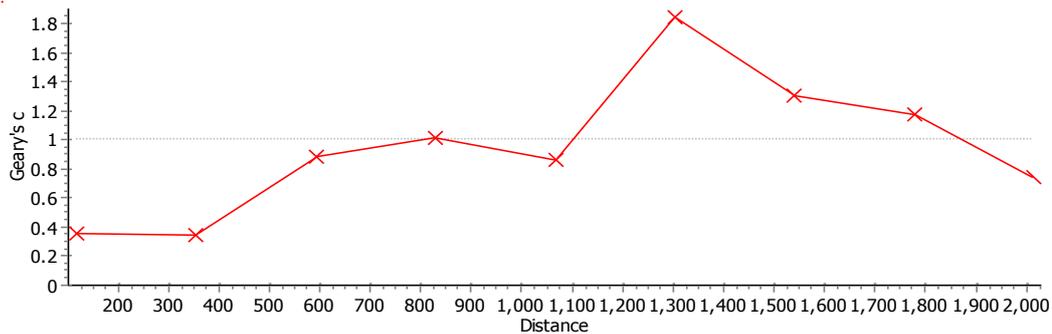
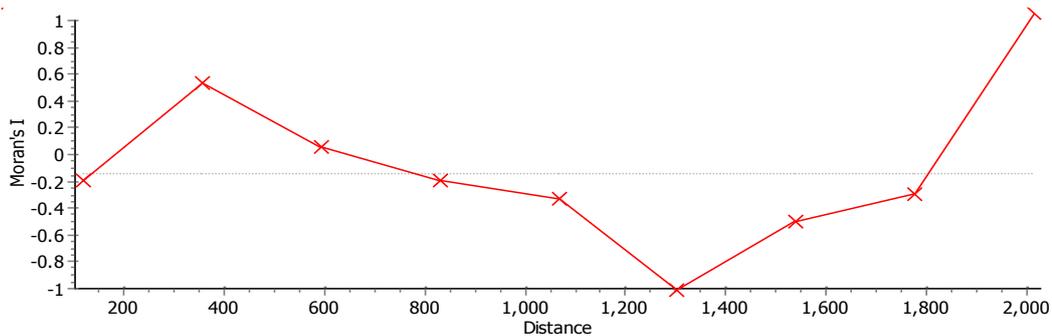
Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de junio del 2002



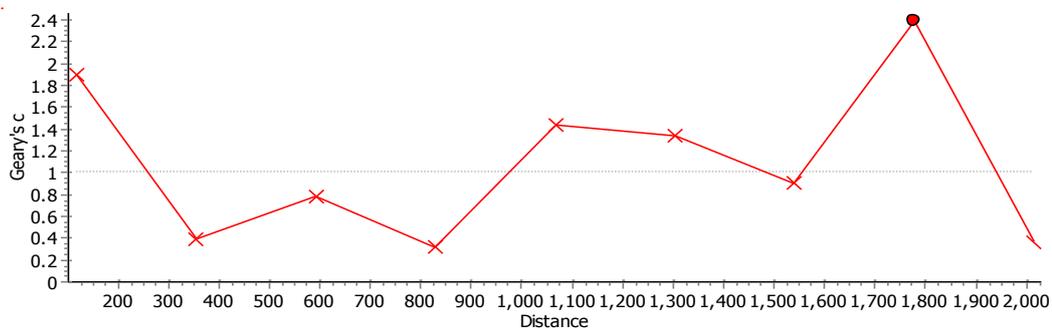
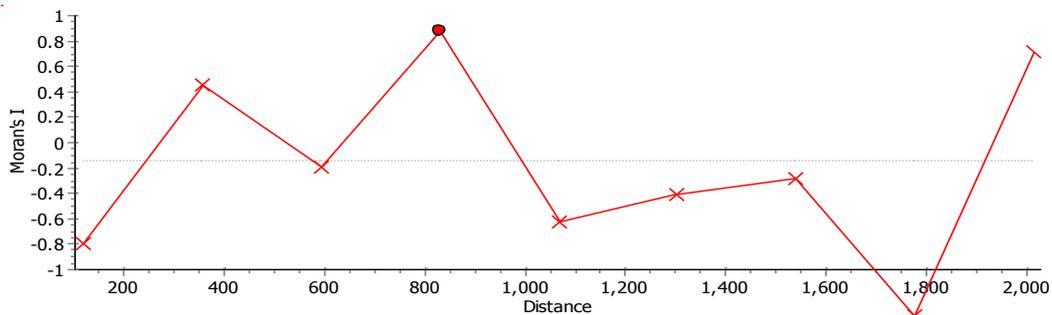
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Ikonos en datos de junio del 2002  
Autocorrelación para datos de setiembre del 2000

Con relación a los datos del inventario de setiembre del 2000 se puede afirmar que las tres variables en estudio no muestran autocorrelaciones significativas en sus datos.

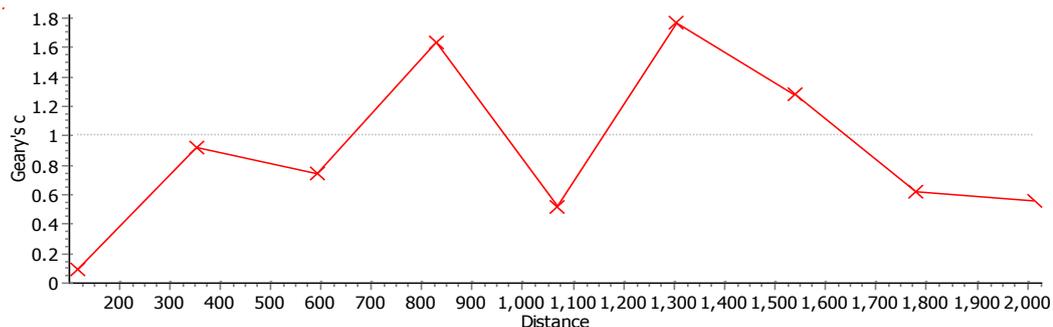
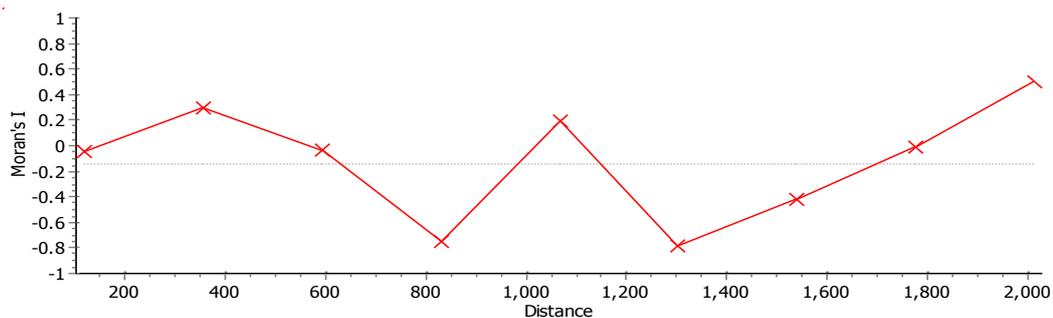
Las Figuras 14 al 16 muestran los comportamientos del índice de Moran y el Coeficiente de Geary para diferentes distancias o Lag. Los símbolos "x" indican que no hay significación en la prueba.



Correlogramas de Moran y Geary para la altitud en datos de setiembre del 2000



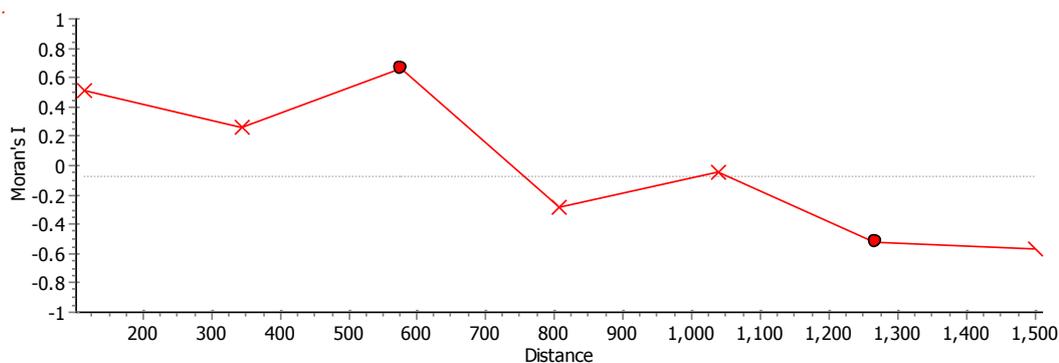
Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de setiembre del 2000

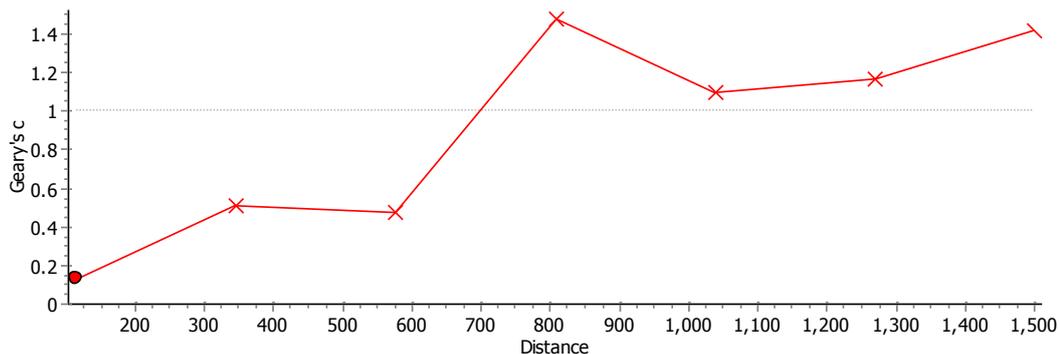


### Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Spot en datos de setiembre del 2000 Autocorrelación para datos de setiembre del 2001

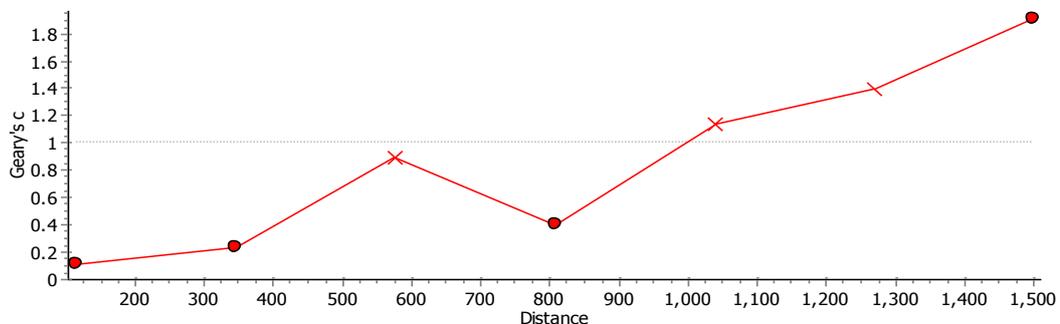
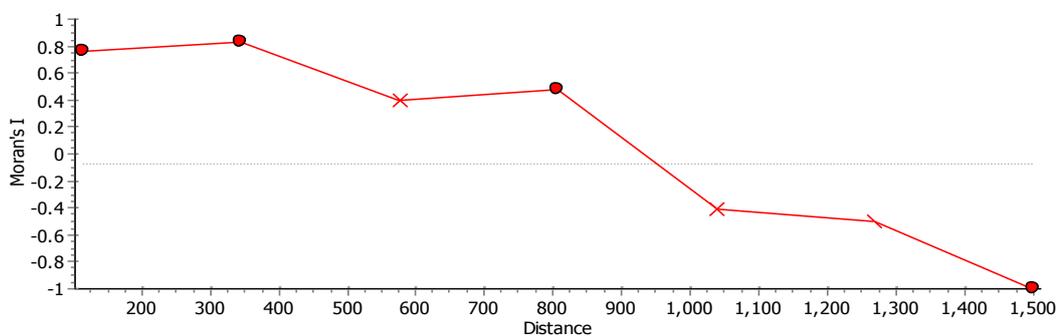
En el caso del inventario de setiembre del 2001 se puede observar en los autocorrelogramas que la variable altitud presenta autocorrelaciones positivas hasta los 600 m y la cobertura vegetal hasta los 350 ms.

No se tiene imágenes para setiembre del 2001. Se empleó la imagen SPOT de noviembre de 1998 para obtener NDVI en los puntos de muestreo de setiembre de 2001. Tales NDVI se muestran autocorrelacionados hasta los 350 ms.

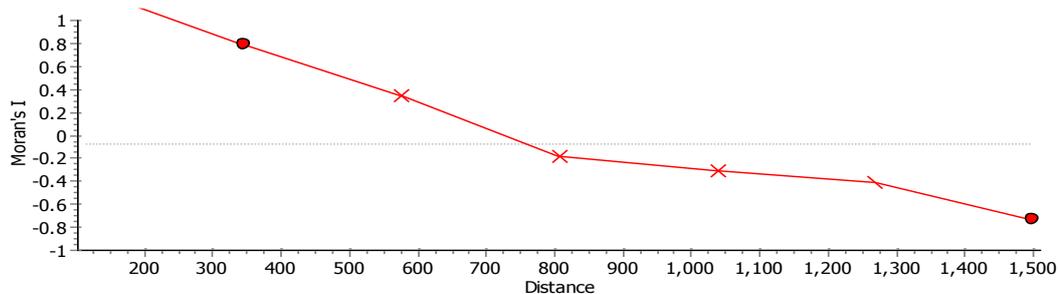


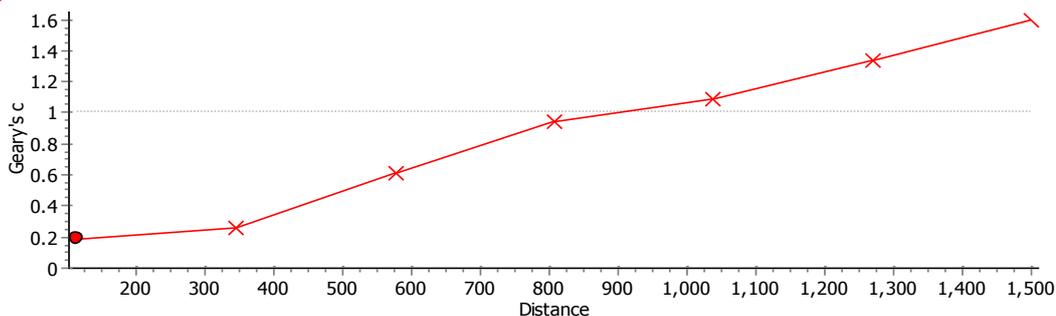


Correlogramas de Moran y Geary para la altitud en datos de setiembre del 2001



Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de setiembre del 2001





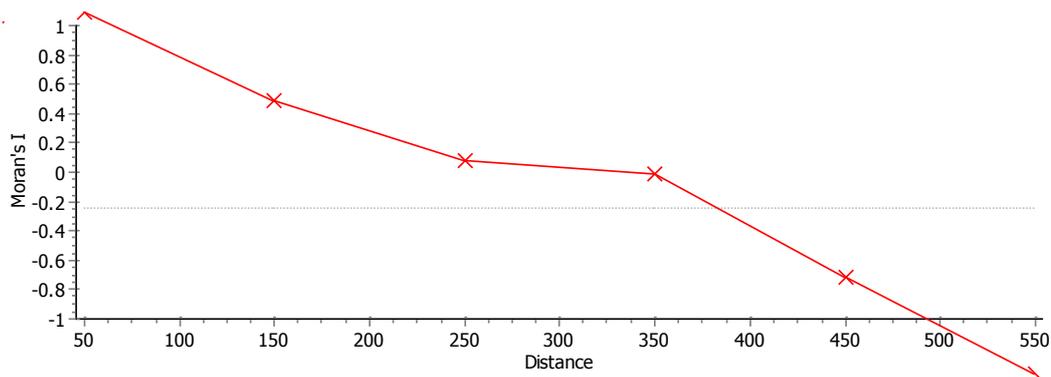
Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Spot 1998 en datos de setiembre del 2001

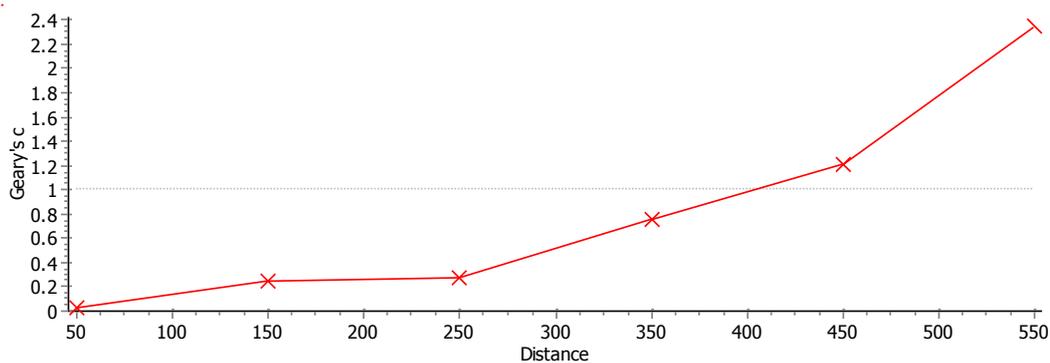
Autocorrelación para datos de octubre del 2002

Los datos que corresponden al inventario del 2002 en ninguno de los casos, altitud, cobertura vegetal y NDVI presentan autocorrelaciones significativas. También puede notarse un comportamiento de gradiente, por la secuencia uniforme de los índices de Moran y Geary.

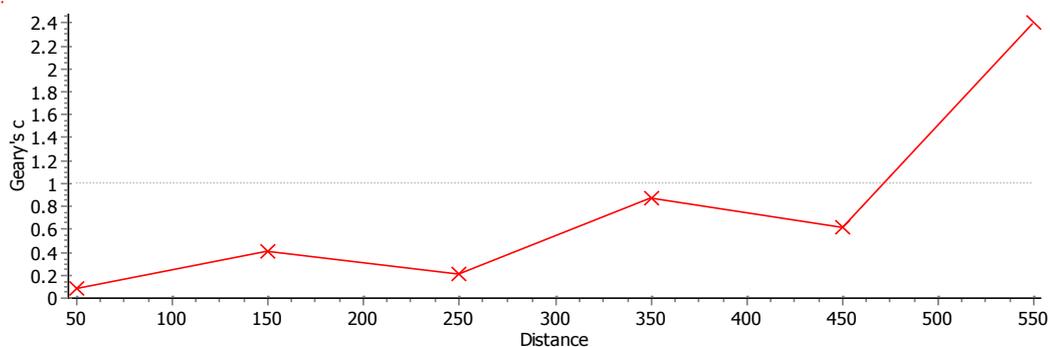
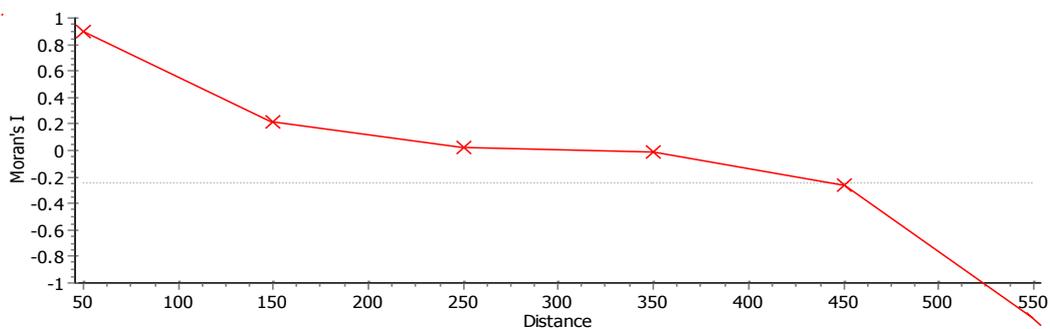
La particularidad de los datos de octubre de 2002 es que han sido tomados a lo largo de un gradiente, es decir las muestras están alineadas, y sobre el fondo de valle.

Las Figuras 20 (para altitud), 21 (para cobertura) y 22 (para NDVI Spot 1998) presentan los autocorrelogramas de Moran y Geary.

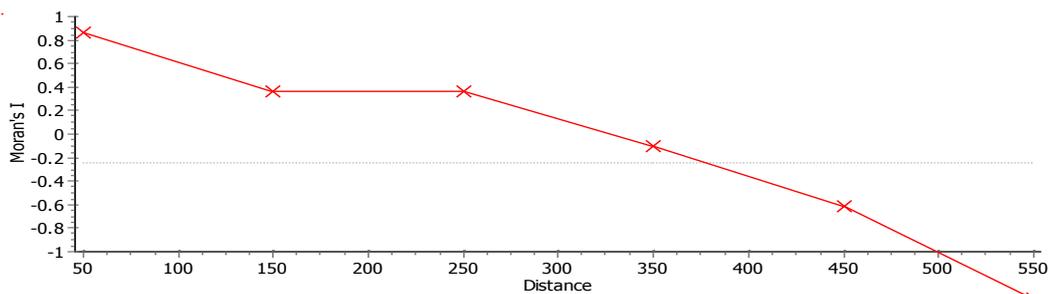


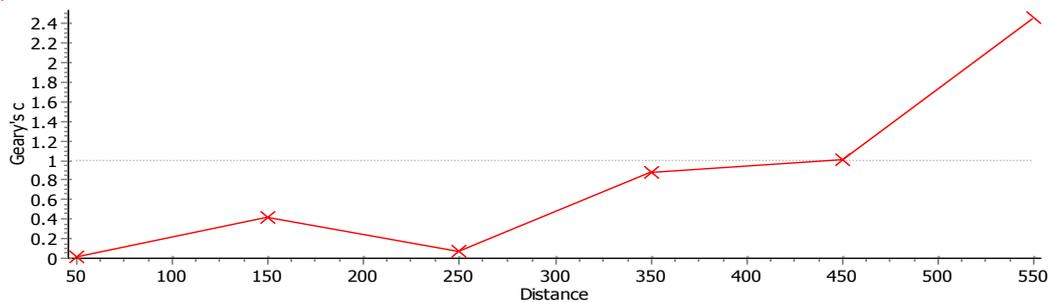


Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de octubre del 2002

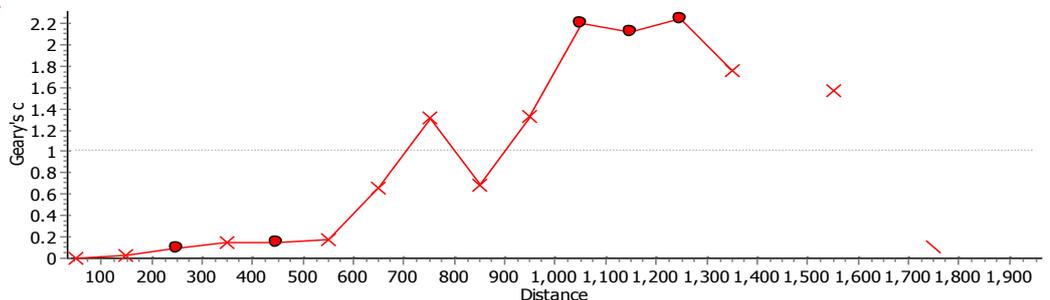
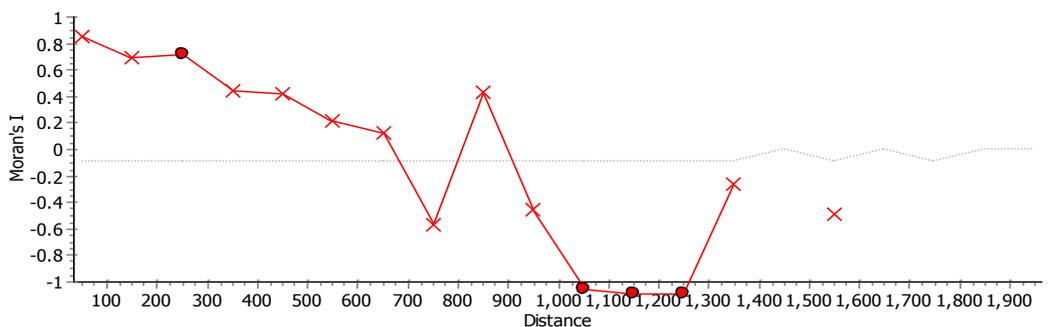


Correlogramas de Moran y Geary para la cobertura vegetal en datos de octubre del 2002

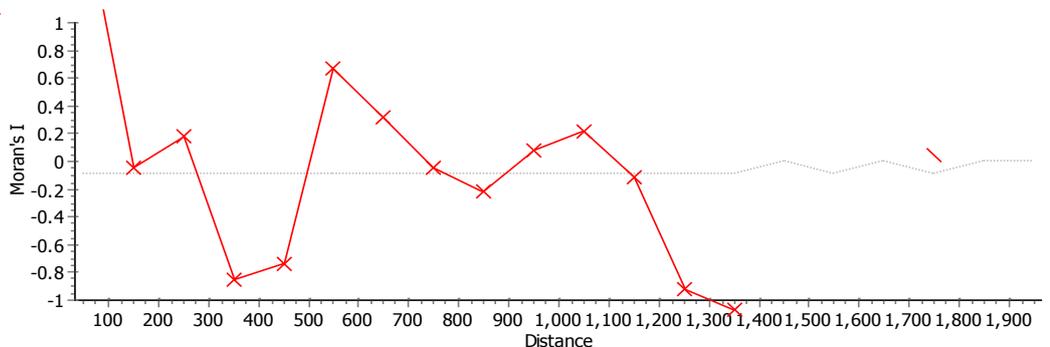


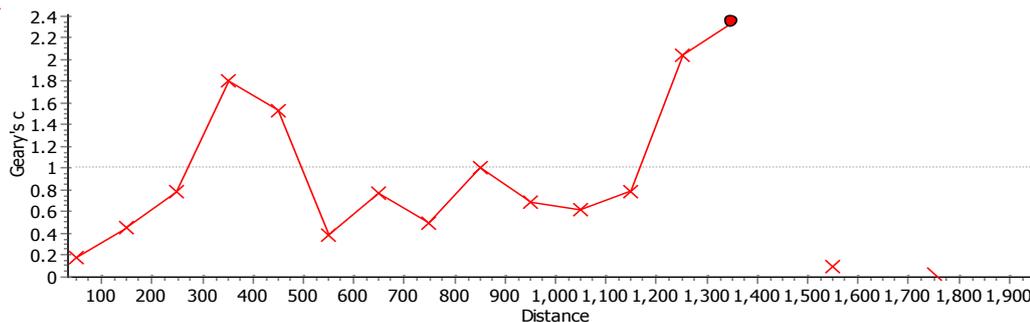


Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI Spot 1998 en datos de octubre del 2002



Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la altitud en datos de setiembre del 2007





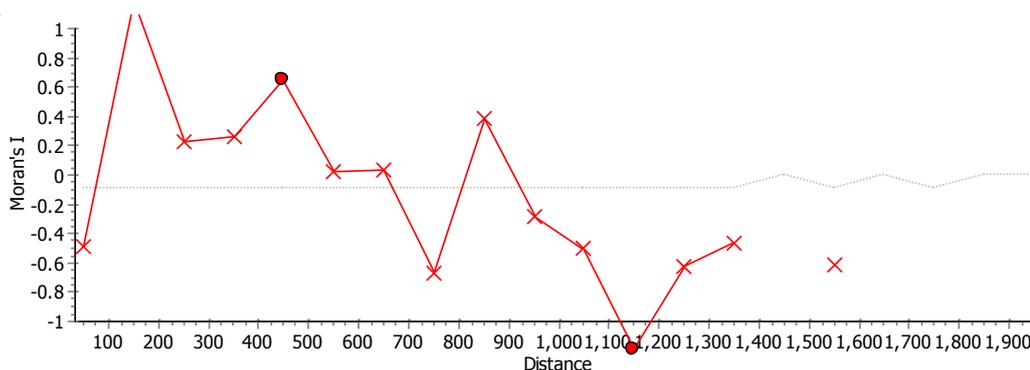
Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la cobertura vegetal en datos de diciembre del 2007

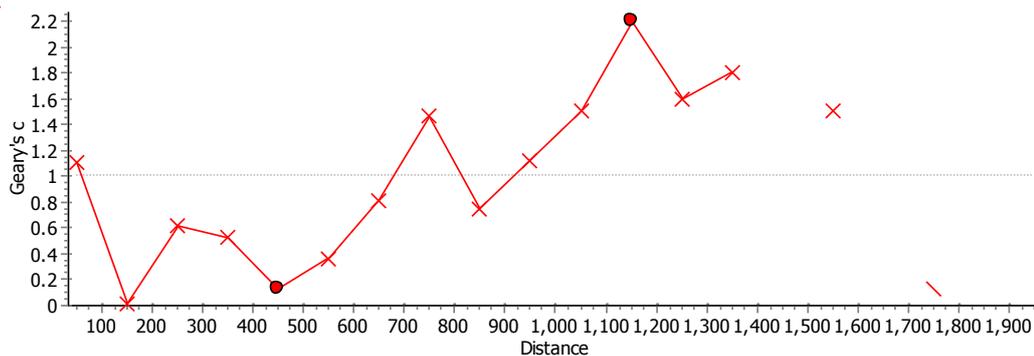
Autocorrelación para datos de setiembre 2007

La Figura 23 muestra los correlogramas de Moran y Geary para los datos de setiembre de 2007. Solo para la altitud puede afirmarse alguna autocorrelación en la distancia de 250 m.

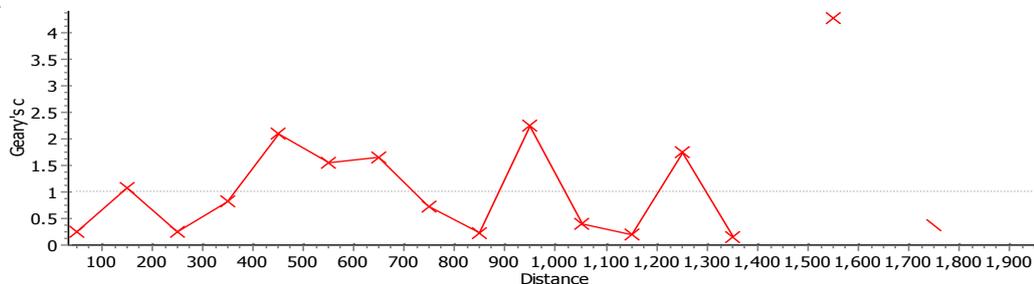
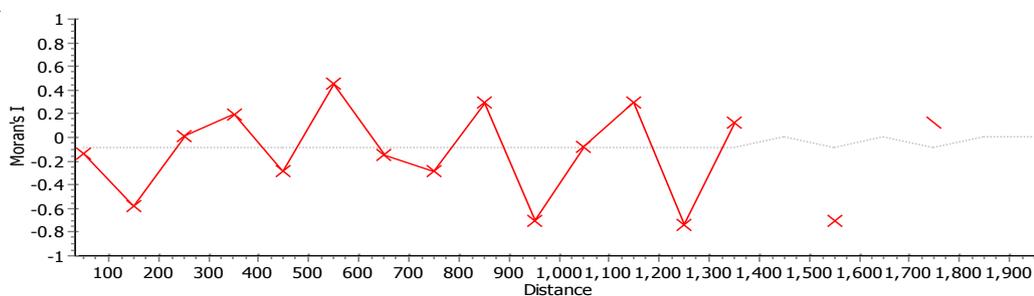
Autocorrelación para datos de diciembre 2007

La Figura 24 muestra que no hay autocorrelación espacial en los datos de cobertura vegetal de diciembre de 2007. Por otro lado, se puede decir que el horizonte de autocorrelación positiva para los datos de altitud de diciembre del 2007 ocurre a 500 m (ver Figura 25). La Figura 26 no muestra alguna correlación espacial en la cobertura vegetal en datos de diciembre del 2007.

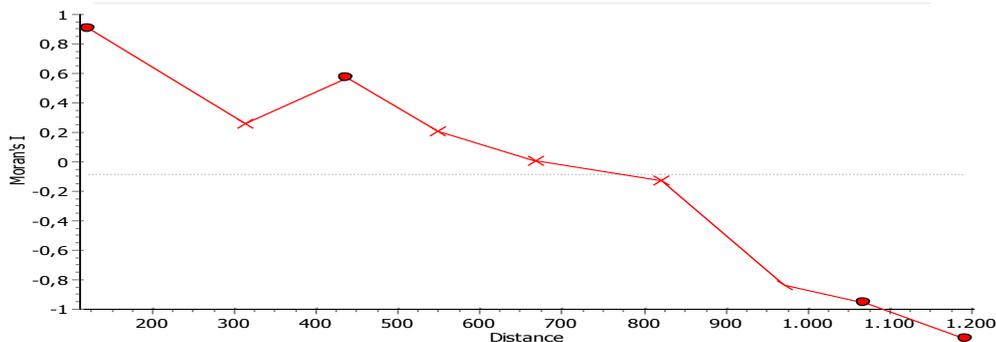


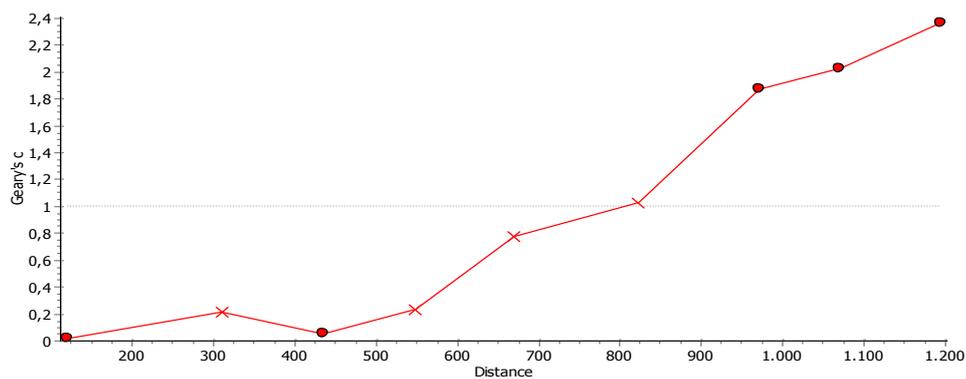


Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la altitud en datos de diciembre del 2007



Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la cobertura vegetal en datos de diciembre del 2007

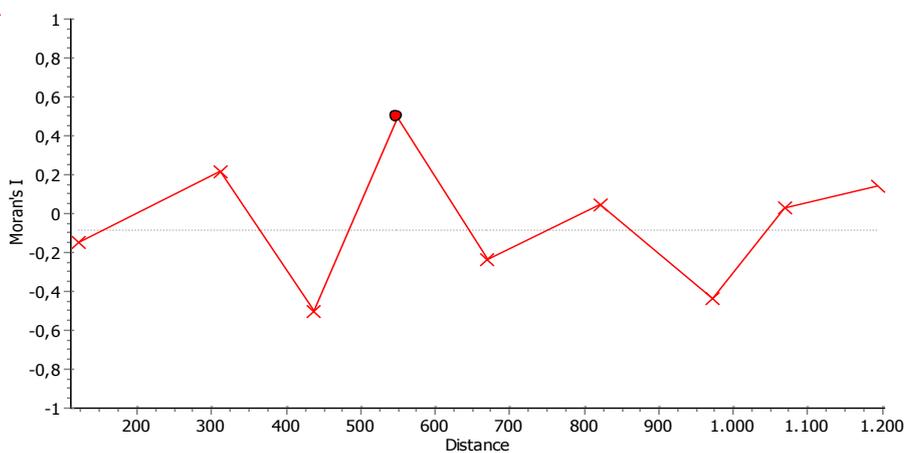


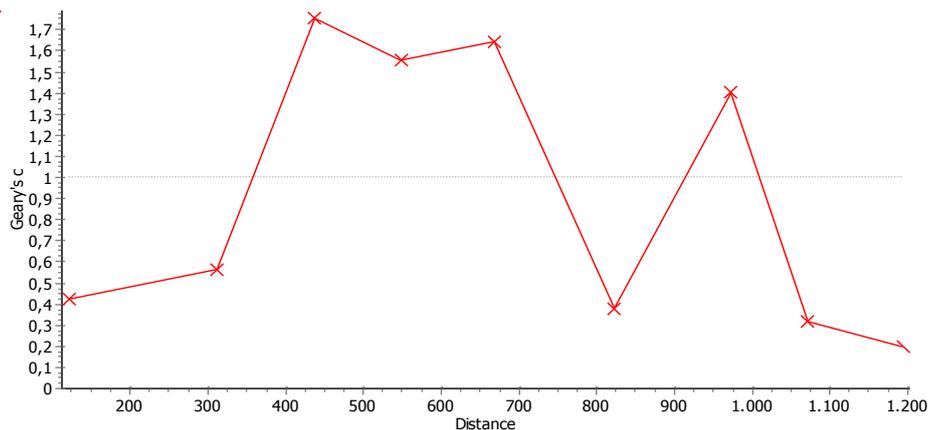


Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la altitud en datos de enero del 2011

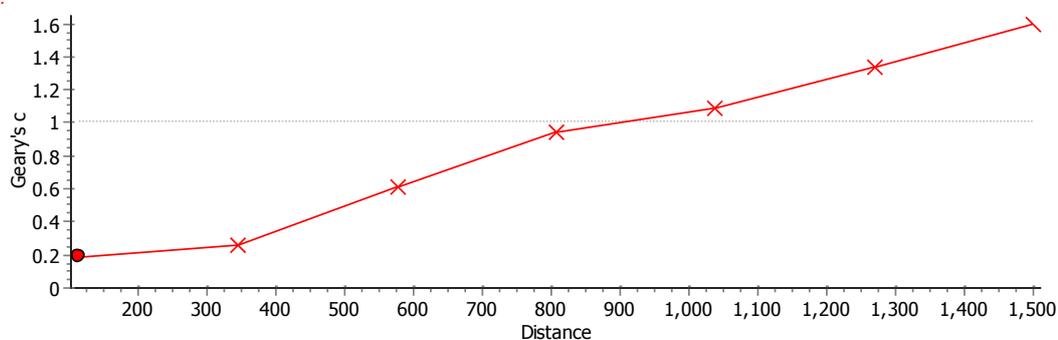
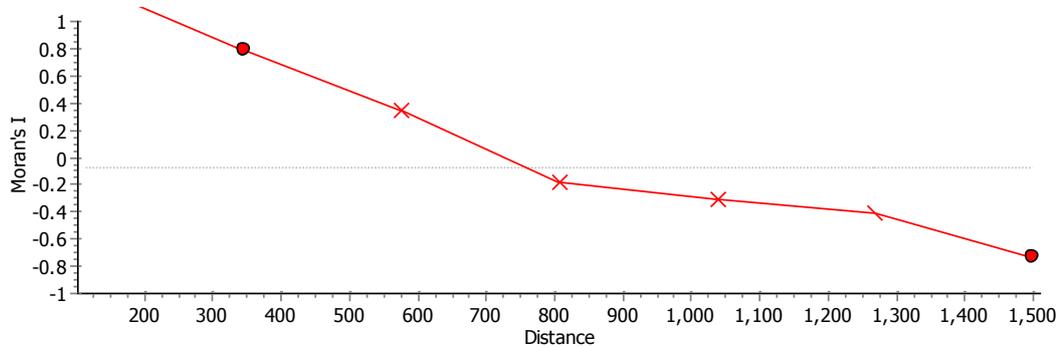
Autocorrelación para datos de enero del 2011

La Figura 27 muestra autocorrelación hasta 450 m para los valores de altitud en datos de enero de 2011. En cuanto autocorrelación en los datos de cobertura vegetal para enero de 2011 (ver Figura 28) se puede decir que hasta 550 m pueden encontrarse autocorrelación. La Figura 29 muestra la autocorrelación hasta 350 m para el NDVI World View 2011 en datos de enero del 2011.





Correlogramas de Moran y Geary correspondiente a la cobertura vegetal en datos de enero del 2011



Correlogramas de Moran y Geary para el NDVI World View 2011 en datos de enero del 2011

Autocorrelación para datos de gradientes de NDVI y altitud

Las series de datos generados para evaluar la gradiente altitudinal y su relación con el NDVI se muestran autocorrelacionadas hasta alcances de 100 y 200 m

aproximadamente; aunque con valores medios del Índice de Moran, según muestran las Tablas 24 al 28 y las Figuras 30 al 39.

#### Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Lúcumo

VARIABLES	Alcance (m)	Índice de Moran (I)	p-valor para I	Coeficiente de Geary (C)	p-valor para C	Interpretación
Altitud	200	0.65	4.4409E-16*	0.09	0*	Autocorrelación
NDVI Spot	200	0.73	0*	0.22	0*	Autocorrelación
NDVI Aster	200	0.65	4.4409E-16*	0.24	4.4409E-16*	Autocorrelación
NDVI Ikonos	200	0.53	6.7684E-12*	0.57	0.00037694*	Autocorrelación
NDVI Worldview	200	0.55	2.1556E-12*	0.35	1.4177E-10*	Autocorrelación

\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). NS no significativo (isotrópicos)

#### Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Puquio

VARIABLES	Alcance (m)	Índice de Moran (I)	p-valor para I	Coeficiente de Geary (C)	p-valor para C	Interpretación
Altitud	200	0.56	8.0434E-11*	0.22	1.1546E-13*	Autocorrelación
NDVI-Spot	100	0.56	6.7611E-08*	0.09	1.6457E-10*	Autocorrelación
NDVI-Aster	100	0.66	4.3269E-10*	0.31	7.5875E-07*	Autocorrelación
NDVI-Ikonos	100	0.43	8.4207E-06*	0.94	0.75844862	Autocorrelación
NDVI-World View	100	0.29	0.00195138*	0.35	0.0005876*	Autocorrelación

\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). NS no significativo (isotrópicos)

#### Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Guayabo

VARIABLES	Alcance (m)	Índice de Moran (I)	p-valor para I	Coeficiente de Geary (C)	p-valor para C	Interpretación
Altitud	200	0.56	1.027E-11*	0.22	7.3275E-15*	Autocorrelación
NDVI-Spot	200	0.51	3.6844E-10*	0.25	5.7475E-11*	Autocorrelación
NDVI-Aster	100	0.48	1.3264E-06*	0.26	1.8856E-06*	Autocorrelación
NDVI-Ikonos	100	0.66	5.2677E-11*	0.43	0.00014906*	Autocorrelación
NDVI-World View	100	0.53	1.376E-07*	0.15	3.8442E-08*	Autocorrelación

\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). NS no significativo (isotrópicos)

#### Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Verde BG

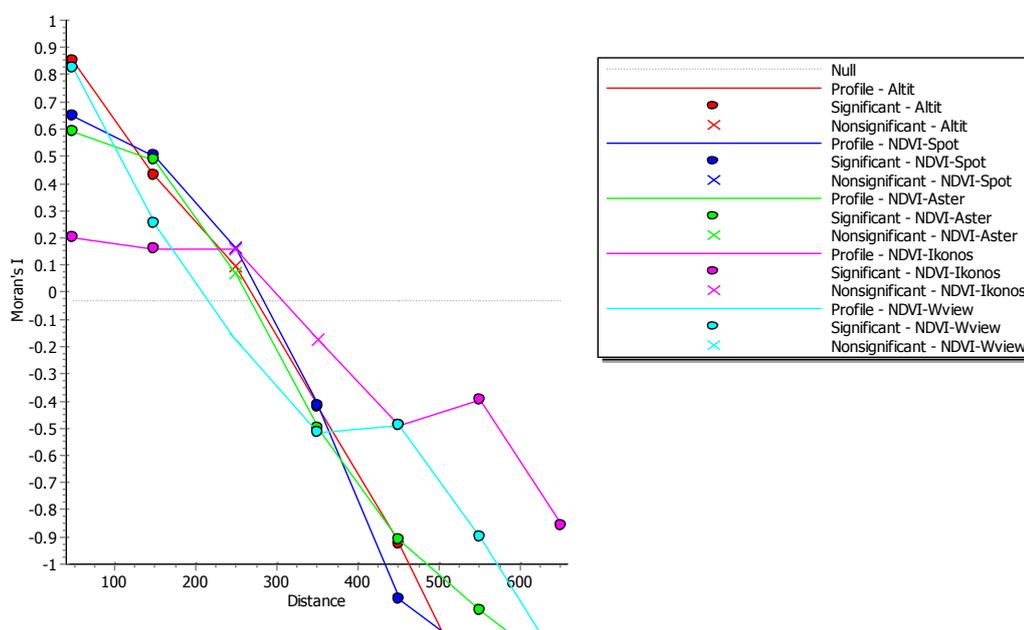
VARIABLES	Alcance (m)	Índice de Moran (I)	p-valor para I	Coeficiente de Geary (C)	p-valor para C	Interpretación
Altitud	100	0.85	0*	0.03	3.1086E-15*	Autocorrelación
NDVI-Spot	200	0.50	7.8701E-10*	0.25	4.147E-11*	Autocorrelación
NDVI-Aster	100	0.59	1.5432E-09*	0.16	2.0172E-09*	Autocorrelación
NDVI-Ikonos	100	0.20	0.02500497*	0.65	0.01188359*	Autocorrelación
NDVI-World View	100	0.83	4.4409E-16*	0.22	8.9362E-11*	Autocorrelación

\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). NS no significativo (isotrópicos)

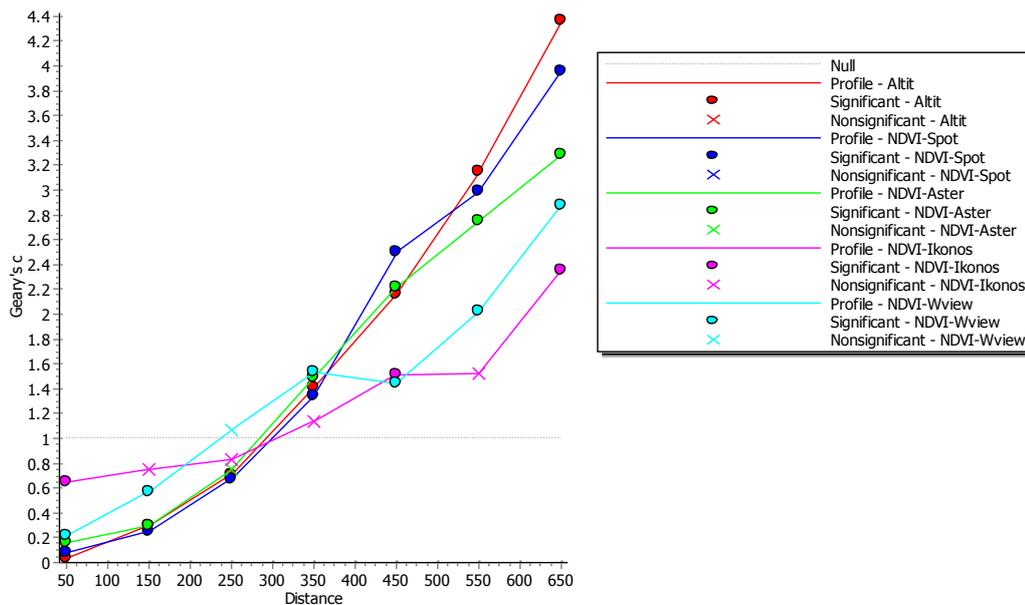
### Índice de Moran y Coeficiente de Geary para Q. Verde BN

Variables	Alcance (m)	Índice de Moran (I)	de p- valor para I	Coeficiente de Geary (C)	p-valor para C	Interpretación
Altitud	200	0.67	0*	0.16	0*	Autocorrelación
NDVI-Spot	200	0.52	2.1121E-11*	0.29	1.9251E-13*	Autocorrelación
NDVI-Aster	100	0.24	0.00926014*	0.49	0.00034818*	Autocorrelación
NDVI-Ikonos	100	0.19	0.02468741*	0.66	0.04842916*	Autocorrelación
NDVI-World View	100	0.57	4.3539E-09*	0.35	5.8608E-07*	Autocorrelación

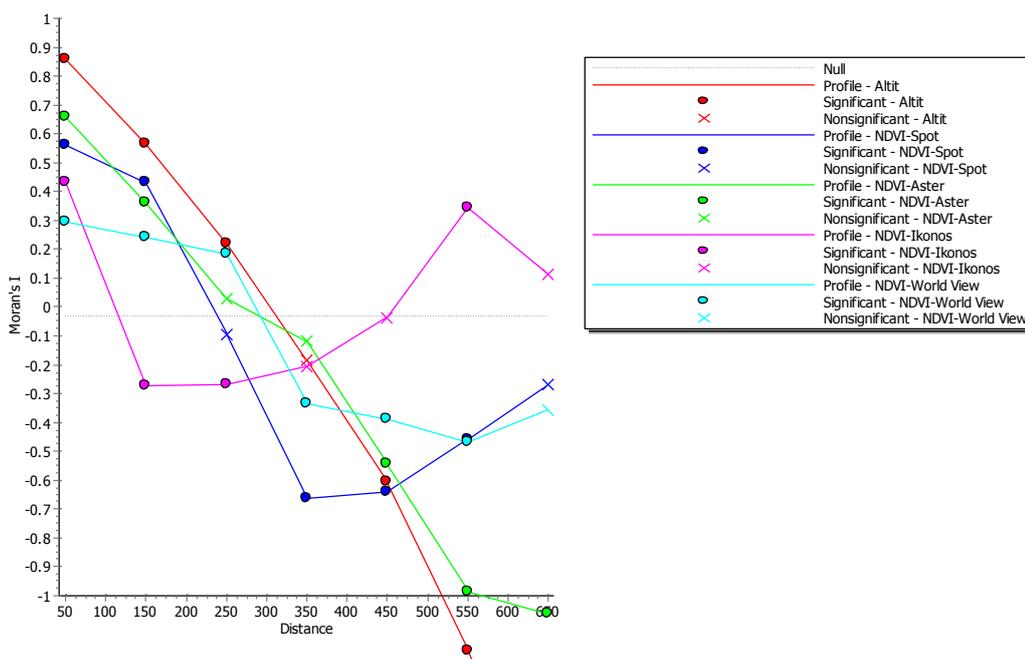
\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). NS no significativo (isotrópicos)



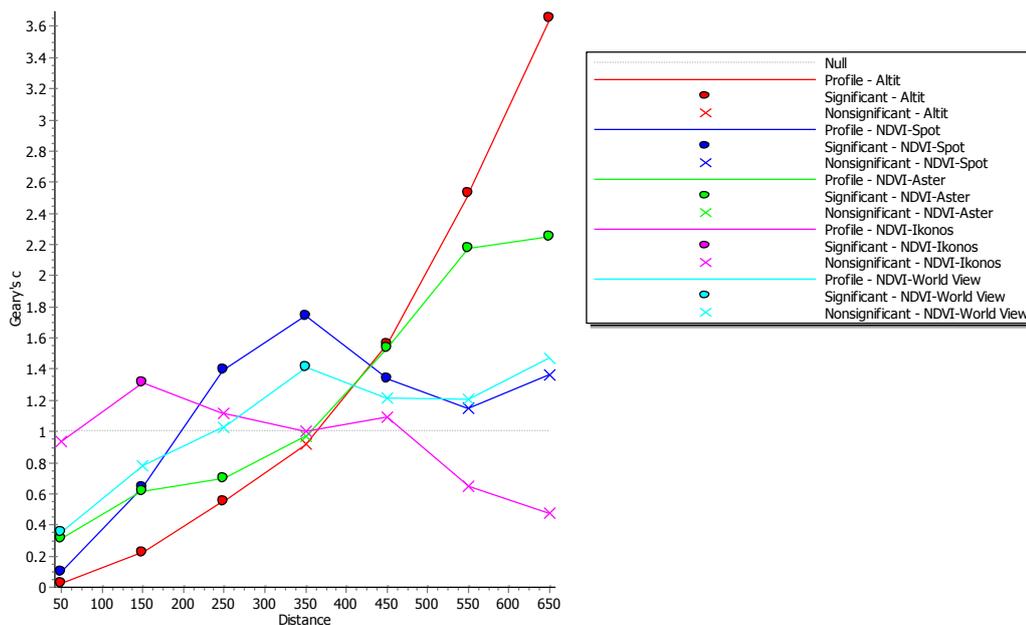
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Lúcumo



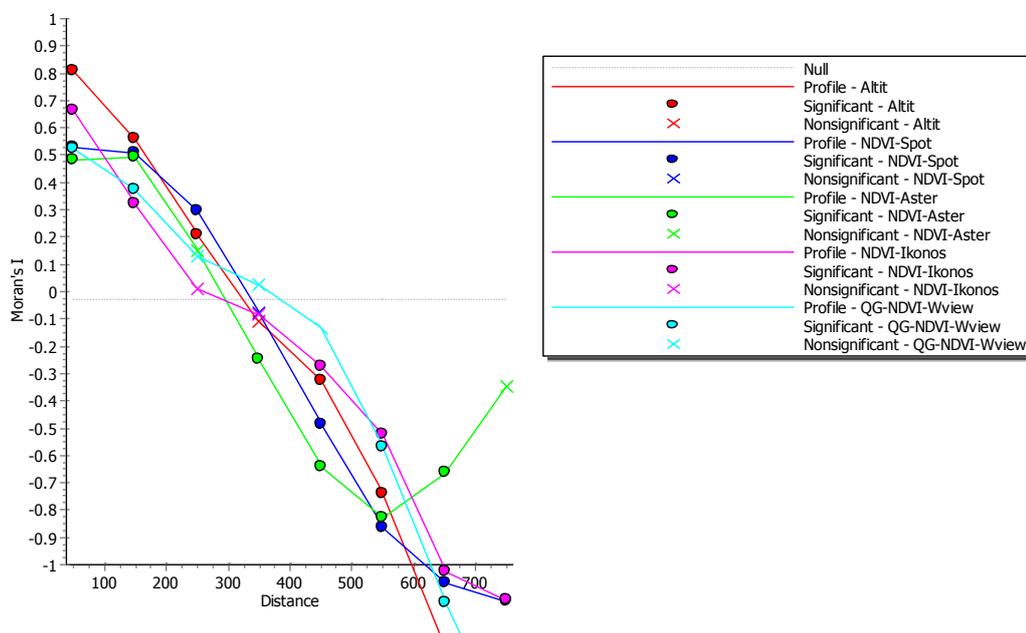
Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Lúcumo



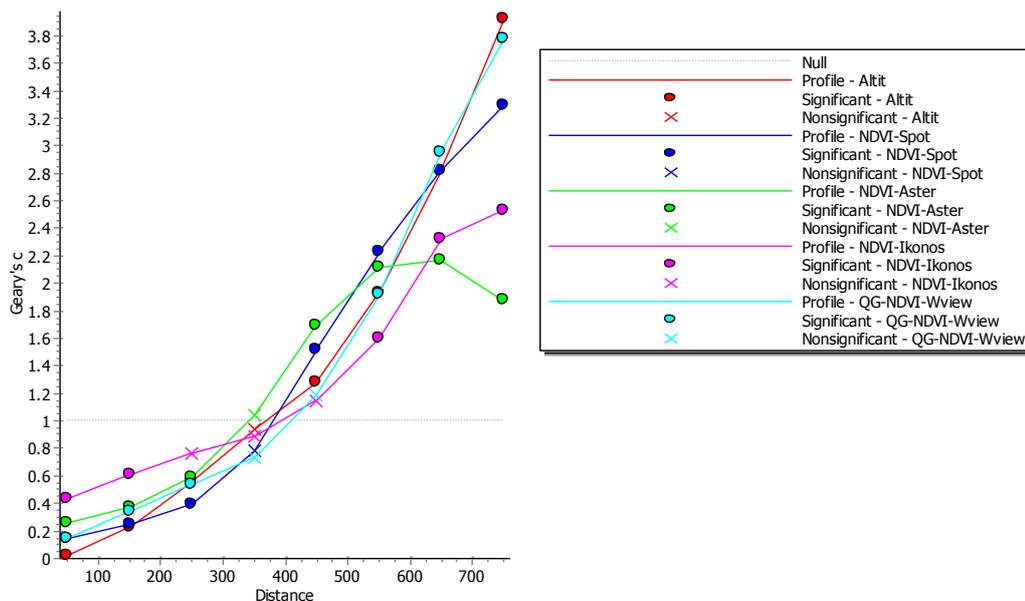
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Puquio



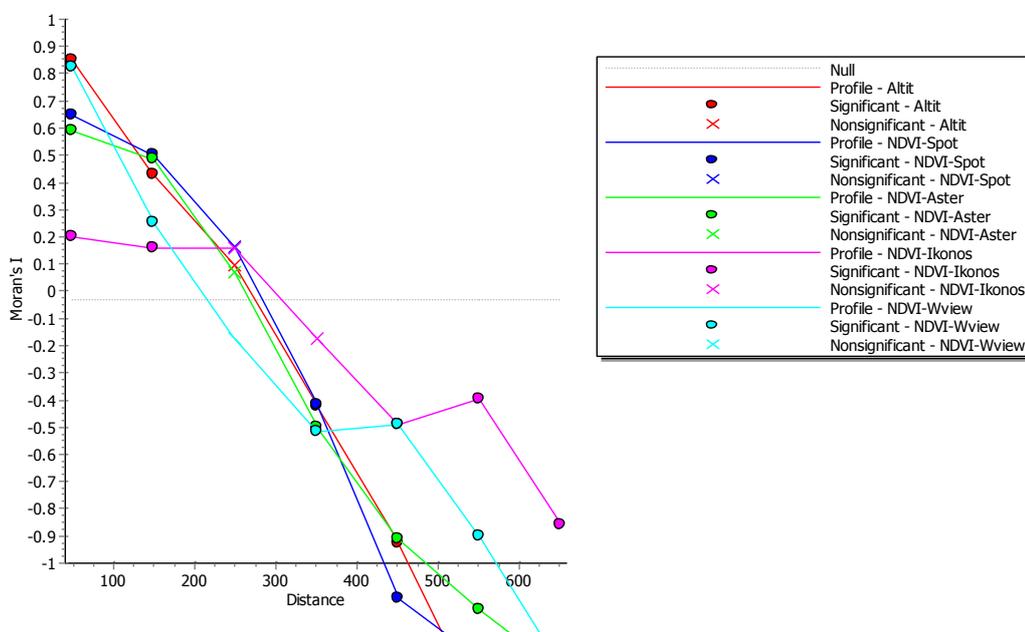
Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Puquio



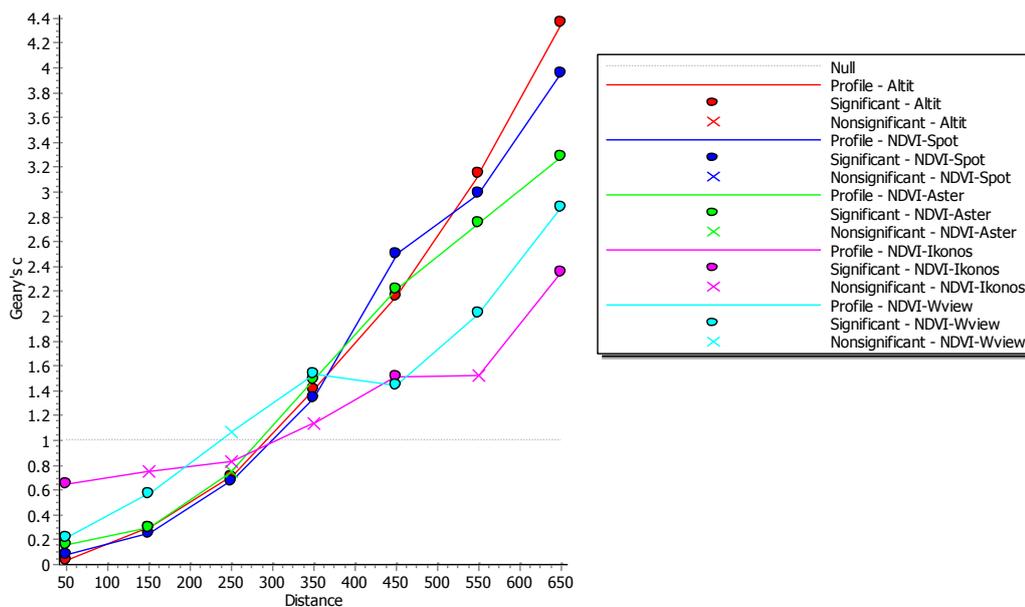
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Guayabo



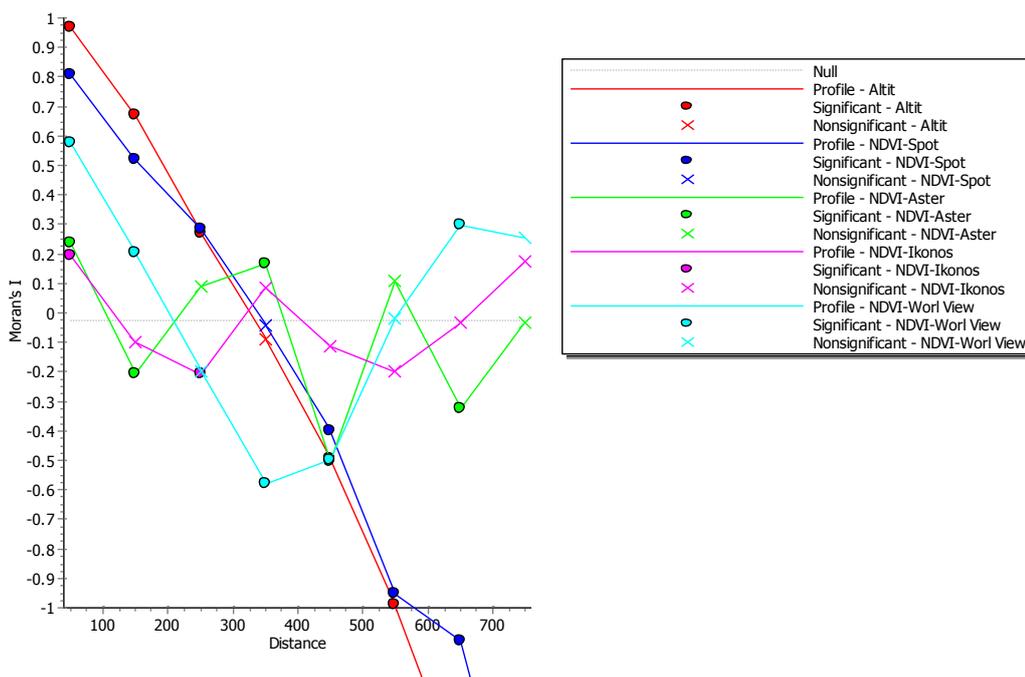
Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Guayabo



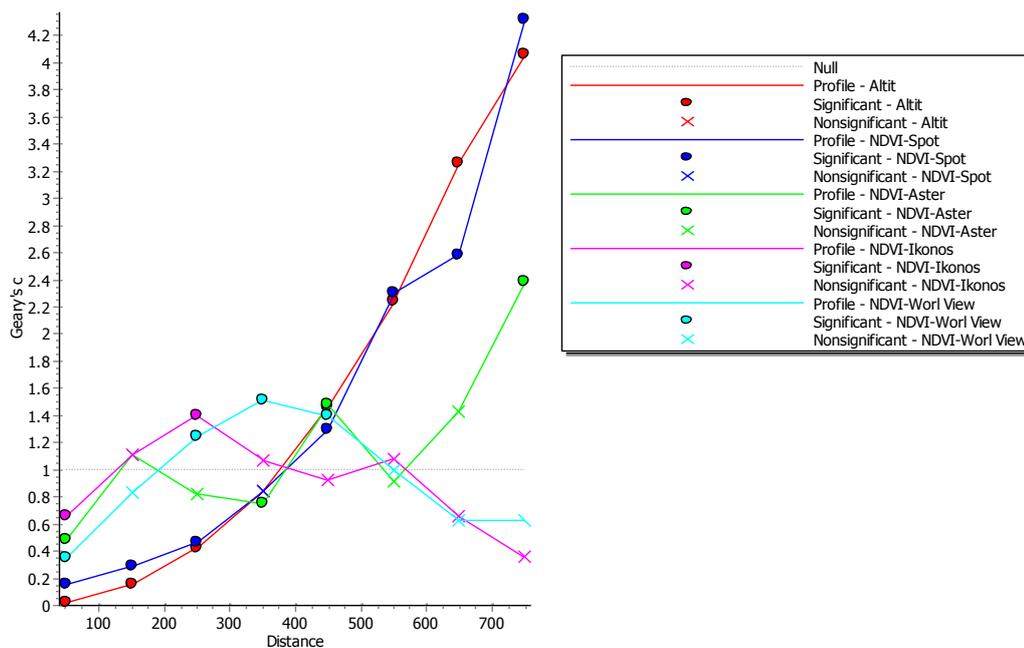
Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Verde BG



Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Verde BG



Correlogramas de Moran para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Verde BN



Correlogramas de Geary para altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview en Q. Verde BN

#### Pruebas de estructura espacial y anisotropía de datos

Se empleó el programa informático PASSaGE y la técnica de correlación angular, propuesto por Simon, 1997, citado por Rosenberg (2011). Este método permite determinar el grado de anisotropía en los datos; y calcula la correlación respecto a la distancia entre pares de puntos proyectados sobre un vector en una dirección específica y la diferencia en los valores asociados con el par de puntos. Si bien la correlación pudiera no ser significativa, este procedimiento siempre hallará una dirección de máxima distancia. El programa informático PASSaGE reporta el valor del “r” máximo, el ángulo de máxima correlación y los p valores. La Tabla 29 muestra los resultados de la prueba.

En la estación seca los datos de cobertura vegetal no presentan anisotropía, es decir no hay algún patrón espacial de orientación angular hacia alguna gradiente. En los datos de NDVI si se observa algo de anisotropía, mucho más en el caso de la altitud,

la cual muestra una anisotropía bien definida, con una determinada orientación angular.

En la estación húmeda sí se presentan gradientes espaciales que hacen anisotrópica la superficie en cuanto a las variables estudiadas: altitud, cobertura vegetal y NDVI Spot. La confirmación de la condición anisotrópica de los datos de las variables en estudio, sobre todo para época húmeda, reduce la aplicabilidad de las pruebas estadísticas que requieren la normalidad e independencia de datos.

Es común asumir que los datos ecológicos provienen de una superficie isotrópica, es decir que corresponden a un mismo patrón espacial en todas direcciones. Sin embargo, ello es una asunción muy forzada sobre todo para las lomas de Atocongo en la cual se observan diferentes patrones espaciales en tanto diferentes direcciones.

#### Prueba de correlación angular para verificar anisotropía

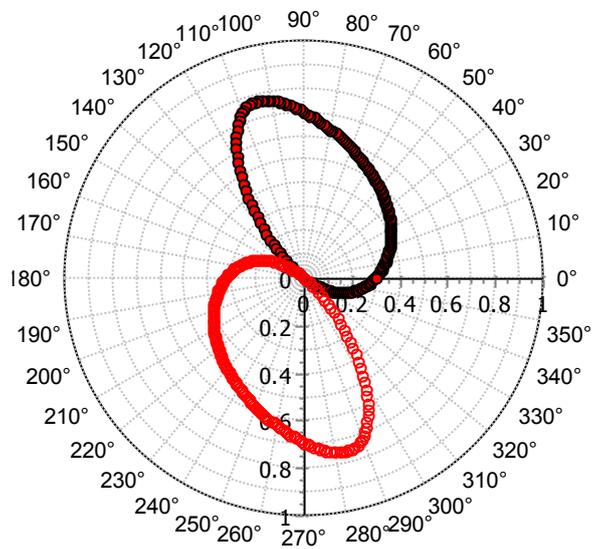
Época	Fecha de datos	de Variables	Máximo r	Angulo (Máximo)	p-valor	Interpretación
Estación seca	Abril 2001	Altitud	0.85	25.83	0.00043*	Autocorrelacionado
		Cobertura vegetal	0.32	328.35	0.52537	No correlacionado
		NDVI Ikonos	0.90	50.30	0.00004*	Autocorrelacionado
	Junio 2002	Altitud	0.79	35.34	0.01207*	Autocorrelacionado
		Cobertura vegetal	0.43	84.94	0.40489	No correlacionado
		NDVI Ikonos	0.24	322.32	0.7615	No correlacionado
Enero 2011	Altitud	0.76	71.10	0.0224*	Autocorrelacionado	
	Cobertura	0.43	9.02	0.4032	No correlacionado	
Estación húmeda	Setiembre del 2000	Altitud	0.76	284.04	0.11476	No correlacionado
		Cobertura vegetal	0.75	78.57	0.12261	No correlacionado
		NDVI Spot	0.51	296.55	0.47035	No correlacionado
	Setiembre del 2000 (generados)	Altitud	0.67	53.48	0*	Autocorrelacionado
		Cobertura vegetal	0.63	2.67	0*	Autocorrelacionado
		NDVI Spot	0.39	20.81	0.00092	Autocorrelacionado
	Setiembre del 2001	Altitud	0.86	316.55	0.00137*	Autocorrelacionado
		Cobertura vegetal	0.87	27.98	0.00088*	Autocorrelacionado
		NDVI Spot	0.84	49.52	0.00219*	Autocorrelacionado
	Octubre del 2002	Altitud	1.00	354.20	0.00089*	Autocorrelacionado
		Cobertura vegetal	0.97	347.86	0.04947*	Autocorrelacionado

	NDVI Spot	1.00	332.45	0.00532*	Autocorrelacionado
Diciembre del 2002	Altitud	0.86	316.55	0.00137*	Autocorrelacionado
	Cobertura vegetal	0.81	74.72	0.0044*	Autocorrelacionado
	NDVI Spot	0.83	50.17	0.00281*	Autocorrelacionado
Setiembre del 2007	Altitud	0.76	71.10	0.02124*	Autocorrelacionado
	Cobertura vegetal	0.38	39.49	0.49105	No correlacionado
Diciembre del 2007	Altitud	0.76	71.10	0.02124*	Autocorrelacionado
	Cobertura vegetal	0.43	9.02	0.40323	No correlacionado

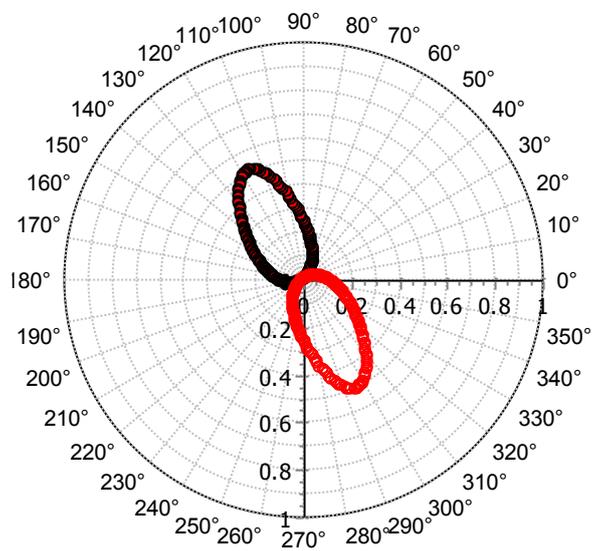
H<sub>0</sub>: Los datos son isotrópicos -no están correlacionados angularmente- (Si p-valor es mayor a 0.05 se acepta la hipótesis H<sub>0</sub> y se rechaza la hipótesis alterna. Si p-valor es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna

H<sub>A</sub>: Los datos son anisotrópicos -están correlacionados angularmente- (Si p-valor es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna

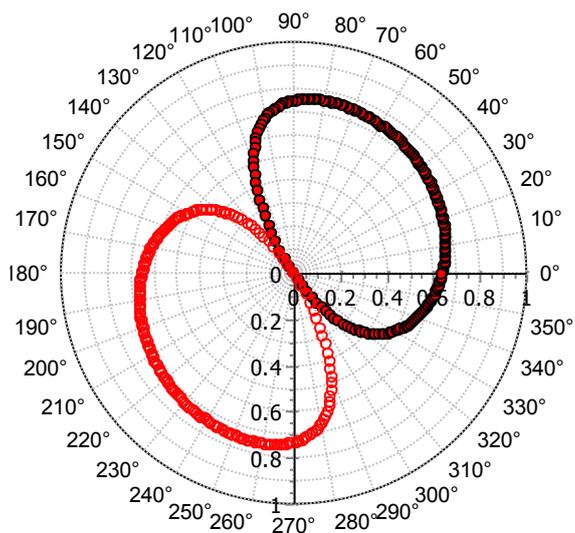
## Anisotropía en datos de setiembre del 2000



## Correlación angular de los valores de altitud (msnm) para setiembre del 2000

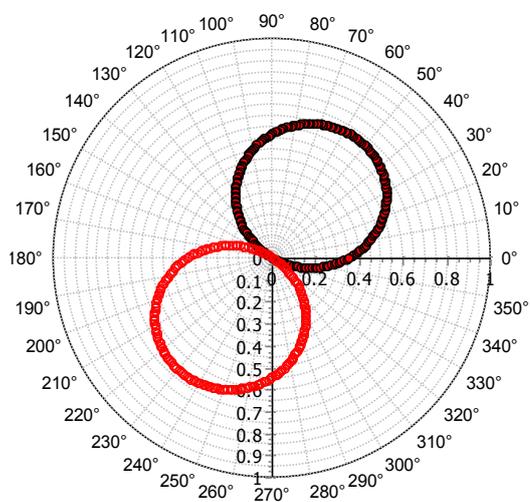


## Correlación angular de los valores de NDVI para setiembre del 2000

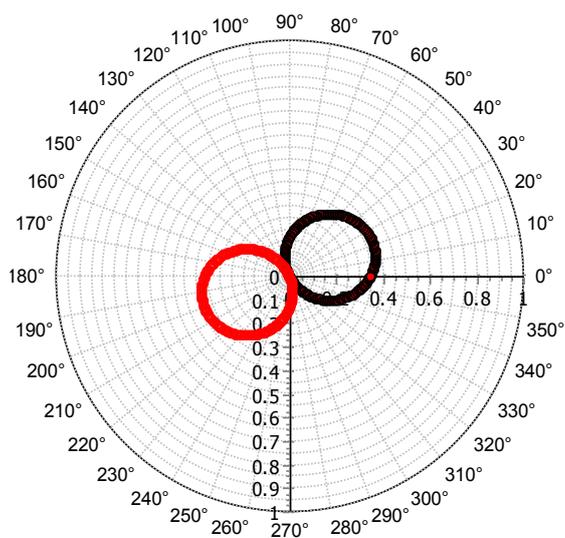


Correlación angular de los valores de cobertura vegetal (%) para setiembre del 2000

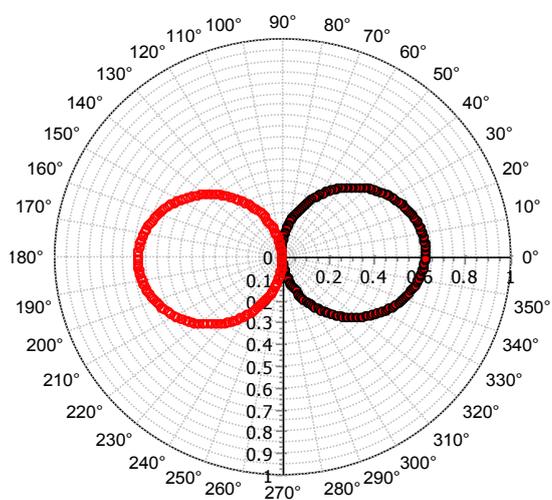
Anisotropía en datos de setiembre del 2000 (generados por geoestadística)



Correlación angular de los valores de altitud para setiembre del 2000 (generados)

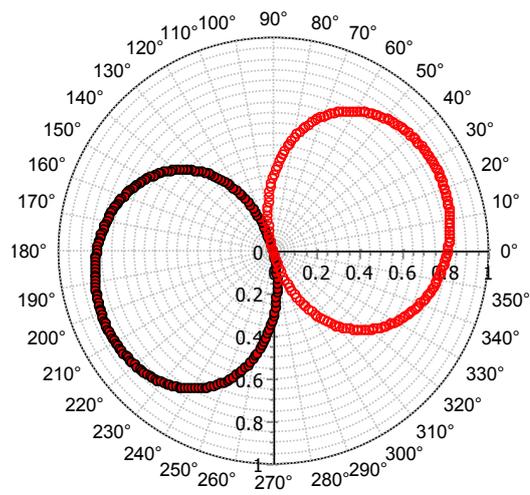


Correlación angular de los valores de NDVI para setiembre del 2000 (generados)

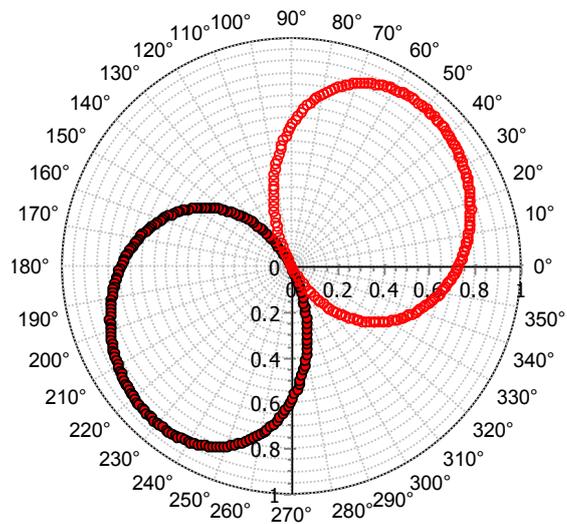


Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para setiembre del 2000 (generados)

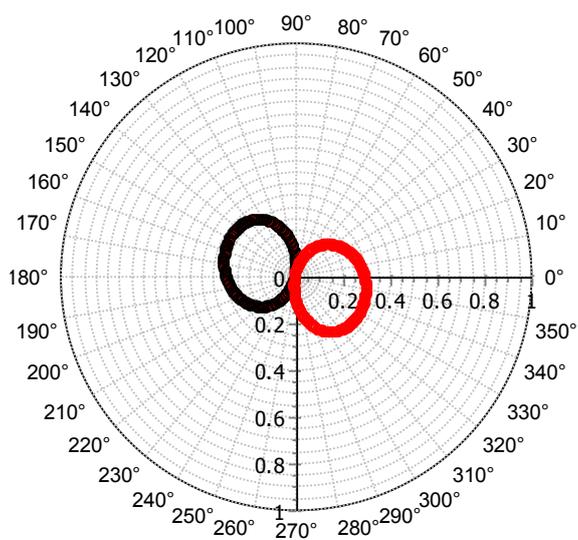
Anisotropía en datos de abril 2001



Correlación angular de los valores de altitud (msnm) para abril 2001

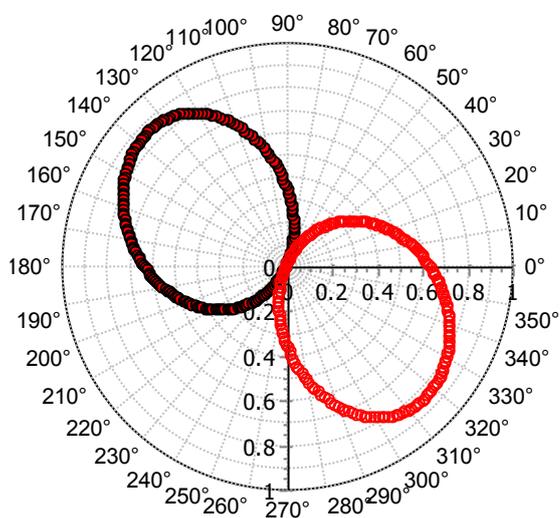


Correlación angular de los valores de NDVI para abril 2001

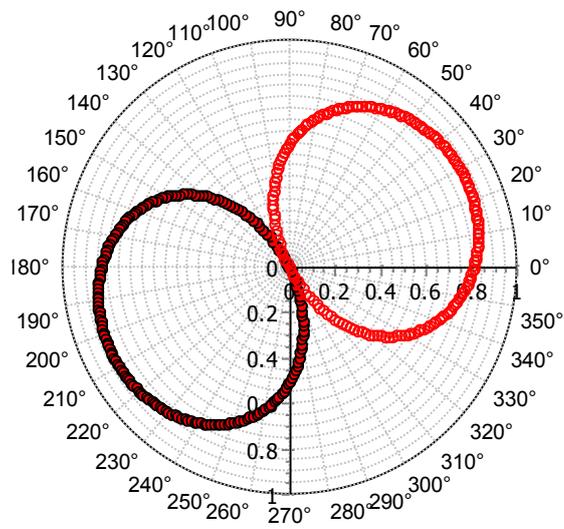


Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para abril 2001

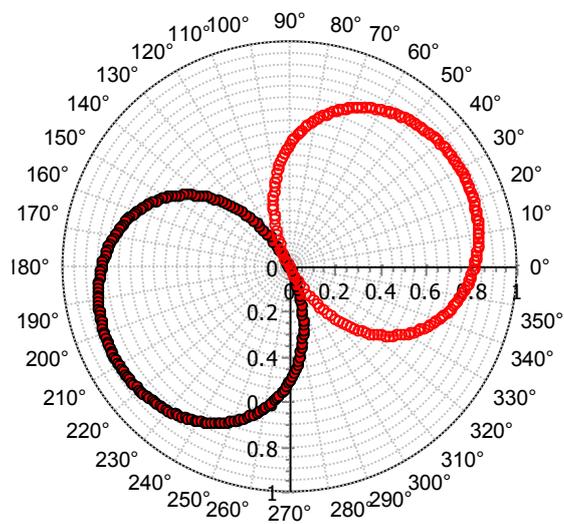
Anisotropía en datos de setiembre del 2001



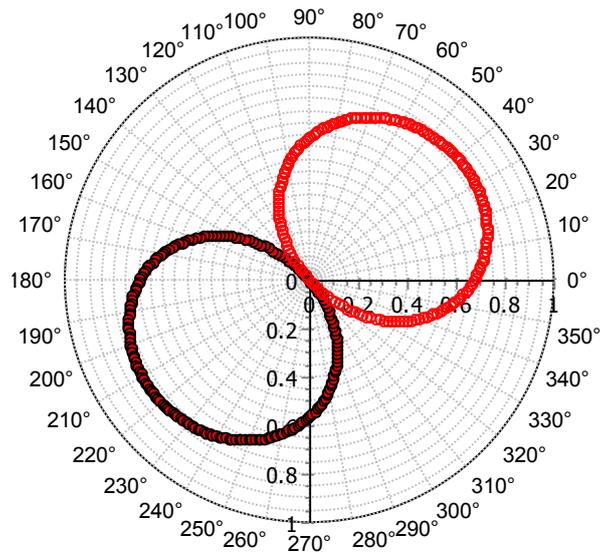
Correlación angular de los valores de altitud para setiembre del 2001



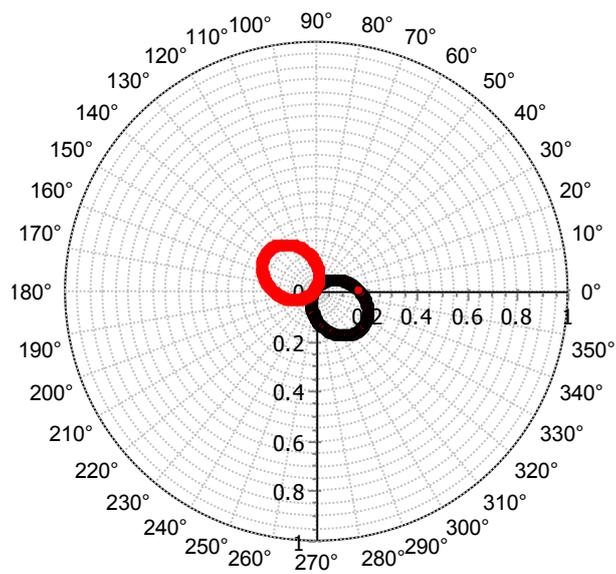
Correlación angular de los valores de NDVI para setiembre del 2001



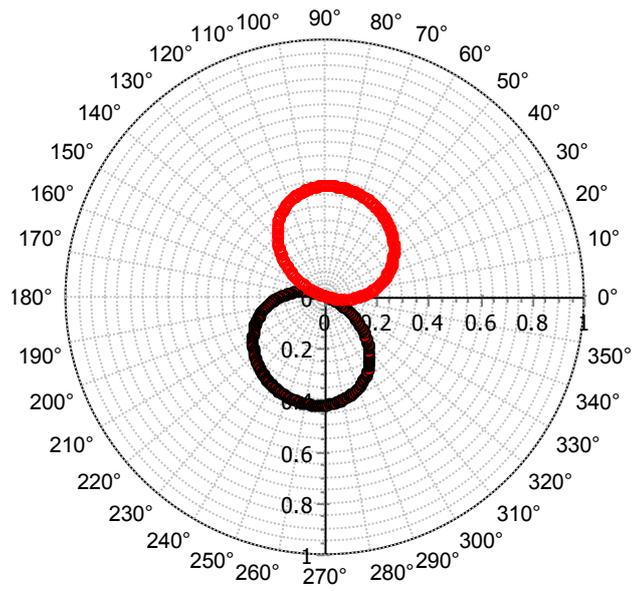
Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para setiembre del 2001  
Anisotropía en datos de junio del 2002



Correlación angular de los valores de altitud (msnm) para junio 2002

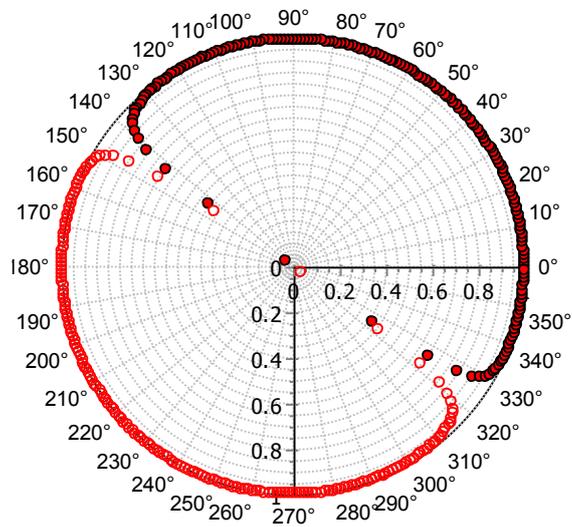


Correlación angular de los valores de NDVI para junio del 2002

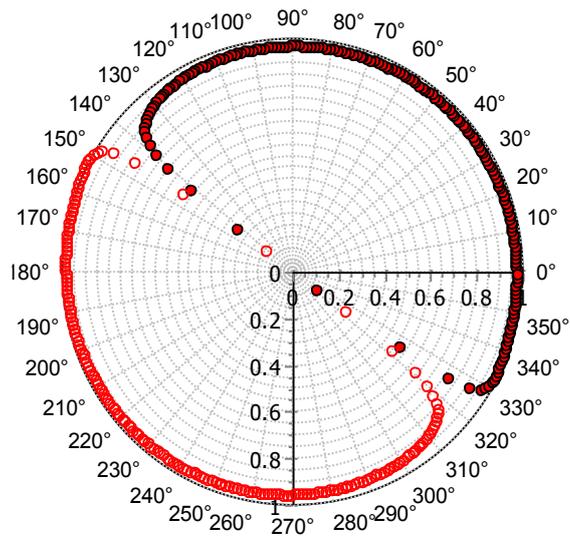


Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para junio del 2002

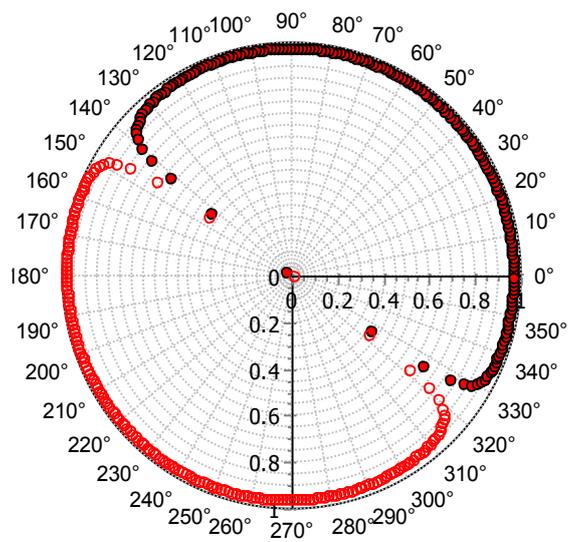
Anisotropía en datos de octubre del 2002



Correlación angular de los valores de altitud para octubre del 2002

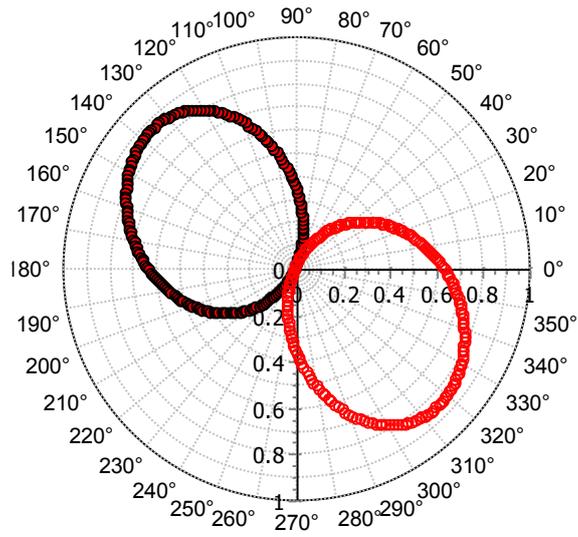


Correlación angular de los valores de NDVI para octubre del 2002

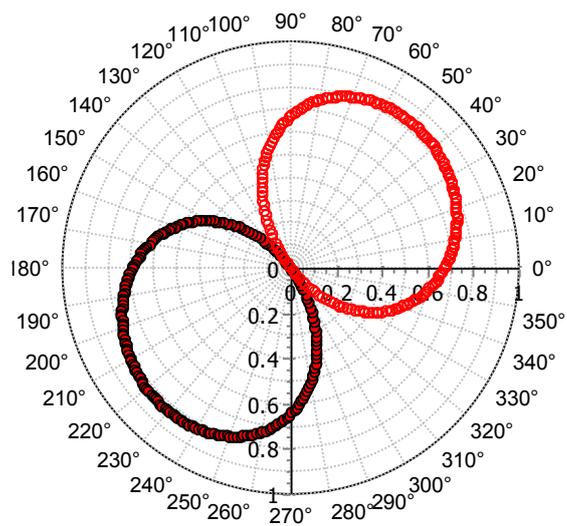


Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para octubre del 2002

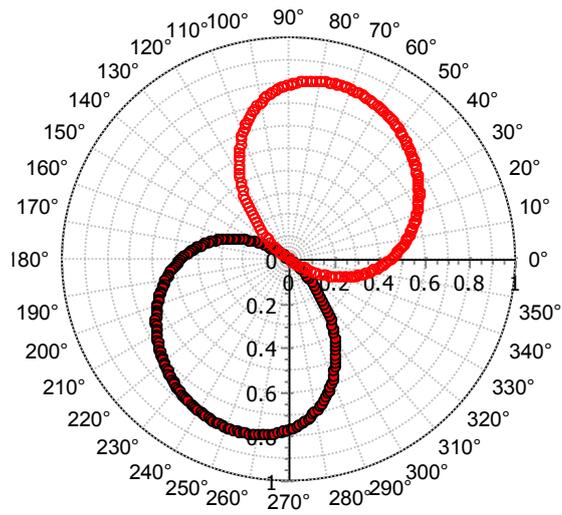
Anisotropía en datos de diciembre del 2002



Correlación angular de los valores de altitud para diciembre del 2002

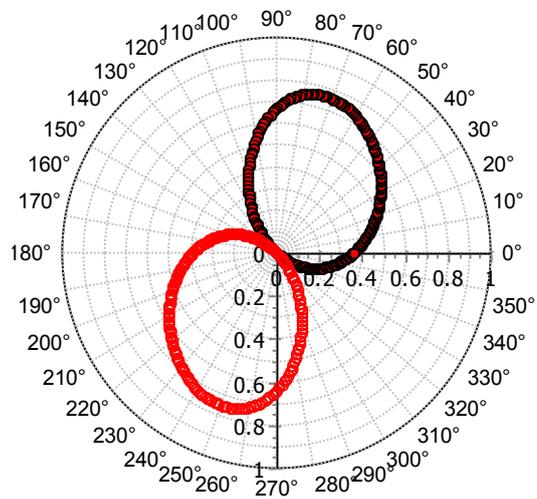


Correlación angular de los valores de NDVI para diciembre del 2002

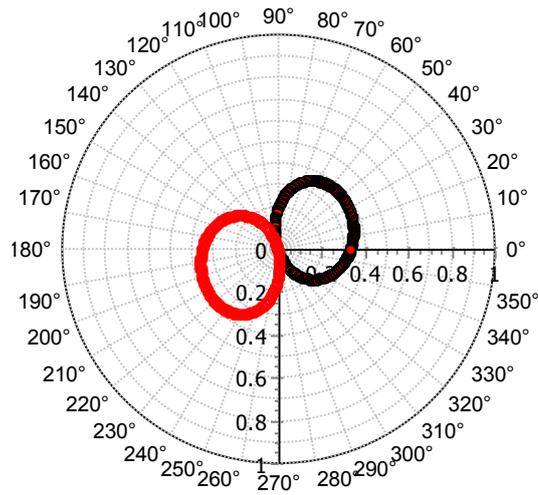


Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para diciembre del 2002

Anisotropía en datos de setiembre del 2007

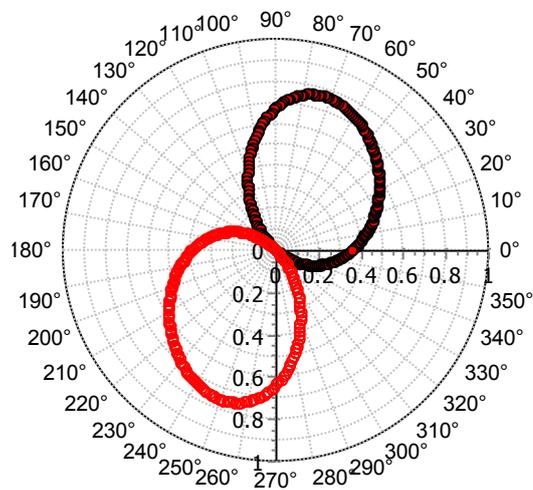


Correlación angular de los valores de altitud para setiembre del 2007

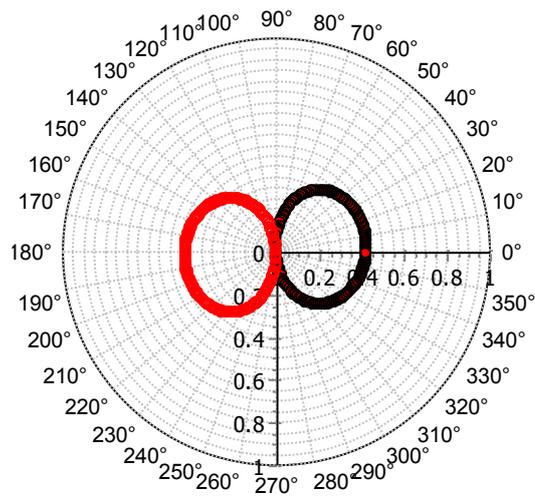


Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para setiembre del 2007

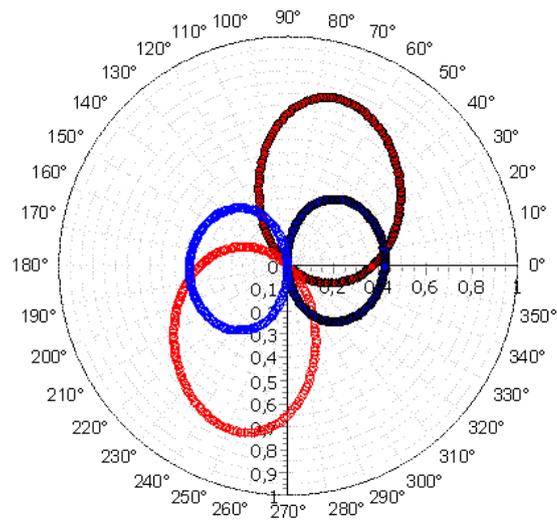
Anisotropía en datos de diciembre del 2007



Correlación angular de los valores de altitud para diciembre del 2007



Correlación angular de los valores de cobertura vegetal para diciembre del 2007



Correlación angular de los valores de altitud (rojo) y cobertura vegetal (azul) para enero del 2011

Anisotropía en datos de gradientes de NDVI y altitud

La localización del transecto altitudinal, para conocer el comportamiento del NDVI, siguiendo el fondo del valle implicaba desde su concepción una determinada orientación que implicaba la presencia de anisotropía. Esta conjetura se confirma con los resultados que se muestran en las Tablas 30 al 34 y las Figuras 66 a 70.

#### Correlación angular para Q. Lúcumo

Variabes	Máximo r	Angulo (Máximo)	p-valor	Interpretación
Altitud	1.00	345.28	0.0*	Autocorrelacionado
NDVI-Spot	0.91	315.43	0.0*	Autocorrelacionado
NDVI-Aster	0.89	34.96	0.0*	Autocorrelacionado
NDVI-Landsat	0.28	328.96	0.18855	No correlacionado
NDVI-Ikonos	0.60	316.79	0.00014*	Autocorrelacionado
NDVI-WView	0.81	323.57	0.0*	Autocorrelacionado

\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). No correlacionado (isotrópicos)

#### Correlación angular para Q. Puquio

Variabes	Máximo r	Angulo (Máximo)	p-valor	Interpretación
Altitud	0.99	319.65	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Spot	0.64	63.71	0.0006*	Autocorrelacionado
NDVI-Aster	0.80	53.18	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Ikonos	0.65	80.44	0.00052*	Autocorrelacionado
NDVI-World View	0.62	281.21	0.00108*	Autocorrelacionado

\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). No correlacionado (isotrópicos)

#### Correlación angular para Q. Guayabo

Variabes	Máximo r	Angulo (Máximo)	p-valor	Interpretación
Altitud	0.99	89.59	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Spot	0.92	351.76	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Aster	0.83	340.51	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Ikonos	0.79	272.14	0*	Autocorrelacionado
NDVI-World View	0.91	354.50	0*	Autocorrelacionado

\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). No correlacionado (isotrópicos)

## Correlación angular para Q. Verde BG

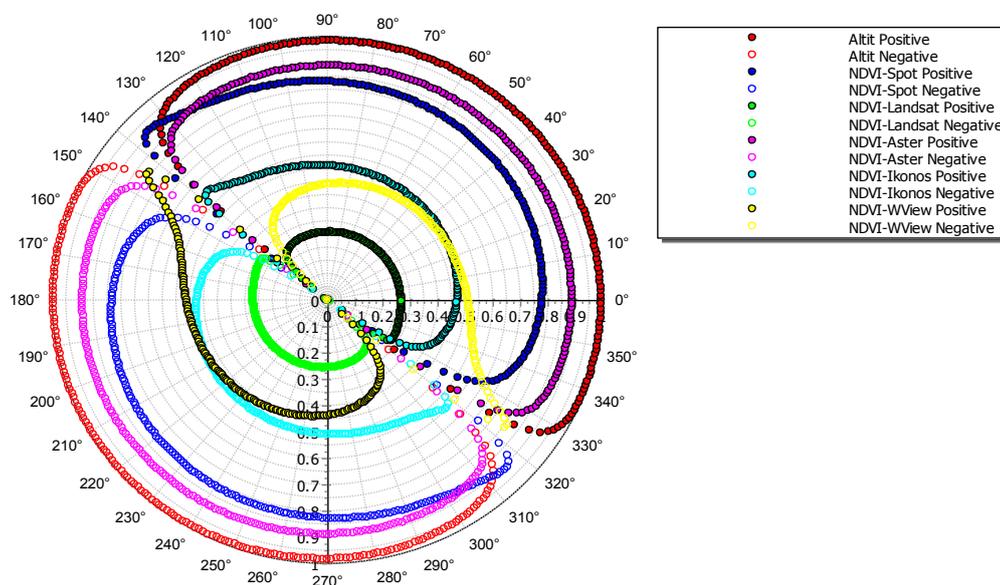
Variables	Máximo r	Angulo (Máximo)	p-valor	Interpretación
Altitud	1.00	37.31	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Spot	0.95	311.67	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Aster	0.88	309.05	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Ikonos	0.60	321.07	0.00226*	Autocorrelacionado
NDVI-World View	0.87	64.67	0*	Autocorrelacionado

\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). No correlacionado (isotrópicos)

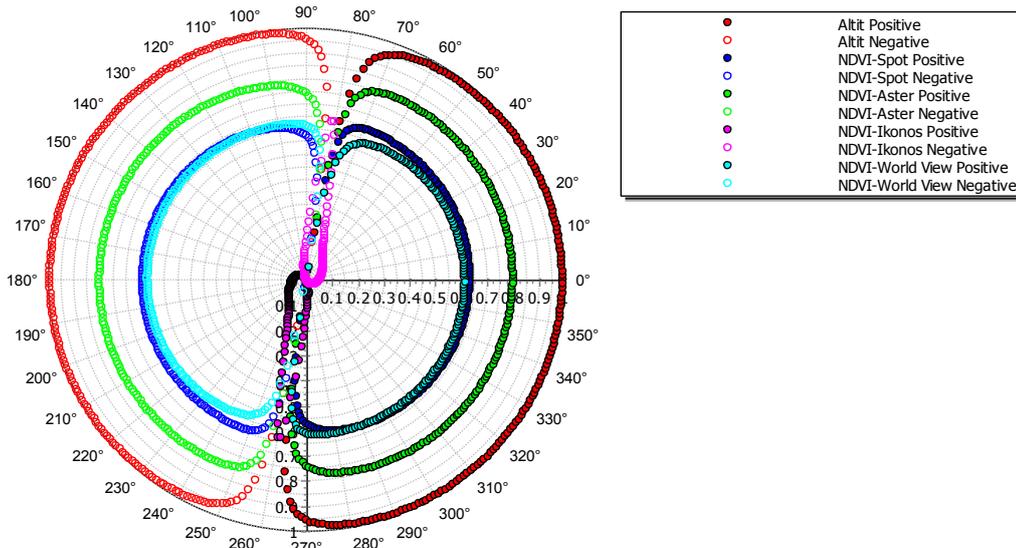
## Correlación angular para Q. Verde BN

Variables	Máximo r	Angulo (Máximo)	p-valor	Interpretación
Altitud	1.00	331.31	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Spot	0.93	271.17	0*	Autocorrelacionado
NDVI-Aster	0.46	49.74	0.01629*	Autocorrelacionado
NDVI-Ikonos	0.45	41.02	0.02127*	Autocorrelacionado
NDVI-World View	0.51	55.02	0.00547*	Autocorrelacionado

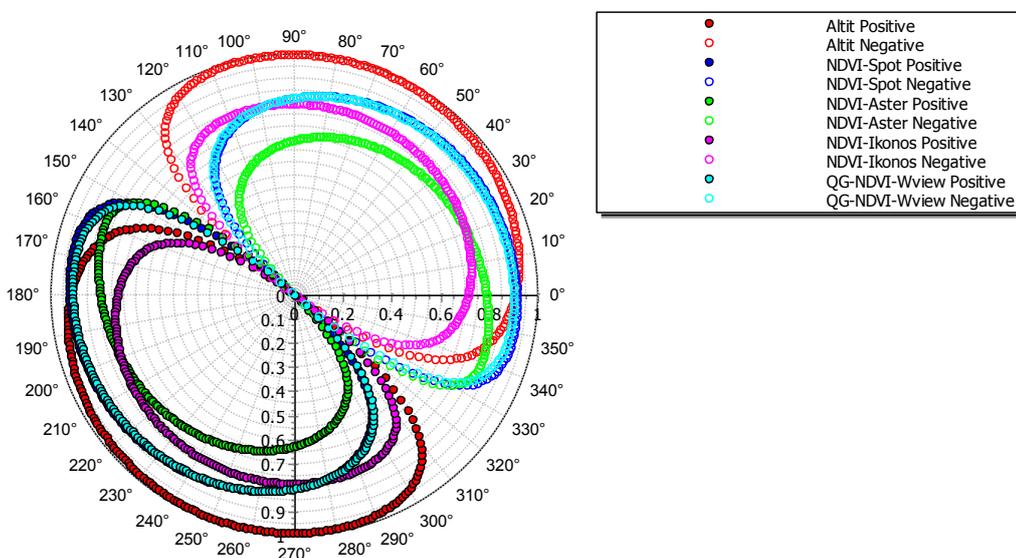
\* Significación estadística (autocorrelacionados, anisotrópicos). No correlacionado (isotrópicos)



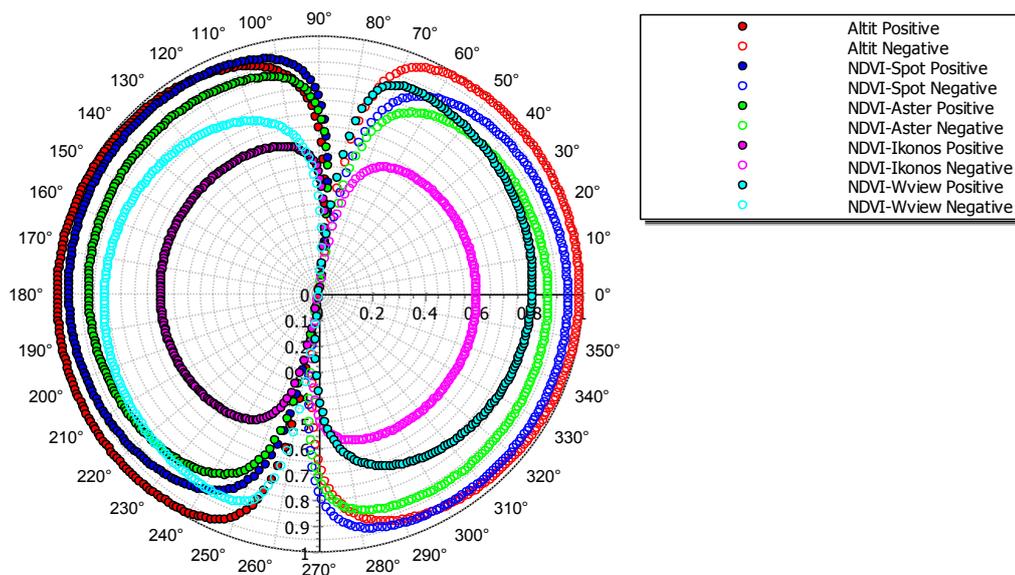
Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Landsat, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Lúcumo



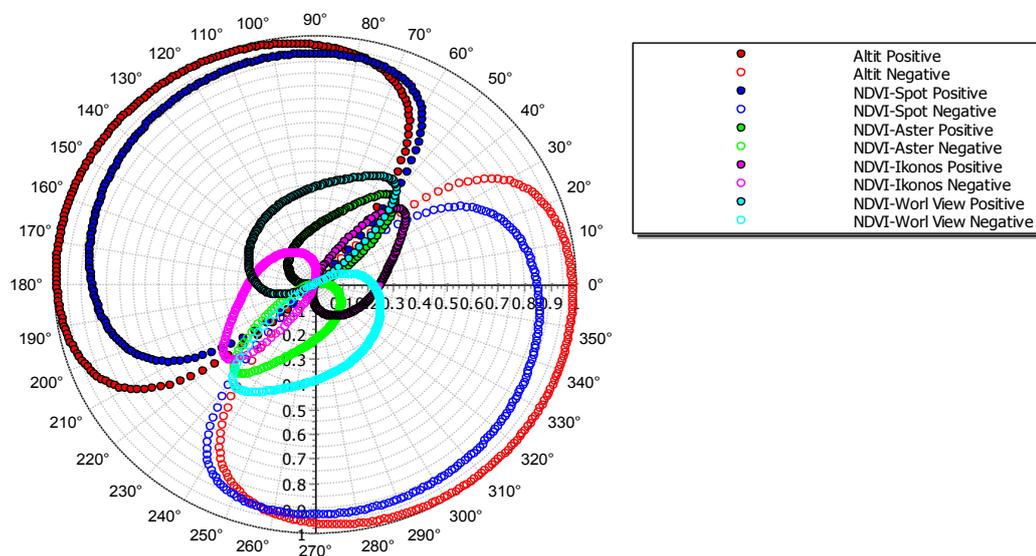
Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Puquio



Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Landsat, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Guayabo



Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Verde BG



Correlación angular de los valores de altitud y NDVI Spot, Landsat, Aster, Ikonos y Worldview para la Q. Verde BN

En todos los casos, la altitud muestra valores elevados de correlación angular, es decir presenta una tendencia espacial hacia una determinada orientación; de igual

manera, los NDVI Spot para el caso de todas las quebradas evaluadas; también presentan valores elevado de correlación angular.

Luego de la aplicación de la prueba de correlación angular, se puede decir que los datos de las variables altitud y NDVI, y por implicancia la cobertura vegetal, tienen patrones espaciales orientados hacia una gradiente. Es importante esta anotación pues es una restricción para las pruebas estadísticas y técnicas de interpolación de datos que parten de la premisa de estacionariedad de datos (datos isotrópicos), es decir que exigen que las variaciones sean constantes en todas las direcciones, lo cual no es el caso de las variables estudiadas.

#### **4.1.2 Modelamiento de datos**

En esta sección se muestran los resultados del análisis de regresión lineal y curvilínea, test de Mantel y modelos lineales generalizados (GLM) para los tres tipos de relaciones estudiadas (cobertura vegetal como variable explicativa versus NDVI como variable dependiente, altitud como variable explicativa versus cobertura vegetal como variable dependiente y altitud como variable explicativa versus NDVI como variable dependiente).

El modelo teórico propuesto para la relación de cobertura vegetal versus NDVI fue lineal; y por ello se aplicó una regresión lineal y el test de Mantel. En cambio, para las otras dos relaciones, altitud vs cobertura vegetal y altitud vs NDVI el modelo teórico planteado fue unimodal por ello se aplicó una regresión polinomial cuadrática y un GLM también cuadrático.

Los resultados se presentan ordenados por temporadas seca y húmeda, y por años. Para la época seca correspondió los inventarios de abril 2001 y junio del 2002; los restantes inventarios (setiembre 2000, setiembre 2001, octubre 2002, diciembre 2002, setiembre 2007 y diciembre 2007) fueron representativos de la época húmeda.

Resultados de regresión lineal entre variables

Las Tablas 35 al 37 presentan los resultados de la regresión lineal entre las variables estudiadas. Tales tablas muestran los datos de  $r^2$ , análisis de varianza, prueba de Durbin-Watson y la ecuación de ajuste.

En general, la variable cobertura vegetal, en la época de verano, se mostró aleatoria respecto a la altitud pues no se observó alguna gradiente o tendencia definida determinada por esta variable. De igual manera, no se observó alguna relación del NDVI Ikonos respecto a la cobertura vegetal.

Solo en el caso del NDVI Ikonos con relación a la altitud, en los datos de abril del 2001, se notó una relación lineal del orden de  $r^2 = 0.557$ . Tales datos fueron transformados vía el método de Box-Cox (Lambda -0.245) y luego se aplicó la regresión lineal simple y luego otra bajo el Modelo de Cochrane-Orcutt puesto que la Prueba de Durbin - Watson indicó una autocorrelación.

Para el caso de los datos de invierno, se confirma el supuesto teórico acerca de la existencia de una relación lineal entre la cobertura vegetal y el NDVI Spot. En cuatro juegos de datos de los cinco evaluados se observó un ajuste lineal significativo (ver Tabla 35), con  $r^2$  del orden 0.508 para setiembre del 2001,  $r^2 = 0.929$  para octubre del 2002 y  $r^2 = 0.761$  para diciembre del 2002. Si bien para los datos de setiembre del 2000 no se observó alguna gradiente del NDVI Spot determinado por la cobertura vegetal, en cambio si se notó una relación lineal para sus datos interpolados (mediante geoestadística), con un  $r^2 = 0.439$ .

Regresión lineal para la cobertura, altitud y NDVI Ikonos de época seca en lomas de Atocongo, 2001 a 2002

Variables regresionadas	Grado de ajuste del modelo: $r^2$	Análisis de varianza			Prueba de Durbin Watson		Modelo
		CMR: CME:	F calculado: F tabular:	Pr > F	U	P-valor	
Abril del 2001							
Cobertura vegetal vs NDVI Ikonos Transformación Box-Cox Lambda -0.245	0.051	0.217 0.311	0.697 4.667	0.419 NS	-	-	-
Altitud vs Cobertura vegetal Transformación Box-Cox Lambda -0.133	0.169	0.462 0.175	2.635 4.667	0.128 NS	-	-	-
Altitud vs NDVI Ikonos Transformación Box-Cox Lambda -0.245	0.545	2.323 0.149	15.592 4.667	0.002 *	1.159	0.040*	-
Modelo de Cochrane-Orcutt para Altitud vs NDVI Ikonos Transformación Box-Cox Lambda -0.245 Rho 0.295	0.557	1.619 0.107	15.097 4.747	0.002 *	-	-	Transformado NDVI-Ikonos = -3.7 + 0.004 Altitud*
Junio del 2002							
Cobertura vegetal vs NDVI Ikonos	0.143	0.009 0.005	1.665 4.965	0.226 NS	-	-	-
Altitud vs cobertura vegetal	0.025	31.417 122.153	0.257 4.965	0.623 NS	-	-	-
Altitud vs NDVI Ikonos	0.048	0.003 0.006	0.502 4.965	0.495 NS	-	-	-

Si bien el modelo teórico esperado para la variable cobertura vegetal explicada por la altitud era una curva unimodal, cabía la posibilidad de obtener relaciones lineales; y ese fue el caso de la relación cobertura vegetal y altitud como regresor, para datos de invierno, setiembre del 2000 ( $r^2 = 0.517$  y  $r^2 = 0.268$  para la interpolación) y para datos de octubre del 2002 ( $r^2 = 0.954$ ).

De la misma manera, en relación con la anotación del párrafo anterior, para el caso de NDVI Spot con relación a la altitud se observó  $r^2 = 0.539$  para los datos interpolados a partir de los datos de setiembre del 2000 y  $r^2 = 0.967$  para los datos de octubre del 2002.

## Regresión lineal para cobertura, altitud y NDVI en época húmeda

Fecha y regresionadas	variables	Grado de ajuste: $r^2$	Análisis de varianza			Prueba de Durbin Watson		Modelo
			CMR: CME:	F calculado: F tabular:	Pr > F	U	p-valor	
<b>Setiembre del 2000</b>								
Cobertura vegetal vs NDVI Ikonos		0.0002	0.00001 0.066	0.001 5.987	0.975 <sup>NS</sup>	-	-	-
Altitud vs cobertura vegetal		0.517	877.311 136.524	6.426 5.987	0.044 *	1.825	0.400 <sup>NS</sup>	Cobertura = 35.08+9.25E-02 Altitud
Altitud vs NDVI Ikonos		0.292	0.019 0.008	2.481 5.987	0.166 <sup>NS</sup>	-	-	-
<b>Setiembre del 2000 (malla)</b>								
Cobertura vegetal vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda 0.314		0.439	3.858 0.056	68.927 3.960	< 0.0001 *	-	-	Transformado NDVI Spot = -1.87+8.75E-03 Cobertura
Altitud vs Cobertura vegetal (no hay transformación)		0.268	13520.104 419.210	32.251 3.960	< 0.0001 *	-	-	Cobertura = 2.9+0.12 Altitud
Altitud vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda 0.314		0.539	4.738 0.046	103.036 3.960	< 0.0001 *	-	-	Transformado NDVI Spot = -2.25+2.16E-03 Altitud
<b>Setiembre del 2001</b>								
Cobertura vegetal vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda - 0.679		0.508	12.043 1.060	11.357 4.844	0.006 *	2.600	0.874 <sup>NS</sup>	Transformado NDVI-Spot = -6.32+7.45E-02 ICL
Altitud vs Cobertura vegetal Transformación Box-Cox Lambda 0.451		0.250	10.450 2.845	3.673 4.844	0.082 <sup>NS</sup>	-	-	-
Altitud vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda - 0.679		0.137	3.239 1.861	1.741 4.844	0.214 <sup>NS</sup>	-	-	-
<b>Octubre del 2002</b>								
Cobertura vegetal vs NDVI Spot		0.929	0.061 0.002	39.155 10.13	0.008 *	2.532	0.766 <sup>NS</sup>	NDVI Spot = -1.25E-02+5.64E-03 Cobertura
Altitud vs cobertura vegetal		0.954	1827.296 29.301	62.362 10.13	0.004 *			Cobertura = - 36.79+0.26 Altitud
Altitud vs NDVI Spot		0.967	0.063 0.001	87.330 10.13	0.003 *			NDVI Spot = - 0.24+1.56E-03 Altitud
<b>Diciembre del 2002</b>								
Cobertura vegetal vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda -1.237		0.761	102.873 3.594	28.623 5.117	0.000 *	2.981	0.965 <sup>NS</sup>	Transformado NDVI-Spot = -14.68 + 0.34 Cobertura
Altitud vs Cobertura vegetal Transformación Box-Cox Lambda -1.851		0.206	0.000 0.000	2.339 5.117	0.161 <sup>NS</sup>	-	-	-
Altitud vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda -1.237		0.246	33.266 11.328	2.937 5.117	0.121 <sup>NS</sup>	-	-	-

Regresión lineal para la cobertura, altitud y NDVI Spot de época húmeda en lomas de Atocongo, año 2007

Fecha y variables regresionadas	Grado de ajuste del modelo: $r^2$	Análisis de varianza			Prueba de Durbin Watson		Modelo
		CMR: CME:	F calculado: F tabular:	Pr > F	U	p-valor	
<b>Setiembre del 2007</b>							
Altitud vs cobertura vegetal	0.201	286.835 114.211	2.511 4.965	0.144 <sup>NS</sup>	-	-	-
Modelo de Cochrane-Orcutt para Altitud vs cobertura vegetal rho -0.215	0.359	560.595 111.258	5.039 5.117	0.051 <sup>NS</sup>	-	-	-
<b>Diciembre del 2007</b>							
Altitud vs Cobertura vegetal Transformación Box-Cox Lambda 0.354V	0.169	6.302 3.108	2.028 4.965	0.185 <sup>NS</sup>	-	-	-

En los datos de setiembre del 2001 y diciembre del 2002 no se presentaron comportamientos lineales asociados con la gradiente altitudinal, tanto para el caso de la cobertura vegetal como del NDVI Spot; tampoco se presentaron comportamiento unimodales. De la misma manera, los datos de setiembre del 2007 y diciembre del 2007 no mostraron mayor relación de la cobertura vegetal respecto a la altitud.

Aunque con un criterio flexible, podría también tomarse en cuenta alguna relación entre la cobertura vegetal (transformada vía Box-Cox Lambda 0.451) en relación con la altitud, para los datos de setiembre del 2001. El valor de significación de la regresión lineal aludida es igual p-valor = 0.082. Bajo un criterio menos conservador, con un 8% se podría considerar que hay alguna relación entre la cobertura vegetal y la altitud, aunque de menor magnitud dado el bajo  $r^2 = 0.25$ .

#### Resultados del análisis mediante el test de Mantel

Dado que otros factores como la distribución espacial de los datos podrían estar influyendo en la relación de la cobertura y el NDVI se decidió incluir un análisis de correlación entre las matrices de distancia de las mencionadas variables. Existen métodos para incorporar la estructura espacial en el análisis de datos multivariantes, unos basados en ordenaciones y otros en distancias. Entre estos últimos se

encuentran el test de Mantel, la regresión múltiple sobre matrices de similitud (MRM), el análisis de redundancia basado en distancia (db-RDA) y el correlograma de Mantel.

Se decidió emplear el test de Mantel el cual es usado para comprobar la posible confusión que puede generar una tercera variable en la relación entre dos variables. Dicho test estima el grado de correlación existente entre dos matrices, "A" e "B". La hipótesis nula de esta técnica postula que las distancias/ similitudes entre las variables de la matriz respuesta "B" no están linealmente correlacionadas con las correspondientes distancias/similitudes en la matriz modelo "A". Se evalúa, por tanto, si la asociación (positiva o negativa) es más robusta de lo que cabría esperar por simple azar.

Hay que recordar que el test de Mantel tiene las mismas limitaciones que la correlación de Pearson, en el sentido de que presuponen la existencia de relaciones lineales. Si los datos muestran relaciones no lineales (relación no monotónica, distribución en forma de parches, autocorrelaciones) el test de Mantel no será hábil para detectar relaciones entre ambas matrices. Este tipo de problemas se puede solventar parcialmente mediante la adecuada elección de la medida de distancia/similitud o diferentes transformaciones de los datos. En este sentido, la transformación de los valores de las semimatrices en rangos, permite el empleo de técnicas no paramétricas.

La única cuestión a considerar estriba en que al no tratarse de datos que sean independientes entre sí, el cálculo de los valores de significación no puede realizarse mediante el análisis de la suma de cuadrados, sino que deben basarse en permutaciones.

Dado que el test de Mantel exige que los datos tengan una relación lineal solo se empleó para la relación entre la cobertura vegetal (como variable explicativa) y el NDVI (como variable dependiente), pues por la naturaleza de ambas variables se espera entre ellas una relación lineal y una regresión positiva del NDVI por la cobertura vegetal.

En la Tabla 38 se muestran los valores de  $r$  de Pearson para la relación entre la cobertura vegetal (Matriz A) y NDVI (Matriz B); también para la relación de ambas

variables incluyendo la variables de distancia geográfica entre puntos y distancia en altitudes, respectivamente, como Matriz C.

#### Prueba de correlación entre matrices o test de Mantel

Fecha de datos	Matriz A	Matriz B	Matriz C	R de Pearson	p-valor (bilateral)	Interpretación
Setiembre 2000	Cobertura	NDVI spot	Distancia geográfica	0.048	0.840 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI spot	Altitud	-0.250	0.267 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI spot	-	0.078	0.720 <sup>NS</sup>	No relacionada
Setiembre 2000 Malla	Cobertura	NDVI spot	Distancia geográfica	0.227	< 0.0001 *	Relacionada
	Cobertura	NDVI spot	Altitud	0.164	< 0.0001 *	Relacionada
	Cobertura	NDVI spot	-	0.216	< 0.0001 *	Relacionada
Abril 2001	Cobertura	NDVI Ikonos	Distancia geográfica	0.101	0.291 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI Ikonos	Altitud	0.017	0.841 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI Ikonos	-	0.021	0.809 <sup>NS</sup>	No relacionada
Setiembre 2001	Cobertura	NDVI spot	Distancia geográfica	0.191	0.107 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI spot	Altitud	0.406	0.0005 *	Relacionada
	Cobertura	NDVI spot	-	0.394	0.001 *	Relacionada
Junio 2002	Cobertura	NDVI Ikonos	Distancia geográfica	-0.032	0.803 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI Ikonos	Altitud	-0.035	0.785 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI Ikonos	-	-0.032	0.818 <sup>NS</sup>	No relacionada
Octubre 2002	Cobertura	NDVI spot	Distancia geográfica	0.407	0.246 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI spot	Altitud	0.127	0.721 <sup>NS</sup>	No relacionada
	Cobertura	NDVI spot	-	0.869	0.002 *	Relacionada
Diciembre 2002	Cobertura	NDVI spot	Distancia geográfica	0.467	< 0,0001 *	Relacionada
	Cobertura	NDVI spot	Altitud	0.544	< 0,0001 *	Relacionada
	Cobertura	NDVI spot	-	0.548	< 0,0001 *	Relacionada

H<sub>0</sub>: Los datos no están relacionados (Si p-valor es mayor a 0.05 se acepta la hipótesis H<sub>0</sub> y se rechaza la hipótesis alterna. Si p-valor es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna)

H<sub>a</sub>: Las variables están relacionadas (Si p-valor es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna)

Se puede inferir que existe una correlación entre la variable cobertura vegetal y NDVI tal como el principio teórico lo señala. Los cálculos para los datos correspondientes a setiembre del 2001, octubre del 2002 y diciembre del 2002 fueron estadísticamente significativos para la relación entre ambas variables. Se observó un ajuste lineal significativo, con  $r = 0.394$  para setiembre del 2001,  $r = 0.869$  para octubre del 2002 y  $r = 0.548$  para diciembre del 2002; asimismo, cuando se agregó una tercera matriz a la relación, resultaron estadísticamente significativas solo las

pruebas para los datos de setiembre 2001 (cuando se incluye la variable altitud) y para los datos de diciembre del 2002 (al incluirse la altitud o bien la distancia geográfica).

Tanto en Octubre del 2002 como diciembre del 2002 cuando se incluye en la relación una tercera variable (la distancia geográfica o la altitud) la correlación disminuye; ligeramente en los datos de diciembre del 2002 más notoriamente en octubre del 2002 que incluso pierde significación la prueba. En setiembre del 2001 se da el caso que cuando se incluye la altitud como tercera variable en la relación cobertura y NDVI Spot mejora el  $r$  de 0.394 a 0.406.

Si bien los datos de setiembre del 2000 no presentaron alguna relación entre la cobertura y NDVI, en cambio si presentaron relaciones significativas para el caso de los datos generados (malla a partir de los mismos datos de setiembre del 2000). Se obtuvo un  $r = 0.216$  para datos de setiembre de 2000 interpolados (mediante geoestadística).

Todo ello lleva a afirmar que existe una relación lineal entre la cobertura vegetal y el NDVI, la cual puede estar influida bien por la distancia entre los puntos de muestreo o por la altitud (msnm) de tales puntos. Es decir por gradientes de orientación geográfica y altitud.

Esta afirmación se corresponde con la constatación de la anisotropía de los datos en evaluación. Esta verificación plantea una exigencia al diseño de muestreo, el cual no puede ser efectuado al azar sino como series espaciales asociadas a gradientes de altitud y orientación.

#### Resultados del análisis de regresión no lineal

Se planteo un modelo teórico lineal para la relación de cobertura vegetal versus NDVI; y unimodal o en forma de campana, para las otras dos relaciones, altitud vs cobertura vegetal y altitud vs NDVI. Las Tablas 39 al 41 muestran los resultados de la regresión polinomial cuadrática.

Al igual que en el caso de la regresión lineal, para el verano, solo se obtuvo una prueba significativa para la regresión curvilínea, y fue para la relación del NDVI Ikonos con la altitud, con un  $r^2 = 0.547$ , para los datos de abril del 2001. En las

otras dos relaciones: cobertura vegetal y NDVI y altitud y cobertura vegetal, tanto para abril del 2001 como junio del 2002, no hubo mayor influencia de la variable explicativa en el modelo de regresión curvilínea.

Con relación al invierno, la relación de la cobertura vegetal respecto a la altitud, evaluada mediante una regresión cuadrática, solo fue significativa (p-valor = 0.5) para los datos de setiembre del 2000 (datos interpolados), con un  $r^2 = 0.299$  y octubre del 2002, con un  $r^2 = 0.966$ . Los datos de setiembre del 2000, setiembre del 2001, diciembre del 2002, setiembre del 2007 y diciembre del 2007 no mostraron la tendencia esperada de una curva unimodal.

También para invierno, la relación del NDVI Spot con respecto a la cobertura vegetal fue significativa (p-valor = 0.5) para los siguientes casos: setiembre del 2000 (interpolado), que mostró un  $r^2 = 0.467$ ; setiembre del 2001, un  $r^2 = 0.705$  y diciembre del 2002, un  $r^2 = 0.815$ . No se presentaron ajustes significativos para los datos de setiembre del 2000, octubre del 2002, setiembre del 2007 y diciembre del mismo año.

En la misma estación invierno, la relación del NDVI Spot con respecto a la altitud se mostró significativa para setiembre del 2000 (generado) y presentó un ajuste de  $r^2 = 0.541$ ; también fue significativa para octubre del 2002 y su ajuste fue de  $r^2 = 0.991$ . La relación no fue significativa para setiembre del 2000, setiembre del 2001 y diciembre del 2002. Los datos de setiembre y diciembre no fueron evaluados en esta relación.

Regresión cuadrática para la cobertura, altitud y NDVI Ikonos de época seca en lomas de Atocongo, años 2001 y 2002

Fecha de datos	Variables regresionadas	Grado de ajuste del modelo: $r^2$	Análisis de varianza			Modelo
			CMR: CME:	F calculado: F tabular:	Pr > F	
Abril del 2001	Cobertura vegetal vs NDVI Ikonos Transformación Box-Cox Lambda -0.245	0.068	0.144 0.331	0.435 3.885	0.657 <sup>NS</sup>	-
	Altitud vs Cobertura vegetal Transformación Box-Cox Lambda -0.133	0.178	0.245 0.188	1.302 3.885	0.308 <sup>NS</sup>	-
	Altitud vs NDVI Ikonos Transformación Box-Cox Lambda -0.245	0.547	1.164 0.161	7.235 3.885	0.009 <sup>*</sup>	Transformado NDVI Ikonos = -4.049 + 0.006 Altitud + -

							2.068E-06 Altitud <sup>2</sup>
Junio del 2002	Cobertura vegetal vs NDVI Ikonos	0.423	0.013 0.004	3.295 4.256	0.084 <sup>NS</sup>	-	
	Altitud vs cobertura vegetal	0.210	131.378 110.021	1.194 4.256	0.347 <sup>NS</sup>	-	
	Altitud vs NDVI Ikonos	0.084	0.003 0.006	0.414 4.256	0.673 <sup>NS</sup>	-	

Regresión cuadrática para la cobertura, altitud y NDVI Spot de época húmeda en lomas de Atocongo, años 2000, 2001 y 2002

Fecha de datos	Variables regresionadas	Grado de ajuste del modelo: r <sup>2</sup>	Análisis de varianza			Modelo
			CMR: CME:	F calculado: F tabular:	Pr > F	
Setiembre del 2000	Cobertura vegetal vs NDVI Spot	0.012	0.0004 0.013	0.030 5.786	0.971 <sup>NS</sup>	-
	Altitud vs cobertura vegetal	0.534	452.824 158.162	2.863 5.786	0.148 <sup>NS</sup>	-
	Altitud vs NDVI Spot	0.366	0.012 0.008	1.441 5.786	0.320 <sup>NS</sup>	-
Setiembre del 2000 (generada mediante geostatística)	Cobertura vegetal vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda 0.314	0.467	2.053 0.054	38.171 3.111	0.000 <sup>*</sup>	Transformado NDVI Spot = -1.972 + 0.016 Cobertura - 8.708E-05 Cobertura <sup>2</sup>
	Altitud vs Cobertura vegetal (no hay transformación)	0.299	7541.884 406.056	18.574 3.111	0.000 <sup>*</sup>	Cobertura = 42.321 - 0.134 Altitud + 0.0004 Altitud <sup>2</sup>
	Altitud vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda 0.314	0.541	2.377 0.046	51.295 3.111	0.000 <sup>*</sup>	Transformado NDVI Spot = -2.371 + 0.003 Altitud - 1.136E-06 Altitud <sup>2</sup>
Setiembre del 2001	Cobertura vegetal vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda - 0.679	0.705	8.354 0.700	11.928 4.103	0.002 <sup>*</sup>	Transformado NDVI Spot = -12.612 + 0.441 Cobertura - 0.005 Cobertura <sup>2</sup>
	Altitud vs Cobertura vegetal Transformación Box-Cox Lambda 0.451	0.278	5.812 3.012	1.929 4.103	0.196 <sup>NS</sup>	
	Altitud vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda - 0.679	0.171	2.029 1.965	1.032 4.103	0.391 <sup>NS</sup>	
Octubre del 2002	Cobertura vegetal vs NDVI Spot	0.930	0.030 0.002	13.191 19.00	0.070 <sup>NS</sup>	-
	Altitud vs cobertura vegetal	0.966	925.434 32.166	28.771 19.00	0.034 <sup>*</sup>	Cobertura = 7.357 - 0.060 Altitud + 0.001 Altitud <sup>2</sup>
	Altitud vs NDVI Spot	0.991	0.033 0.000	115.691 19.00	0.009 <sup>*</sup>	NDVI Spot = 0.127 - 0.001 Altitud + 4.628E-06 Altitud <sup>2</sup>

Regresión cuadrática para la cobertura, altitud y NDVI Spot de época húmeda en lomas de Atocongo, años 2002 y 2007

Fecha de datos	de	Variables regresionadas	Grado de ajuste del modelo: $r^2$	Análisis de varianza			Modelo
				CMR: CME:	F calculado: F tabular:	$P_r > F$	
Diciembre del 2002		Cobertura vegetal vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda -1.237	0.815	55.123 3.123	17.652 4.459	0.001 *	Transformado NDVI Spot = -25.747 + 1.285 Cobertura -0.017 Cobertura <sup>2</sup>
		Altitud vs Cobertura vegetal Transformación Box-Cox Lambda -1.851	0.382	0.000 0.000	2.476 4.459	0.146 NS	-
		Altitud vs NDVI Spot Transformación Box-Cox Lambda -1.237	0.317	21.450 11.541	1.859 4.459	0.217 NS	-
Setiembre 2007		Altitud vs cobertura vegetal	0.277	197.752 114.826	1.722 4.256	0.233 NS	-
Diciembre 2007		Altitud vs Cobertura vegetal Transformación Box-Cox Lambda 0.354V	0.171	3.198 3.443	0.929 4.256	0.430 NS	-

Resultados del análisis de los modelos generalizados

En las Tablas 42 al 47 y las Figuras 71 al 105 se presentan las métricas y gráficos, respectivamente, de los modelos GLM y GAM para las relaciones del NDVI en función de la cobertura vegetal, cobertura vegetal en función de la altitud y NDVI en función de la altitud. Tales tablas resumen los modelos seleccionados. Se tuvieron 48 modelos GLM, entre lineales y cuadráticos, para tres combinaciones de distribución y funciones de enlace (poisson y logarítmico, gamma e inverso, gamma y logarítmico). Los modelos GAM sumaron 24 (ocho juegos de datos por tres tipos de combinaciones de distribución y funciones de enlace). En varios casos la estimación no se produjo pues los datos no mostraban alguna tendencia.

Modelo lineal generalizado para el NDVI y la cobertura vegetal (%) de lomas de Atocongo

Datos	Devianza	p - valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuaciones
Set2000g	41.28289	0	18.649	0.084	3	2	NDVI SPOT = -2.70979 + 0.0171846 Cobertura
Set2001	57.2581	0.000845	1.338	0.532	3	2	NDVI SPOT = -2.72014 + 0.0271465 Cobertura
Oct2002	93.501	0.034158	0.274	1	3	2	NDVI SPOT = -3.22203 + 0.0517198 Cobertura - 0.000272546 Cobertura <sup>2</sup>
Dic2002	60.1394	0.001	1.255	0.219	3	2	NDVI Spot = -2.54161 + 0.0358818 Cobertura
Ene2011	20.4429	0.116189	0.754	0.236	1	2	NDVI Wview = -1.55198 + 0.0324272 Cobertura

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) y la altitud en las lomas de Atocongo

Datos	Devianza	p - valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuaciones
Set2000	54.2012	0.02867*	0.249	0.213	3	2	Cobertura = 3.71059 + 0.00139059 Altitud
Set2000g	12.5592	0.000002*	49.084	0.041	3	2	Cobertura = 2.8457 + 0.00251993 Altitud
Set2001	23.45679	0.074832	1.628	0.069	3	2	Cobertura = 2.88962 + 0.00197214 Altitud
Oct2002	93.1276	0.005028*	0.197	1	3	2	Cobertura = 1.43366 + 0.00732579 Altitud
Set2007	19.8774	0.124264	0.363	0.279	3	2	Cobertura = 3.94071 + 0.000596 Altitud
Abr2001	22.8361	0.069323	5.456	0.008	3	2	Cobertura = 1.05029 + 0.00321209 Altitud
Jun2002	37.5174	0.065727	6.637	0.4	3	4	Cobertura = -30.8373 + 0.145152 Altitud - 0.000154861 Altitud <sup>2</sup>
Ene2011	22.1662	0.13356	12.392	0.033	2	4	Cobertura = 1.49457 + -0.00664711 Altitud + 7.71E-06 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en las lomas de Atocongo

Datos	Devianza	p - valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuaciones
Set2000	56.9584	0.075006*	1.591	0.534	3	2	NDVI Spot= -5.03541 + 0.0153431 Altitud - 1.62E-05 Altitud <sup>2</sup>
Set2000g	55.12195	0*	1.962	0.003	1	2	NDVI Spot= -4.40496 + 0.0100713 Altitud - 8.34E-06 Altitud <sup>2</sup>
Oct2002	99.5485	0.002219*	0.019	0.503	2	2	NDVI Spot = 36.5471 - 0.166276 Altitud + 0.000202832 Altitud <sup>2</sup>
Abr2001	50.4854	0.003379*	1.345	0.05	3	2	NDVI Ikonos = -2.8088 + 0.00309777 Altitud
Ene2011	75.6605	0.000445*	1.066	0.001	3	4	NDVI World view = -7.06728 + 0.0279153 Altitud - 3.14E-05 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la cobertura vegetal (%) en lomas de Atocongo

Datos	Devianza	p - valor	AIC	r <sup>2</sup>	Modelo GAM	Funciones	Forma
Set2000g	44.6341	0*	2.429	0.024	2	1	2
Set2001	57.26	0.001163*	1.363	0.532	1	3	2
Oct2002	89.47	0.016655*	0.082	1	1	1	2
Dic2002	60.14	0.00137*	1.282	0.219	1	3	2
Ene2011	20.4627	0.132069	0.773	0.236	1	1	2

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) y la altitud en lomas de Atocongo

Datos	Devianza	p - valor	AIC	r <sup>2</sup>	Modelo GAM	Funciones	Forma
Set2000	54.2094	0.037974*	0.264	0.213	1	3	2
Set2000g	14.0335	0.000004*	48.837	0.009	2	3	2
Set2001	23.46	0.08627	1.663	0.069	1	3	2
Oct2002	95.33	0.004276*	5.454	1	1	1	2
Abr2001	22.8361	0.078779	5.554	0.008	1	3	2
Jun2002	34.31	0.132278	7.602	0.406	2	3	4
Ene2011	45.3119	0.047543*	47.693	0.304	2	1	4

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en las lomas de Atocongo

Datos	Devianza	p - valor	AIC	r <sup>2</sup>	Modelo GAM	Funciones	Forma
Set2000	56.635	0.136414	1.957	0.398	2	3	2
Set2000g	55.3659	0	1.96	0.001	2	1	2
Oct2002	99.35	0.006592	0.044	0.75	2	2	2
Abr2001	50.4854	0.004336	1.37	0.05	1	3	2
Ene2011	74.24086	0.001481	1.233	0.002	2	3	4

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

Las tablas presentan los valores de la devianza, p-valor, criterio de Akaike (AIC),  $r^2$  del modelo Loess para los residuales; asimismo, la indicación acerca de si el modelo es lineal o cuadrático; la anotación de las funciones de distribución y enlace (poisson y logarítmica, gamma e inversa, gamma y logarítmica) y la forma de la curva (plano, exponencial, meseta, unimodal simétrico, unimodal asimétrico, bimodal simétrico, bimodal asimétrico).

Para los datos de setiembre del 2000 no se vislumbró alguna relación entre la cobertura vegetal y el NDVI. El modelo teórico esperaba una relación lineal, sin embargo no se obtuvo alguna relación significativa. En cambio, para las relaciones de la altitud sobre la cobertura y sobre el NDVI se determinaron las relaciones cuyas características se muestran en las Tablas 42 y 46.

La Figura 71 muestra el modelo lineal generalizado con distribución gamma y enlace logarítmico para la altitud (msnm) y cobertura vegetal (%) para los datos setiembre del 2000. Puede decirse que el modelo explica un 54% de la variabilidad de los datos aunque solo el 21% de tal variabilidad se explicaría por la altitud.

La Figura 73 presenta el modelo lineal generalizado con distribución gamma y enlace logarítmico para la altitud (msnm) y el NDVI para setiembre del 2000. En este caso el modelo explica un 57% de la variabilidad de los datos y señala que el 53% de dicha variabilidad se debe a la altitud.

La Figura 75 muestra el modelo lineal generalizado con distribución gamma y enlace logarítmico para la cobertura vegetal (%) como variable independiente y el NDVI Spot como variable dependiente, para los datos de setiembre del 2000 generados. El modelo explica el 41% de la variabilidad de los datos y solo el 8% se debería a la cobertura vegetal (%).

La Figura 77 presenta el modelo lineal generalizado con distribución gamma y enlace logarítmico para la altitud (msnm) como variable independiente y la cobertura vegetal (%), como variable dependiente, para los datos de setiembre del 2000 generados. La curva explica el 12% de la variabilidad de los datos aunque tan solo el 4% correspondería a la altitud.

La Figura 79 muestra el modelo lineal generalizado con distribución poisson y enlace logarítmico para la altitud (msnm) como variable independiente y el NDVI Spot, como variable dependiente, para los datos de setiembre del 2000 generados. El modelo explica el 55% de la variabilidad, la cual no se explicaría por la altitud.

La Figura 81 presenta el modelo lineal generalizado con distribución gamma y enlace logarítmico para la altitud (msnm) y la cobertura vegetal (%) para los datos de abril del 2001. El modelo obtenido tan solo explica el 23% de la variabilidad asimismo la altitud no explica tal variabilidad.

La Figura 83 muestra el modelo lineal generalizado con distribución gamma y enlace logarítmico para la altitud (msnm) y NDVI Ikonos para los datos de abril del 2001. El modelo explica el 50% de la variabilidad e indica que el 5 de esta variabilidad corresponde a la altitud.

Para los datos de setiembre del 2001 solo se obtuvo regresiones GLM para las relaciones del NDVI Spot con la cobertura vegetal (%) y esta con relación a la altitud (msnm), las cuales se muestran en las Figuras 85 y 87, respectivamente. No se obtuvo un modelo para la relación NDVI Spot en función de la altitud. La Figura 85 muestra que el modelo se ajusta a los datos en un 57% y la cobertura vegetal explica el 53% de la variabilidad del NDVI Spot. Por otro lado, la Figura 87 muestra que el modelo solo explica el 23% de la variabilidad de los datos y la altitud solo explica un 7% de la variabilidad de la cobertura vegetal (%).

Para los datos de junio del 2002, solo se obtuvo una relación, entre la cobertura vegetal (%) y la altitud, la cual se muestra en la Figura 89. El modelo lineal generalizado obtenido se ajusta en un 38% a la variabilidad de los datos. También puede decirse que el 40% de la variabilidad de la cobertura vegetal (%) se debe a la altitud (msnm).

Para los datos de octubre del 2002, la Figura 91 presenta el modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002, indicando que el modelo se ajusta a los datos en un 94% y la cobertura vegetal explica el 100% de la variabilidad del NDVI Spot. Por otro lado, la Figura 93 muestra el GLM para la cobertura vegetal (%) en función de la altitud, con un ajuste de 93% a los datos y 100% respecto a la altitud en cuanto explicación de la

variabilidad de la cobertura vegetal. Adicionalmente, la Figura 95 muestra el GLM para la relación del NDVI Spot respecto a la altitud, con la indicación que el modelo se ajusta en un 100% a los datos y que la altitud explica un 50% de la variabilidad del NDVI Spot.

Para el caso de los datos de diciembre del 2002, de las tres relaciones en estudio solo se obtuvo una relación significativa, entre el NDVI Spot y la cobertura vegetal (%), la cual se observa en la Figura 97. El GLM obtenido explica el 60% de la variabilidad de los datos e indica que solo 22% de la variabilidad en el NDVI Spot se debe a la cobertura vegetal.

Para los datos de setiembre del 2007, la Figura 99 muestra el GLM para la cobertura vegetal en función de la altitud. El modelo solo se ajusta en un 20% a los datos y la altitud solo explica el 28% de la variabilidad de la cobertura vegetal. Para esta fecha no se contó con imágenes de satélite por ello es que no se evaluó la variable NDVI.

Para los datos de diciembre del 2007, no hubo una relación entre la altitud y la cobertura vegetal. Al igual que el caso de setiembre del 2007 para esta fecha no se contó con una imagen de satélite por ello no se evaluó la variable NDVI.

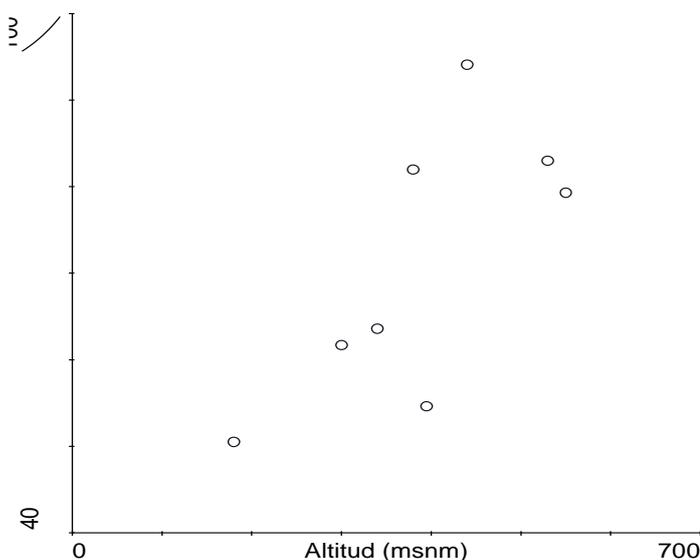
Para los datos de enero del 2011, se obtuvo un GLM para la relación de NDVI World View y cobertura vegetal, Figura 100, con un modelo que se ajusta en un 20% a los datos; la cobertura vegetal solo explica el 24% de la variabilidad de los NDVI. Asimismo, se obtuvo un GLM para la cobertura vegetal y la altitud, con un ajuste de 22% a los datos, Figura 102, aunque nula explicación de la influencia de la altitud. También se obtuvo un GLM, Figura 104, para el NDVI World View y la altitud, con un modelo que se ajusta en un 76% a los datos pero que no explica la variabilidad del NDVI a partir de la altitud.

Referente a los modelos aditivos generalizados, las figuras correspondientes se presentan intercaladas entre las figuras que presentan los modelos lineales generalizados.

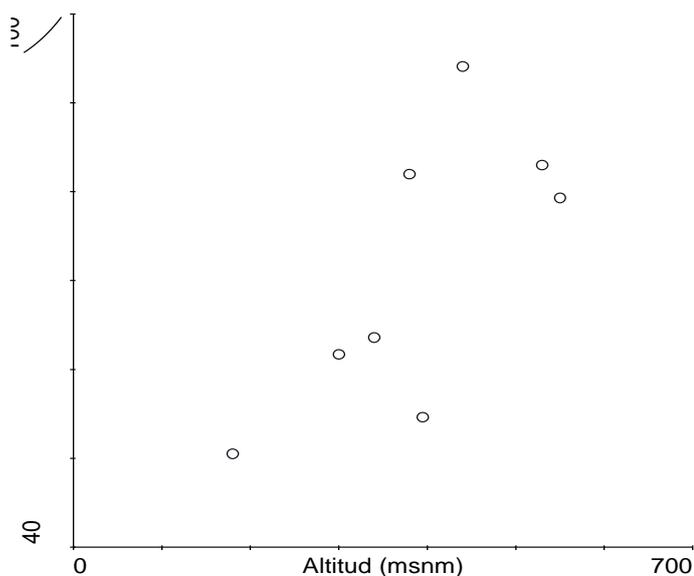
Tanto para los GLM y GAM el mejor modelo debe tener una devianza cercana al 100%, un p-valor menor de 0.05, un AIC bajo y  $r^2$  cercano a la unidad. Para determinar qué modelos reunían todos estos requisitos se empleó un análisis

multidimensional (multidimensional scaling MDS). Para ello se obtuvo la matriz de similitud a partir del índice de Gower. Se prefirió el MDS puesto que es aplicable a matrices de coeficientes de asociación entre los objetos o individuos. A diferencia del análisis de componentes principales que opera sobre matrices de covarianza, el MDS analiza medidas de similitud percibidas entre objetos. Trata de obtener una configuración de objetos. En la sección de discusión se detalla esta prueba.

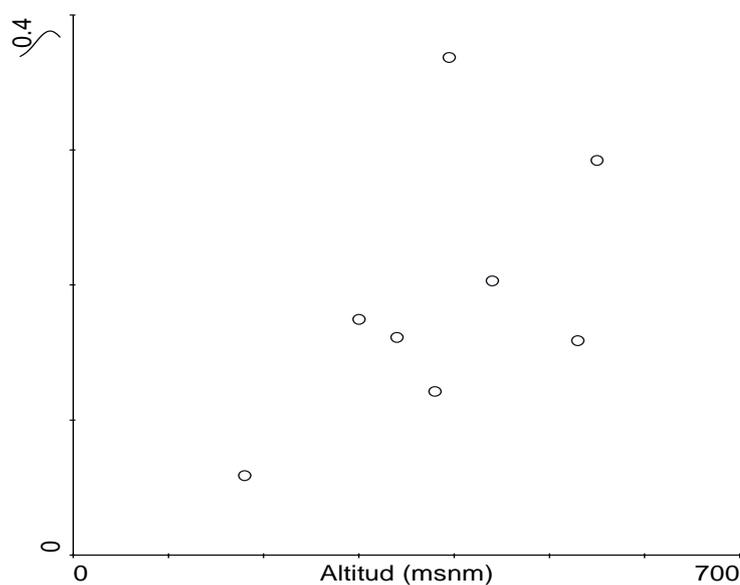
Las Figuras 71 al 105 muestran gráficamente los modelos GLM y GAM para las relaciones del NDVI en función de la cobertura vegetal, cobertura vegetal en función de la altitud y NDVI en función de la altitud. Tales figuras han sido obtenidas a partir del programa Canoco 4.5. En el caso de los modelos GLM las ecuaciones no se ha representado (el programa no los provee directamente en las figuras). En el caso de los modelos GAM no se generan ecuaciones sino ajustes de curvas a los puntos considerados.



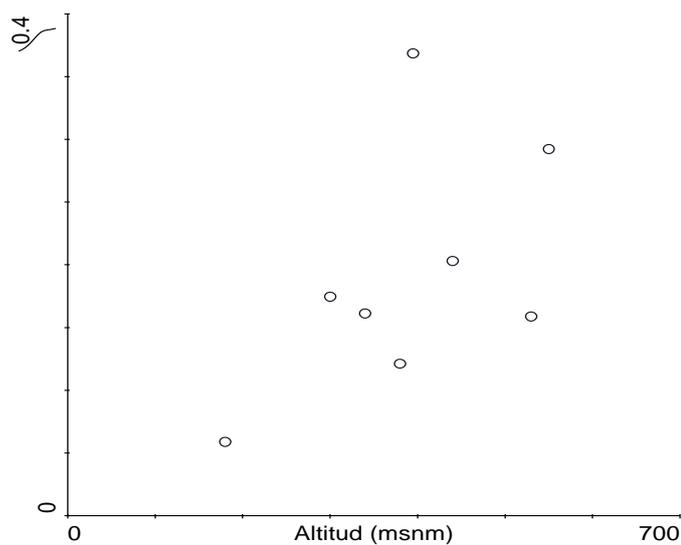
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 54.20$ , p-valor = 0.03, AIC = 0.25 y  $r^2$  loess residuales = 0.21



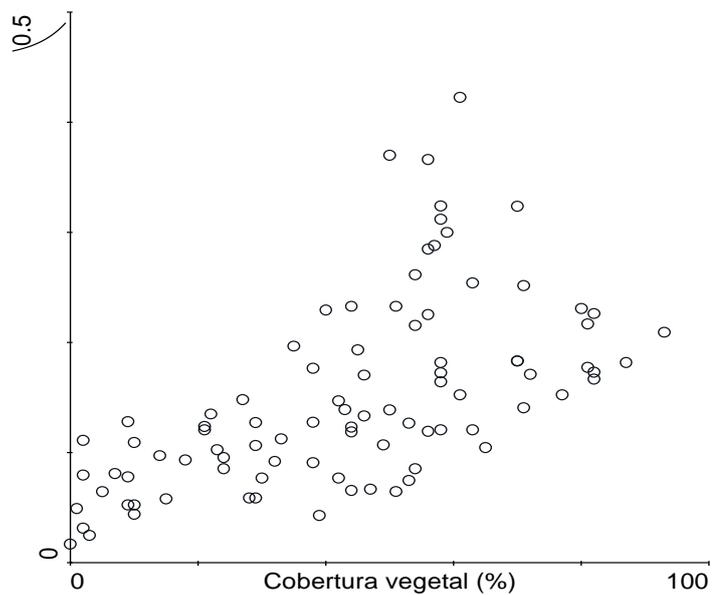
Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 54.20$ , p-valor = 0.04, AIC = 0.26 y  $r^2$  loess residuales = 0.21



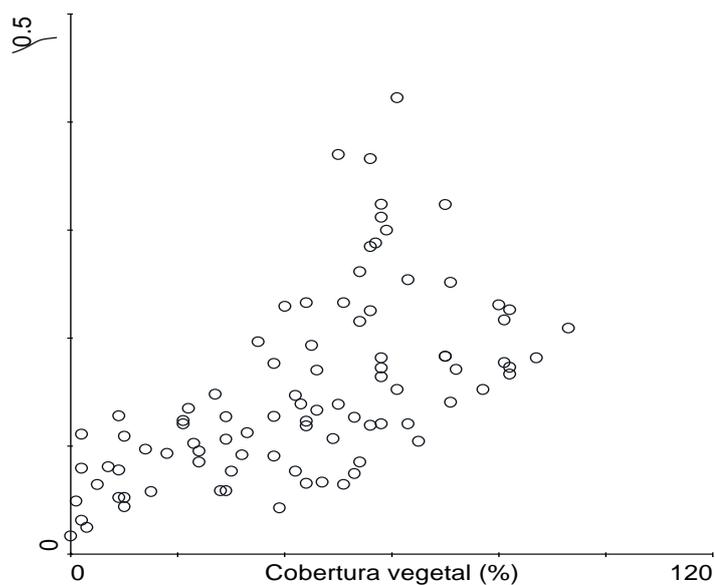
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 56.96$ , p-valor = 0.08, AIC = 1.59 y  $r^2$  loess residuales = 0.53



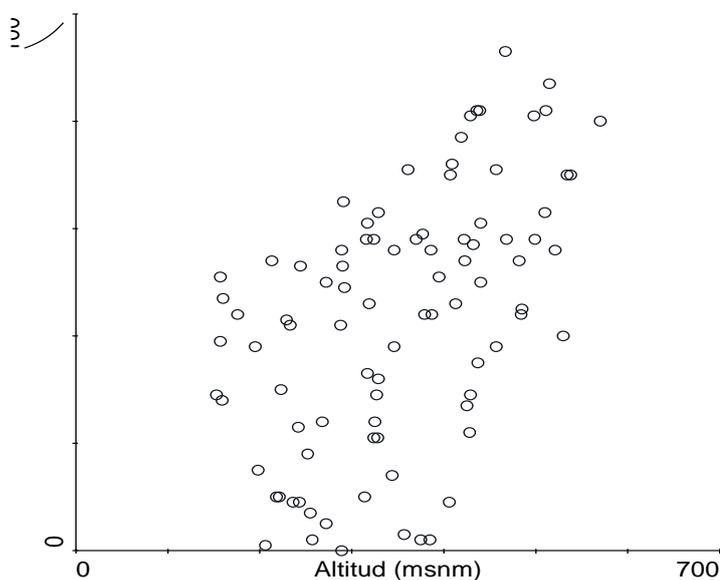
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 56.64$ , p-valor = 0.14, AIC = 1.97 y  $r^2$  loess residuales = 0.40



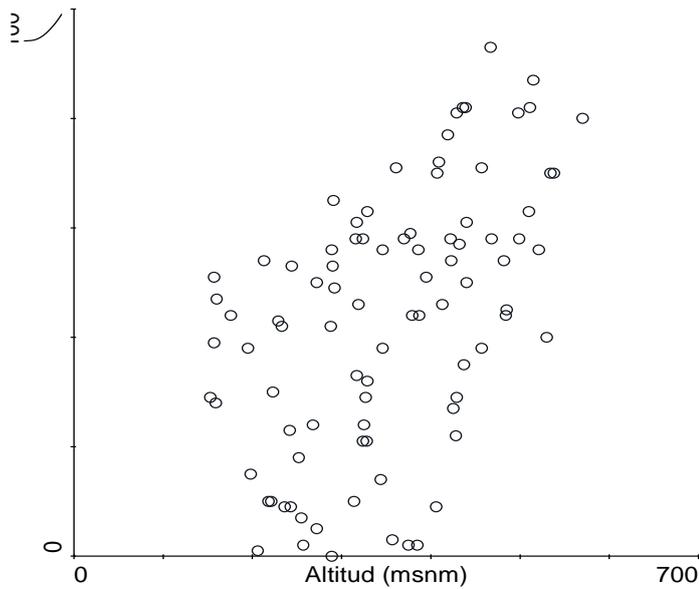
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000, generados, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 41.28$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 18.65 y  $r^2$  loess residuales = 0.08



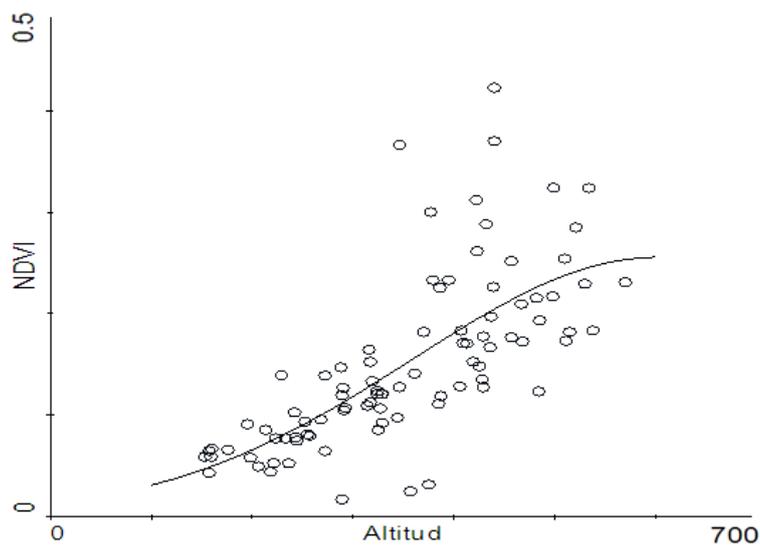
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000, generados, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 44.63$ ,  $p\text{-valor} = < 1.0e-6$ ,  $AIC = 2.43$  y  $r^2$  loess residuales = 0.02



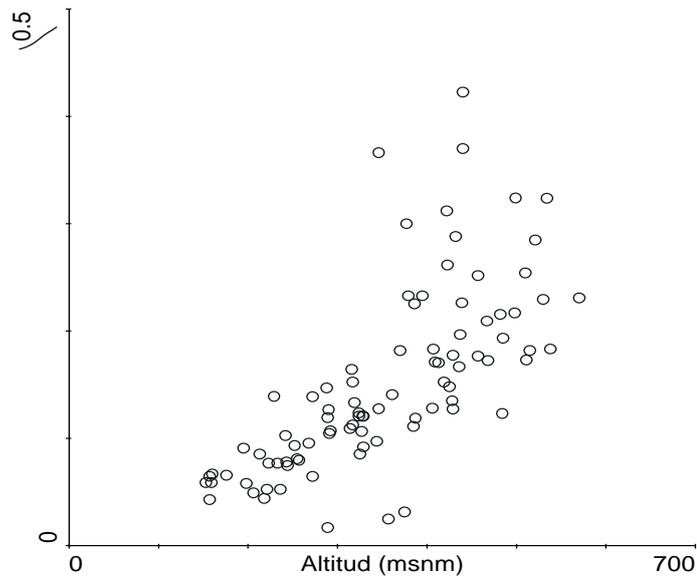
Modelo lineal generalizado para datos generados de cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 12.56$ ,  $p\text{-valor} = 0.000002$ ,  $AIC = 49.08$  y  $r^2$  loess residuales = 0.04



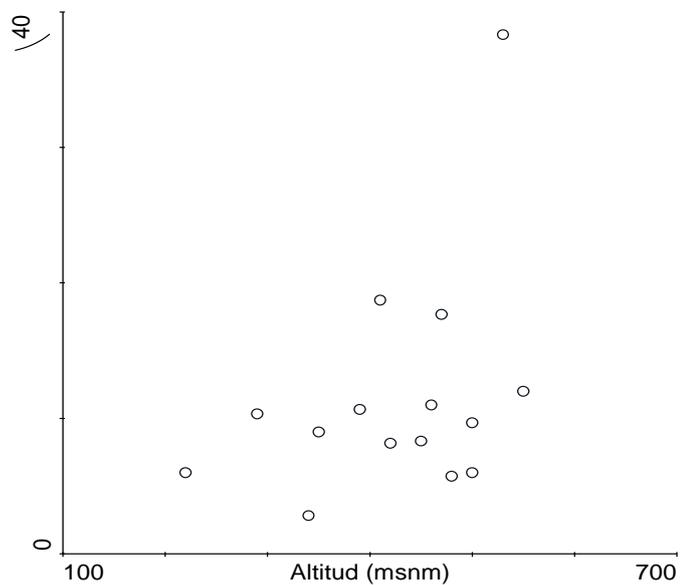
Modelo aditivo generalizado para datos generados de cobertura vegetal (%) de setiembre del 2000 en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 14.03$ , p-valor = 0.000004, AIC = 48.84 y  $r^2$  loess residuales = 0.01



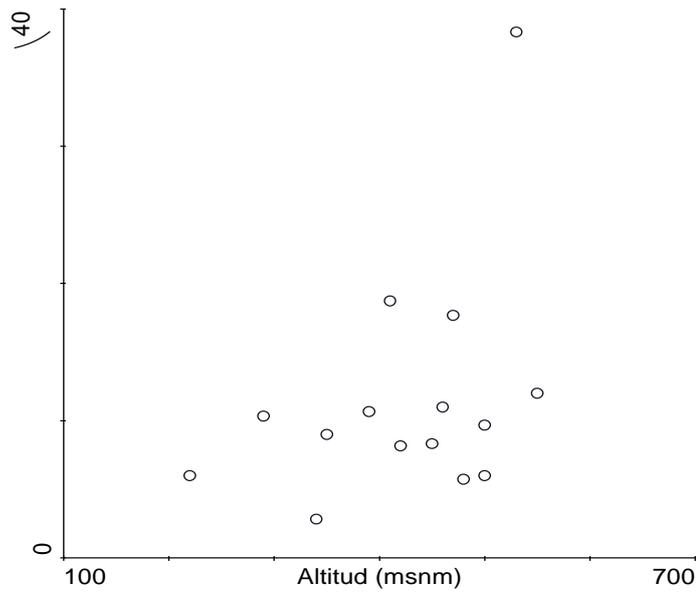
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir la altitud (msnm), cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 55.12$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 1.96 y  $r^2$  loess residuales = 0.003



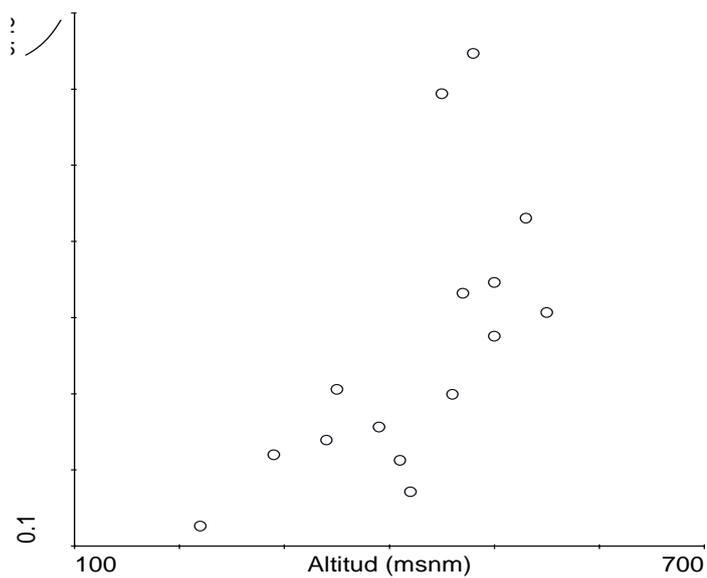
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot a partir la altitud (msnm), cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 55.37$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 1.96 y  $r^2$  loess residuales = 0.001



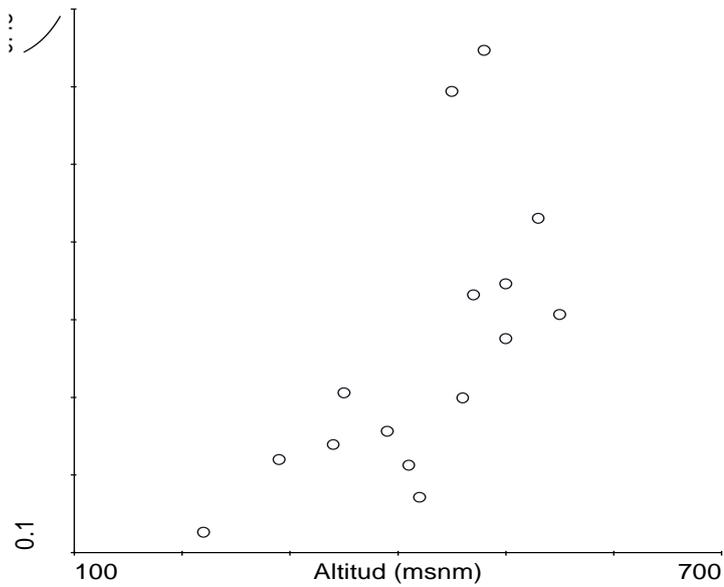
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de abril del 2001 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 22.84$ , p-valor = 0.07, AIC = 5.456 y  $r^2$  loess residuales = 0.008



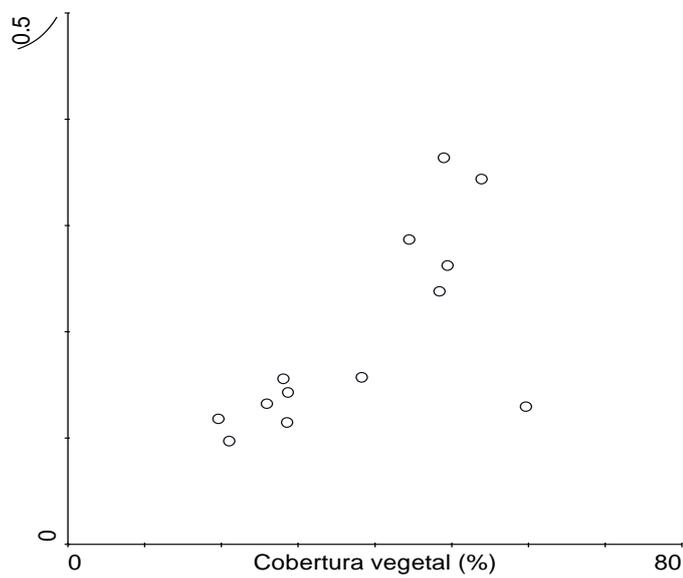
Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de abril del 2001 en función de la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 22.84$ , p-valor = 0.08, AIC = 5.55 y  $r^2$  loess residuales = 0.008



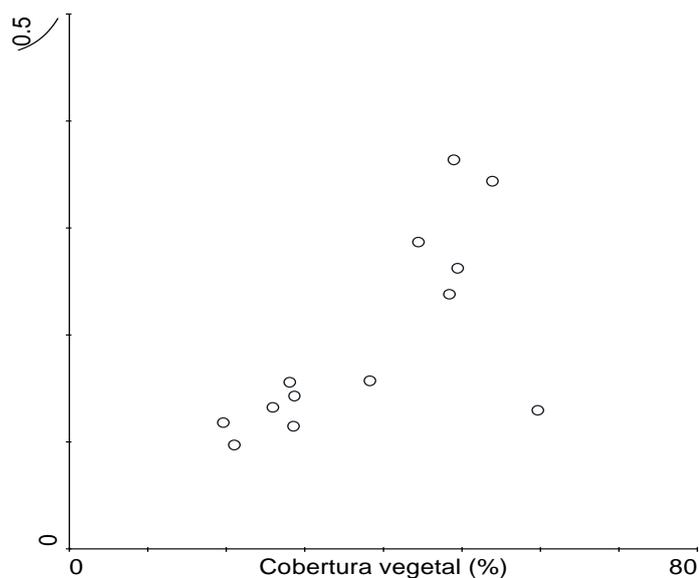
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos a partir la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 50.49$ , p-valor = 0.003, AIC = 1.345 y  $r^2$  loess residuales = 0.05



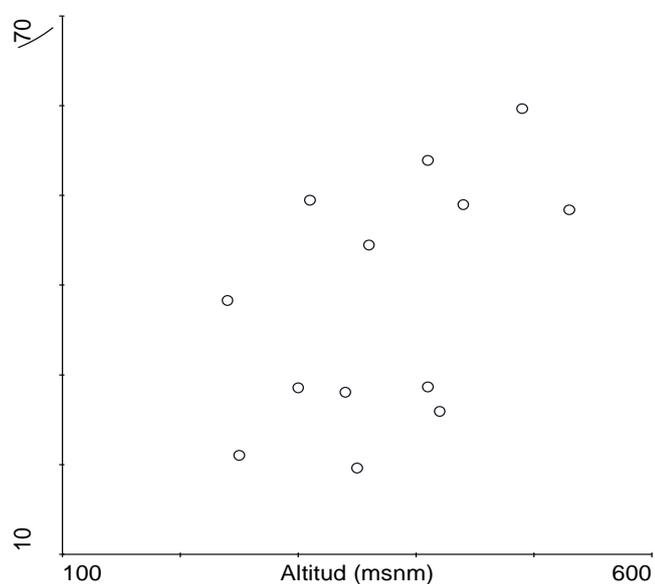
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos a partir la altitud (msnm), lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 50.49$ , p-valor = 0.004, AIC = 1.37 y  $r^2$  loess residuales = 0.05



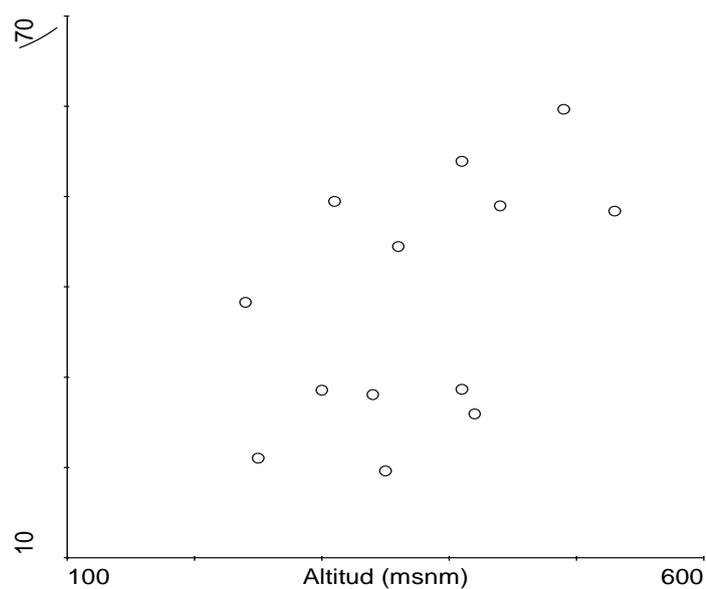
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot regresionado por la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2001, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 57.26$ , p-valor = 0.0008, AIC = 1.34 y  $r^2$  loess residuales = 0.53



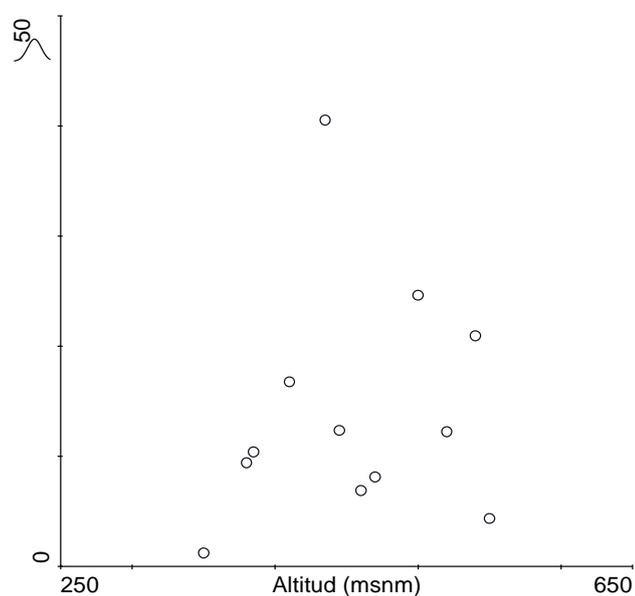
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot regresionado por la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2001, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 57.26$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.36 y  $r^2$  loess residuales = 0.53



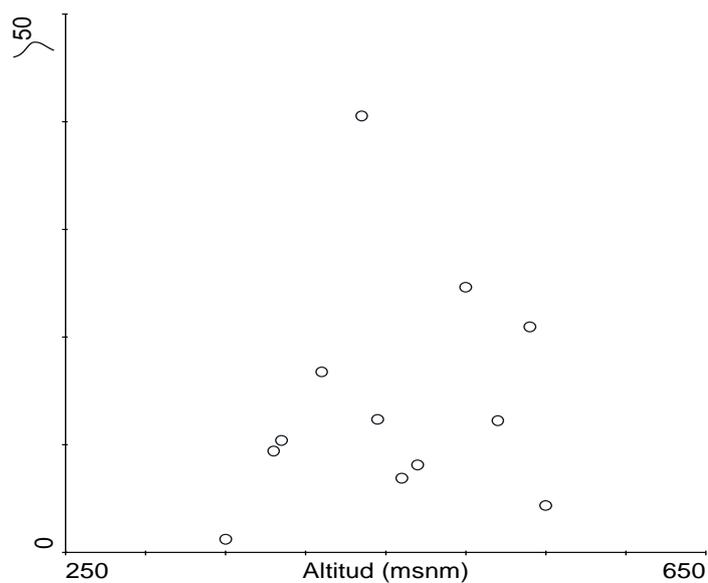
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2001 en función de la altitud (msnm), con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 23.46$ , p-valor = 0.07, AIC = 1.63 y  $r^2$  loess residuales = 0.07



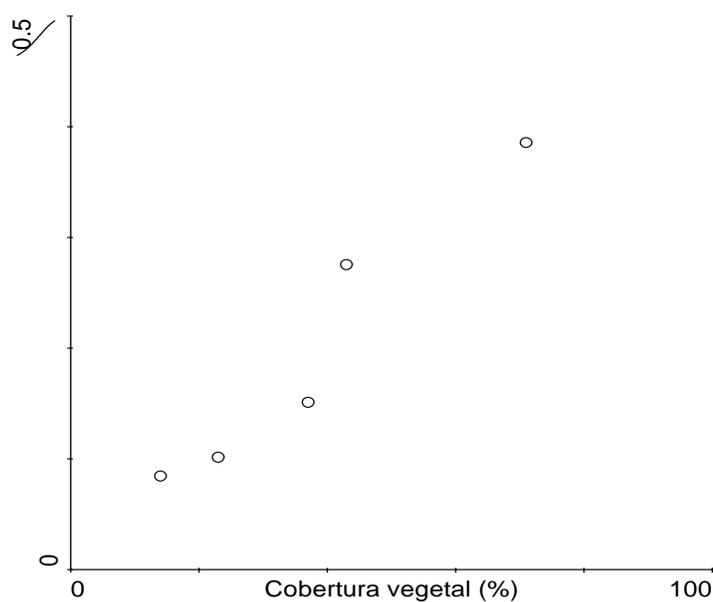
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2001 en función de la altitud (msnm), con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 23.46$ , p-valor = 0.09, AIC = 1.66 y  $r^2$  loess residuales = 0.07



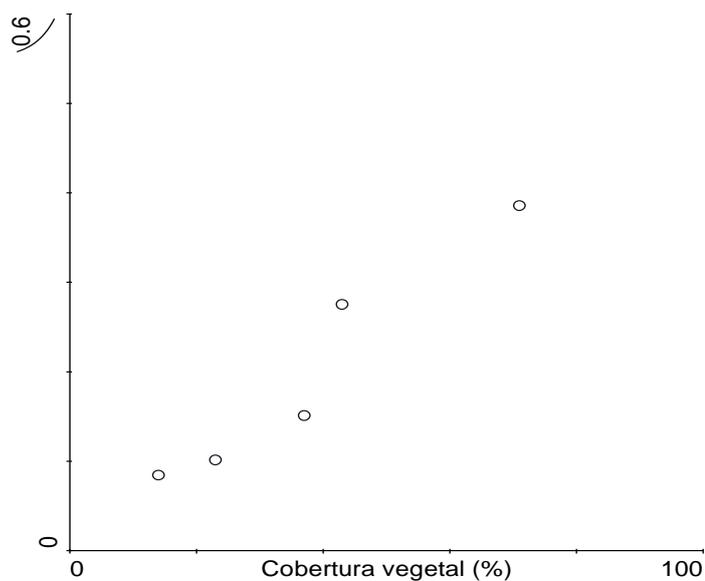
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de junio del 2002 en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 37.52$ , p-valor = 0.07, AIC = 6.63 y  $r^2$  loess residuales = 0.40



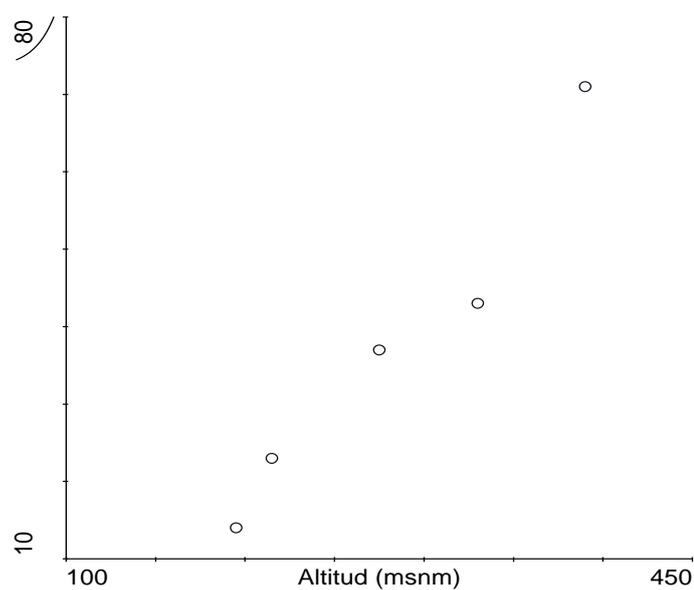
Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de junio del 2002 en función de la altitud (msnm), cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 34.31$ , p-valor = 0.13, AIC = 7.60 y  $r^2$  loess residuales = 0.41



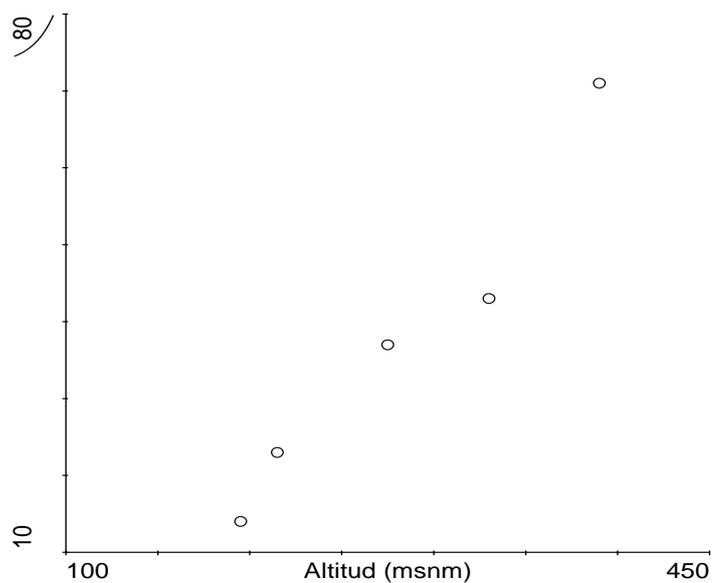
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 93.50$ , p-valor = 0.03, AIC = 0.27 y  $r^2$  loess residuales = 1



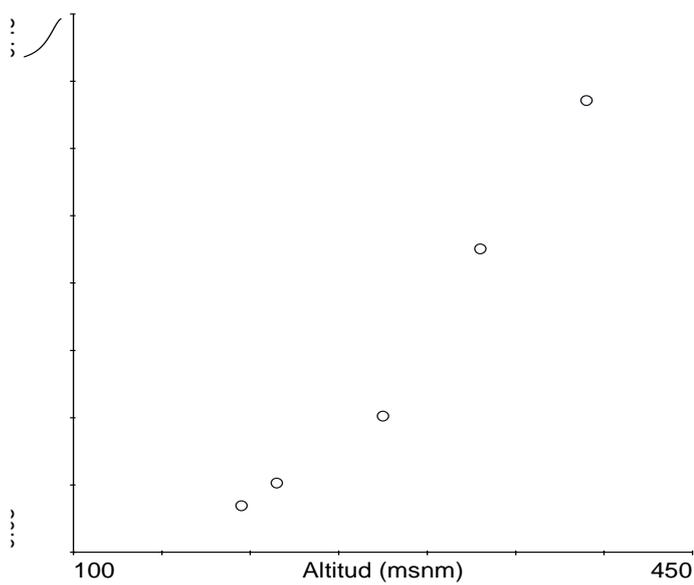
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 89.47$ , p-valor = 0.02, AIC = 0.08 y  $r^2$  loess residuales = 1



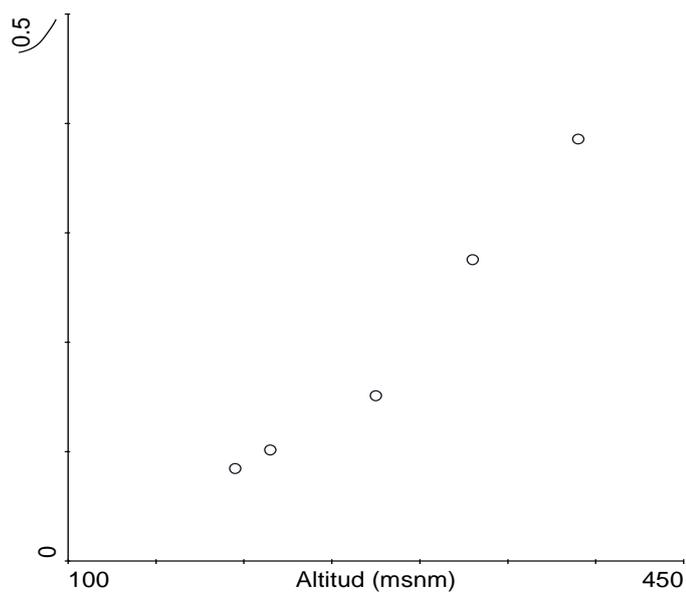
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002 en función de la altitud, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 93.13$ , p-valor = 0.005, AIC = 0.20 y  $r^2$  loess residuales = 1



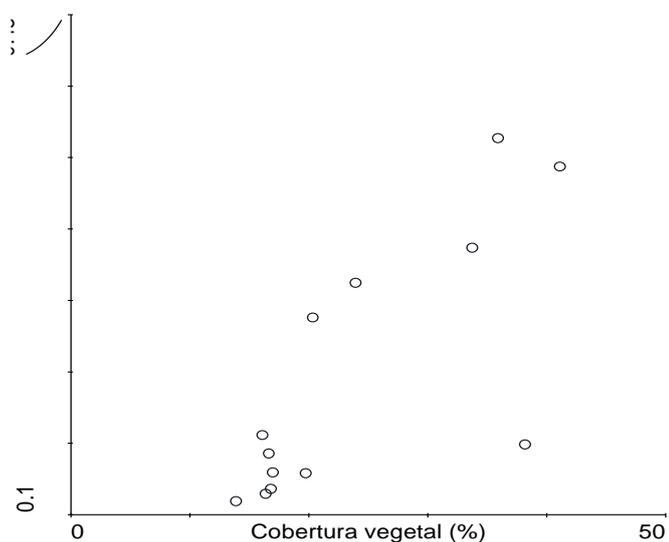
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de octubre del 2002 en función de la altitud, lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 95.33$ , p-valor = 0.004, AIC = 5.45 y  $r^2$  loess residuales = 1



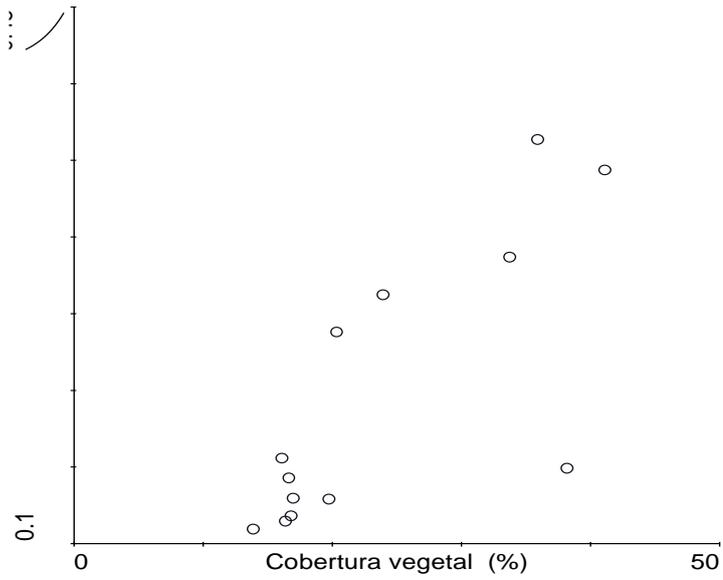
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 99.55$ , p-valor = 0.002, AIC = 0.02 y  $r^2$  loess residuales = 0.50



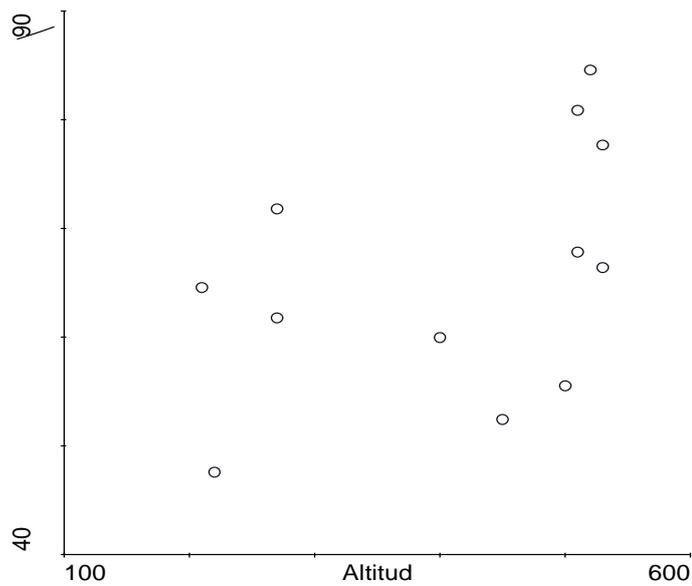
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 99.35$ , p-valor = 0.006, AIC = 0.04 y  $r^2$  loess residuales = 0.75



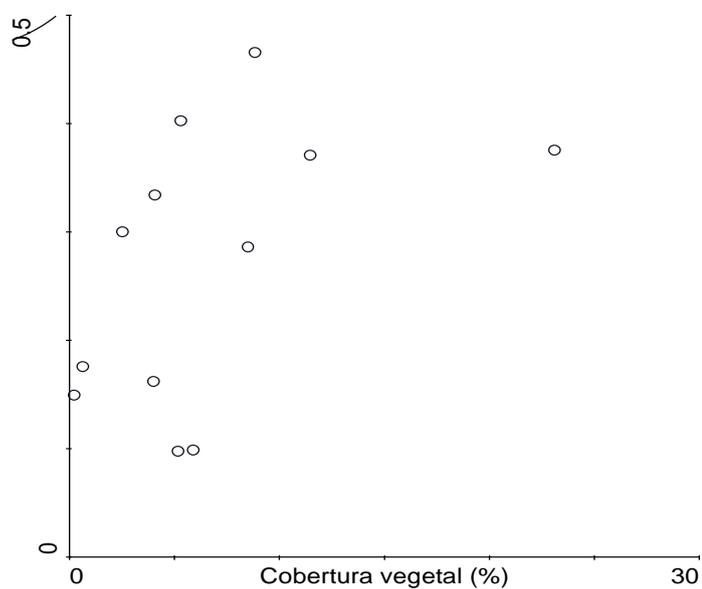
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de diciembre del 2002, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 60.14$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.26 y  $r^2$  loess residuales = 0.22



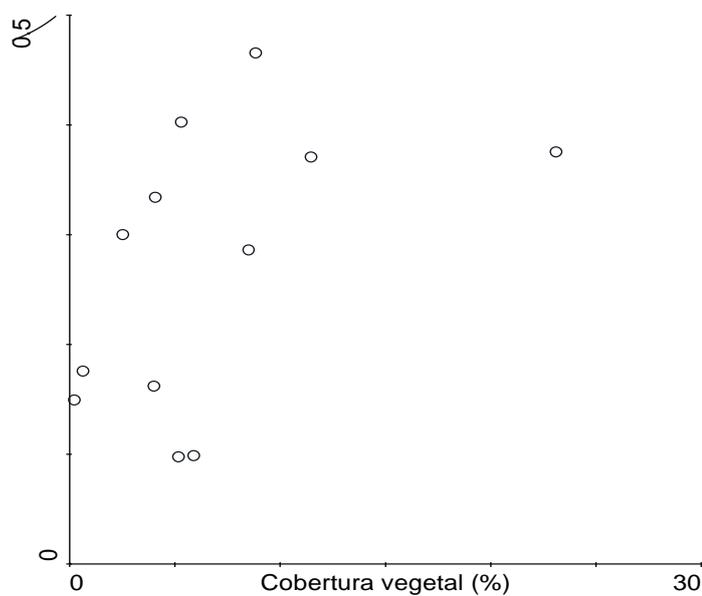
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot a partir de la cobertura vegetal (%) de diciembre del 2002, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 60.14$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.28 y  $r^2$  loess residuales = 0.22



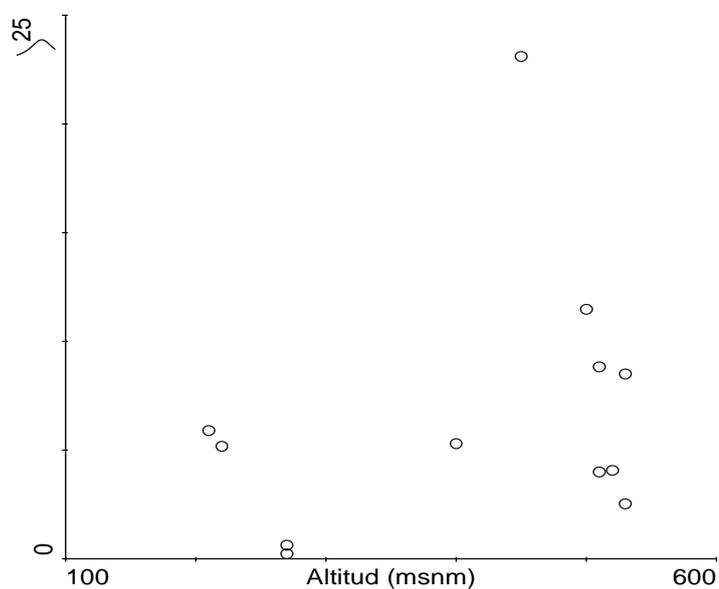
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de setiembre del 2007 en función de la altitud, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 19.88$ ,  $p$ -valor = 0.12,  $AIC = 0.36$  y  $r^2$  loess residuales = 0.28



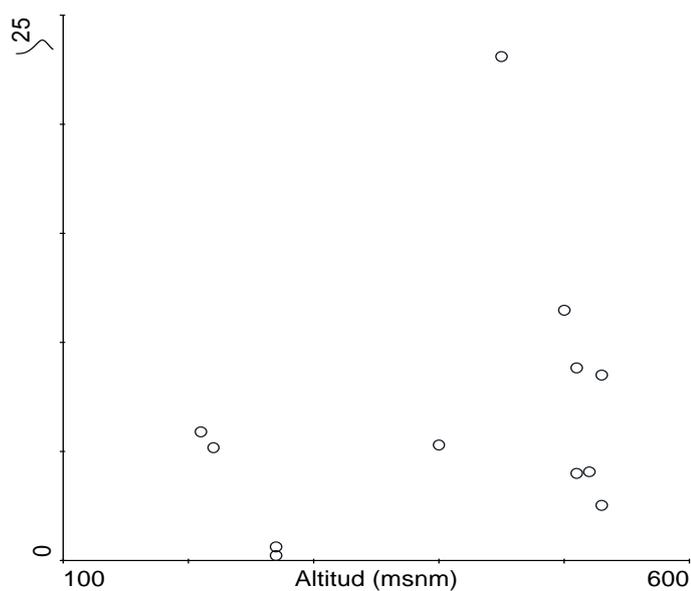
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View a partir de la cobertura vegetal (%) de enero del 2011, lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 20.46$ ,  $p$ -valor = 0.13,  $AIC = 0.77$  y  $r^2$  loess residuales = 0.24



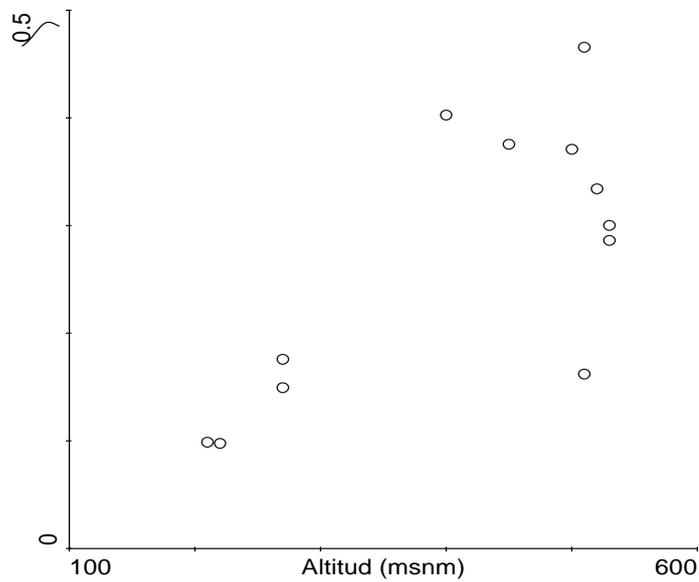
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View a partir de la cobertura vegetal (%) de enero del 2011, lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 20.44$ , p-valor = 0.12, AIC = 0.75 y  $r^2$  loess residuales = 0.24



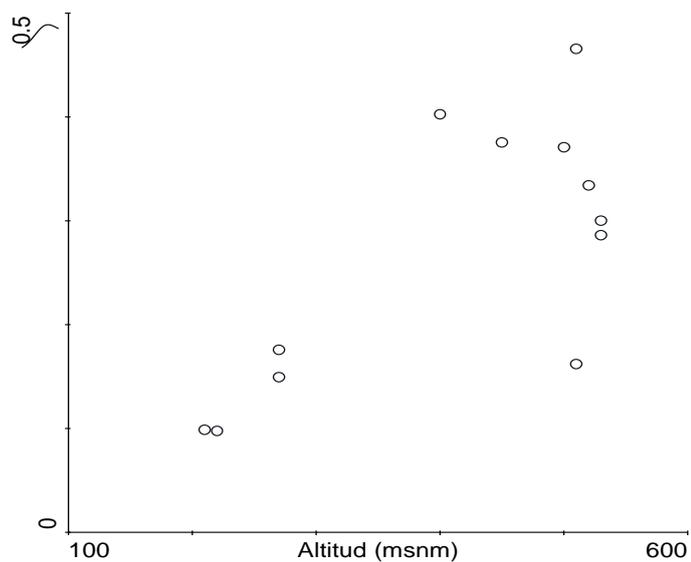
Modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de enero del 2011 en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 22.17$ , p-valor = 0.13, AIC = 12.39 y  $r^2$  loess residuales = 0.03



Modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de enero del 2011 en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 45.31$ , p-valor = 0.05, AIC = 47.69 y  $r^2$  loess residuales = 0.30



Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 75.66$ , p-valor = 0.0004, AIC = 1.07 y  $r^2$  loess residuales = 0.001



Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 74.24$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.23 y  $r^2$  loess residuales = 0.002

### **4.1.3 Análisis de series de gradientes altitudinales de NDVI**

Se sustentó la incorporación de una serie de datos espaciales de NDVI en función de la altitud para corroborar la conjetura acerca de que las variables de cobertura vegetal y NDVI se comportan como gradientes espaciales. Los resultados de las Tablas 48 al 51 para los modelos lineales generalizados (GLM) y las Tablas 53 al 57 para los modelos aditivos generalizados (GAM) confirman la conjetura inicial y permiten aseverar que tales variables deben ser tratadas como series espaciales. De igual manera las Figuras 106 al 145 muestran los modelos obtenidos tanto para los análisis GLM y GAM.

Dado que los NDVI dependen de los tipos de imágenes de satélite, la presente Tesis consideró además evaluar las gradientes por imágenes. Las imágenes seleccionadas fueron las siguientes: imagen SPOT, con resolución espacial de 20 m, del 30 de noviembre de 1998; imagen IKONOS, del 10 de marzo del 2002, de 1 m de resolución espacial (composición de las bandas del pancromático y multiespectrales); imagen ASTER, del 03 de marzo del 2001, de 15 m de resolución, y una imagen WORLD VIEW del 10 de marzo del año 2011, de 0.5 m de resolución espacial.

Por otro lado, dado que los fondos de valle considerados para obtener el juego de datos de gradientes corresponden a microcuencas, cada quebrada constituyó una microcuenca. En adelante cuando se haga referencia o se emplee el término ‘quebrada’ implícitamente se está considerando la microcuenca.

En las tablas respectivas puede inferirse cuando un modelo es lineal o cuadrático observando la ecuación. Las funciones de distribución y enlace ha sido codificadas (escala nominal) como: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. La forma se ha codificado nominalmente como: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico.

Como se había señalado en un acápite anterior, tanto para los GLM y GAM el mejor modelo debe tener una devianza cercana al 100%, un p-valor menor de 0.05, un AIC bajo y  $r^2$  cercano a la unidad. También para este caso, con el fin de determinar el modelo que reunía todos estos requisitos se empleó un análisis multidimensional (multidimensional scaling MDS), a partir de una matriz de similaridad que empleó el índice de Gower. En la sección de discusión se revisan los hallazgos que proporcionó esta prueba.

No está demás señalar que hubo una previa selección de modelos GLM, a partir de 120 modelos estimados sobre la base de cinco quebradas, cuatro imágenes, dos modelos (lineal y cuadrático) y tres combinaciones de distribución y función de enlace (poisson y logarítmica, gamma e inverso, gamma y logarítmico). Las Tablas 48 al 52 presentan los modelos lineales generalizados (GLM) seleccionados. En similar manera para el caso de los GAM se estimó 60 modelos sobre la base de cinco quebradas, cuatro imágenes, un modelo no paramétrico y tres combinaciones de distribución y función de enlace (poisson y logarítmica, gamma e inverso, gamma y logarítmico). Las Tablas 53 al 57 muestran los modelos GAM seleccionados.

#### Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Lúcumo

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	$r^2$	Función	Forma	Ecuación
Spot	96.83	0	0.502	0.39	2	4	NDVI Spot= 31.6258 - 0.134727 Altitud + 0.000154172 Altitud <sup>2</sup>
Aster	79.91	0	0.212	0.18	1	4	NDVI Aster= - 7.61686+ 0.0204831 Altitud -2.04E-05 Altitud <sup>2</sup>
Ikonos	46.37	0	0.959	0.29	1	4	NDVI Ikonos= -6.34213+ 0.0222679 Altitud -2.74E-05 Altitud <sup>2</sup>
World View	86.37	0	1.367	0.26	2	4	NDVI Wview= 13.2471 -0.0711013 Altitud + 0.00011582 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Puquio

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuación
Spot	94.71	0	0.86	0.076	3	4	NDVI Spot = -5.93644 + 0.0196508 Altitud -2.10E-05 Altitud <sup>2</sup>
Aster	68.96	0	0.14	0.102	1	2	NDVI Aster = -6.15125 + 0.0113263 Altitud -9.31E-06 Altitud <sup>2</sup>
Ikonos	18.73	0.03	2.87	0.397	1	4	NDVI Ikonos = -6.49304 + 0.0231062 Altitud -2.70E-05 Altitud <sup>2</sup>
World View	70.57	0	0.22	0.387	1	4	NDVI World View = -4.97692 + 0.0159165 Altitud -1.70E-05 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Guayabo

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuación
Spot	89.17	0	0.089	0.17	1	4	NDVI Spot = -4.08001 + 0.00984444 Altitud -9.92E-06 Altitud <sup>2</sup>
Aster	87.23	0.0	2.584	0.49	3	2	NDVI Aster = -5.31352 + 0.00556962 Altitud
Ikonos	76.50	0	0.553	0.09	1	4	NDVI Ikonos = -10.067 + 0.0327451 Altitud -3.18E-05 Altitud <sup>2</sup>
World View	83.8	0	1.235	0.09	3	4	NDVI World View = -3.55371 + 0.00868001 Altitud -7.99E-06 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Verde BN

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuación
Spot	85.24	0	0.037	0.009	1	2	NDVI Spot = -2.83304 + 0.00516155 Altitud -4.86E-06 Altitud <sup>2</sup>
Aster	36.98	0.0	0.075	0.022	1	4	NDVI Aster = -4.24578 + 0.00857211 Altitud -1.06E-05 Altitud <sup>2</sup>
Ikonos	21.07	0.0	0.491	0.008	1	4	NDVI Ikonos = -3.93247 + 0.0110161 Altitud -1.43E-05 Altitud <sup>2</sup>
World View	42.71	0.0	0.279	0.115	1	4	NDVI Wview = -3.18486 + 0.00935691 Altitud -1.12E-05 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo lineal generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Verde BG

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuación
Spot	92.34	0	0.239	0.227	2	4	NDVI Spot= 17.8507 - 0.0676941 Altitud + 7.73E-05 Altitud^2
Aster	81.1	0	0.039	0.002	1	4	NDVI Aster= - 5.38663 + 0.013705 Altitud -1.56E-05 Altitud^2
Ikonos	45.3	0.0	0.806	0.043	1	4	NDVI Ikonos= - 4.98868 + 0.0175171 Altitud -2.05E-05 Altitud^2
World View	80.73	0	0.263	0.014	1	5	NDVI Wview= - 1.87178 + 0.00830167 Altitud -1.69E-05 Altitud^2

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Lúcumo

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Modelo GAM	Funciones	Forma
Spot	89.68	0	1.616	0.84	2	2	4
Aster	79.78	0	0.213	0.17	2	1	2
Ikonos	51.19	0.0	0.879	0.27	2	1	4
World View	85.23	0	0.334	0.44	2	1	4

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Puquio

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Modelo GAM	Funciones	Forma
Spot	84.859	0	2.379	0.566	2	2	5
Aster	70.42	0	0.13	0.055	2	1	2
Ikonos	31.44	0.002707	2.447	0.323	2	1	6
World View	66.5	0	0.251	0.484	2	1	2

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Guayabo

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	$r^2$	Modelo GAM	Funciones	Forma
Spot	89.23	0	0.089	0.26	2	1	2
Aster	71.97	0	0.217	0.25	2	1	5
Ikonos	74.47	0	0.603	0.12	2	1	2
World View	84.49	0	0.234	0.09	2	1	2

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Verde BN

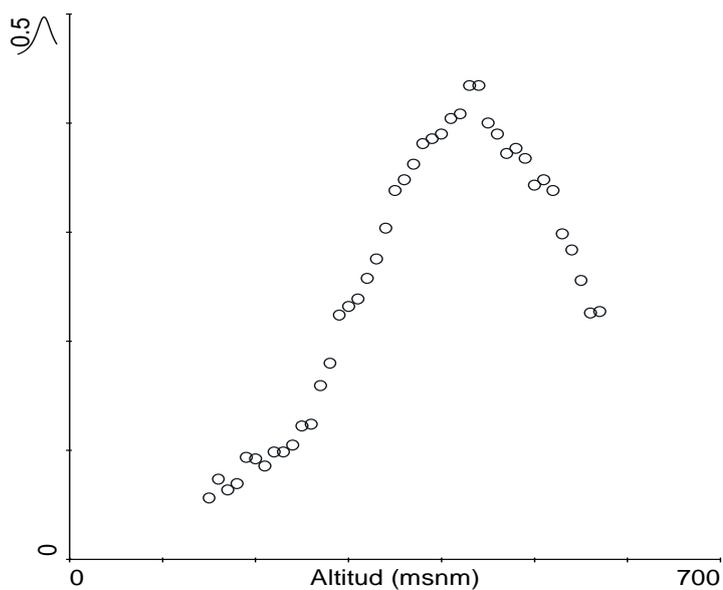
Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	$r^2$	Modelo GAM	Funciones	Forma
Spot	84.14	0	0.041	0.07	2	1	2
Aster	33.86	0.0	0.079	0.06	2	1	4
Ikonos	19.56	0.0	0.502	0.03	2	1	4
World View	45.58	0.0	0.266	0.15	2	1	4

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

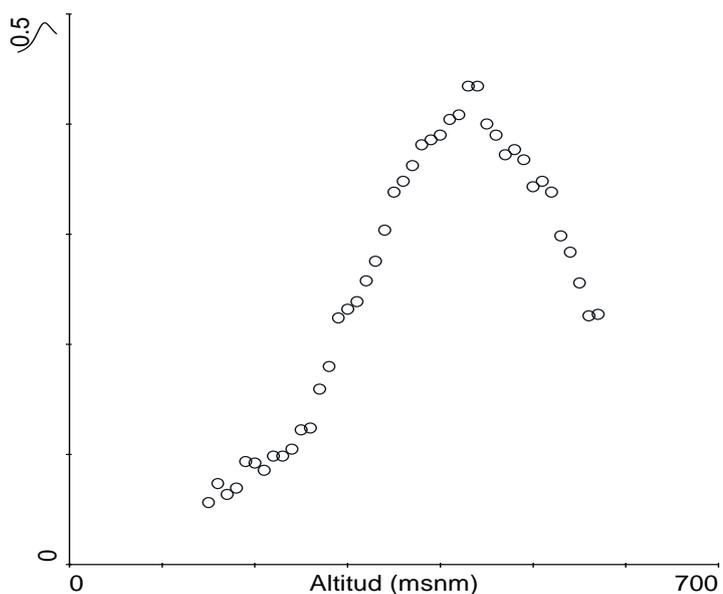
### Modelo aditivo generalizado para el NDVI y la altitud en la quebrada Verde BG

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	$r^2$	Modelo GAM	Funciones	Forma
Spot	91.18	0	0.277	0.41	2	2	2
Aster	73.62	0	0.863	0.12	2	2	2
Ikonos	44.91	0.0	0.816	0.097	2	1	2
World View	79.77	0	0.956	0.12	2	2	5

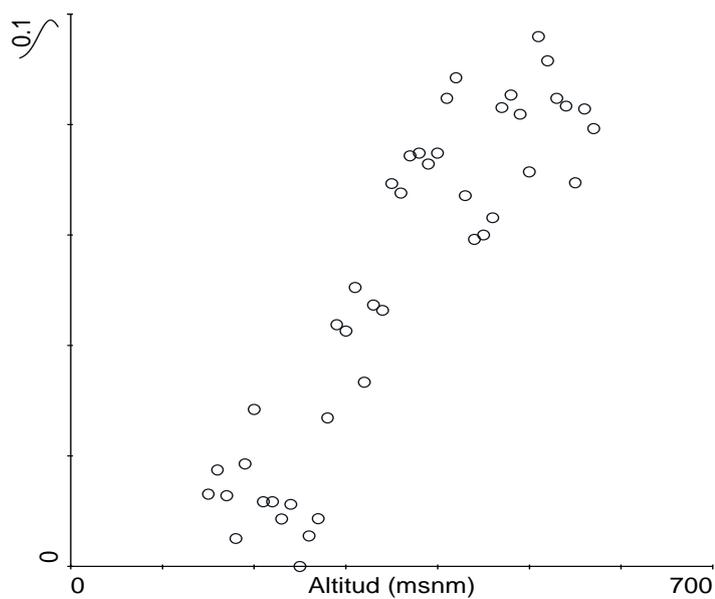
Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico



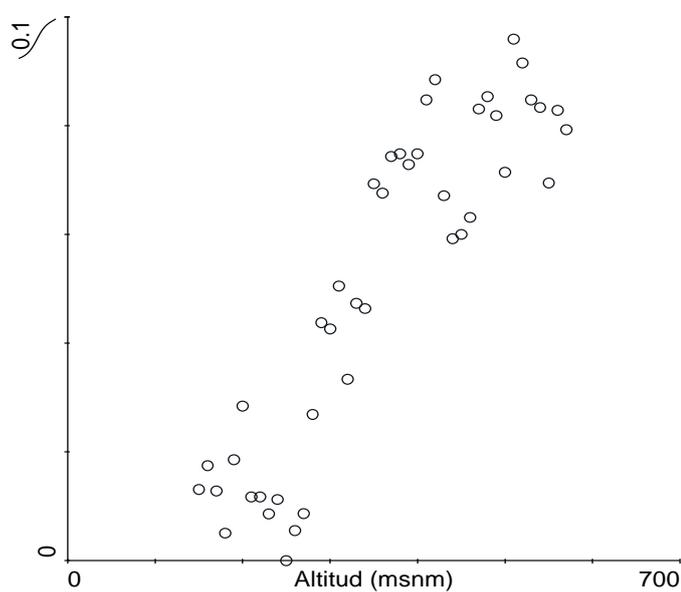
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 96.83$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.50 y  $r^2$  loess residuales = 0.39, lomas de Lúcumo



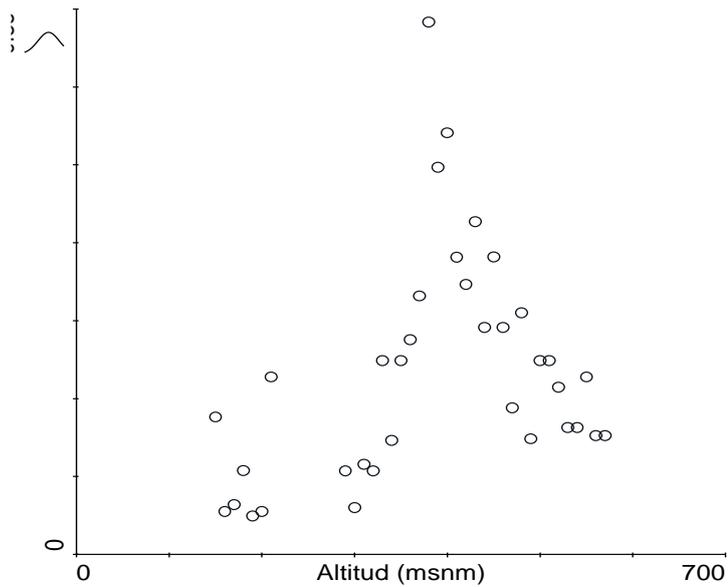
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 89.68$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 1.62 y  $r^2$  loess residuales = 0.84, lomas de Lúcumo



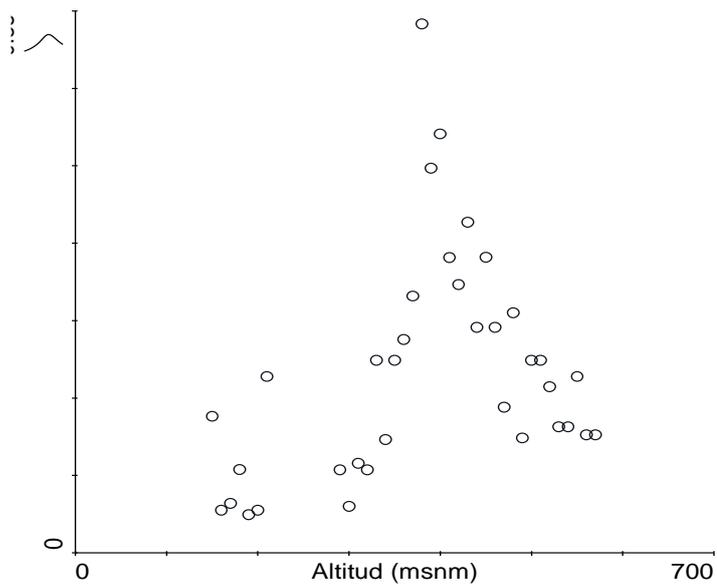
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 79.91$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.21 y  $r^2$  loess residuales = 0.18, lomas de Lúcumo



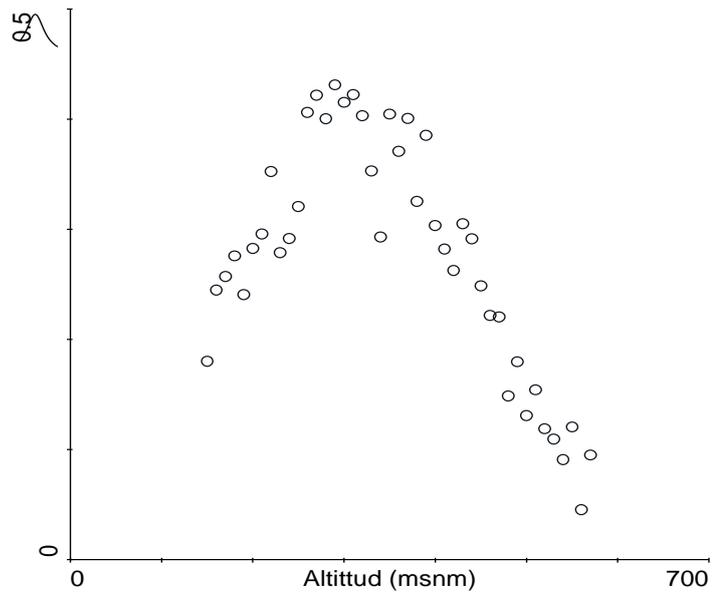
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 79.78$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.21 y  $r^2$  loess residuales = 0.17, lomas de Lúcumo



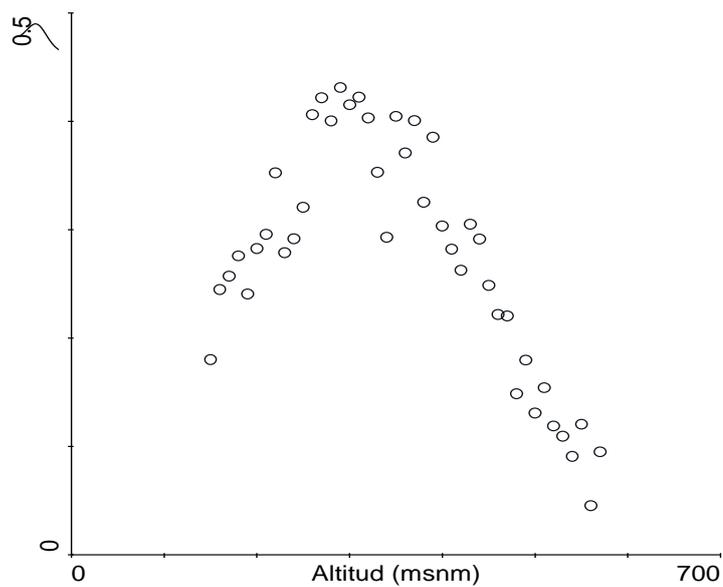
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 46.37$ , p-valor = 0.00004, AIC = 0.96 y  $r^2$  loess residuales = 0.29, lomas de Lúcumo



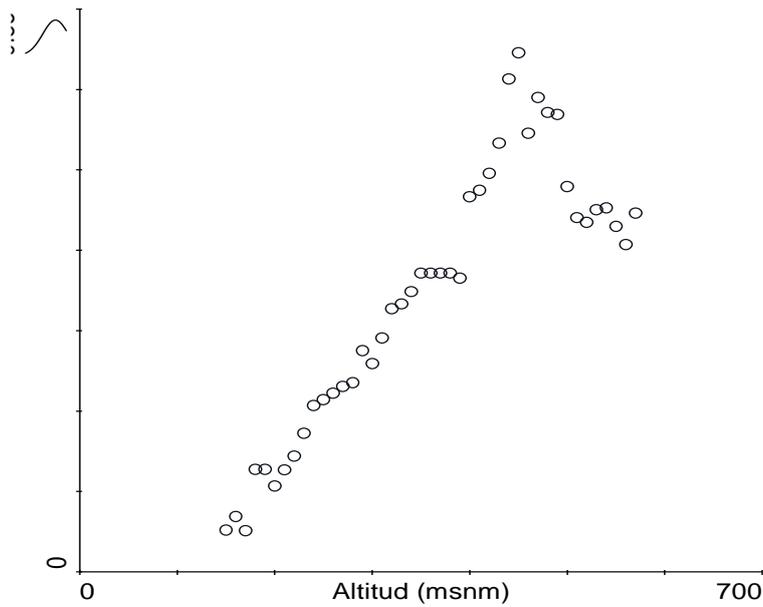
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 51.19$ , p-valor = 0.00001, AIC = 0.88 y  $r^2$  loess residuales = 0.27, lomas de Lúcumo



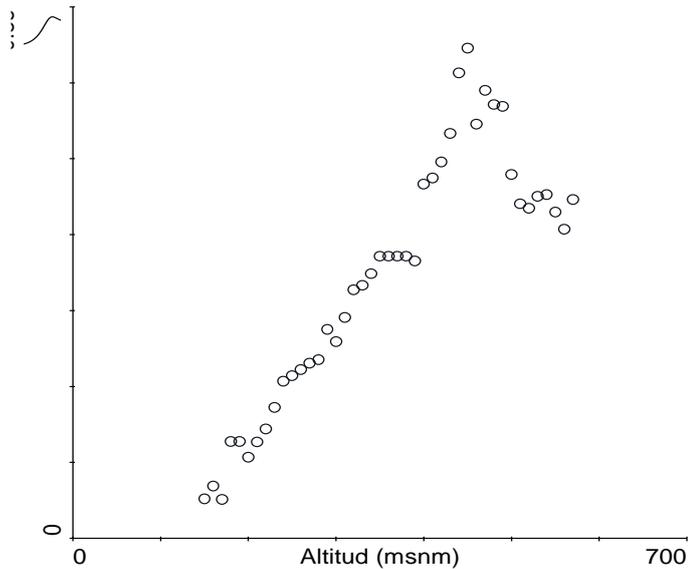
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 86.37$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 1.37 y  $r^2$  loess residuales = 0.26, lomas de Lúcumo



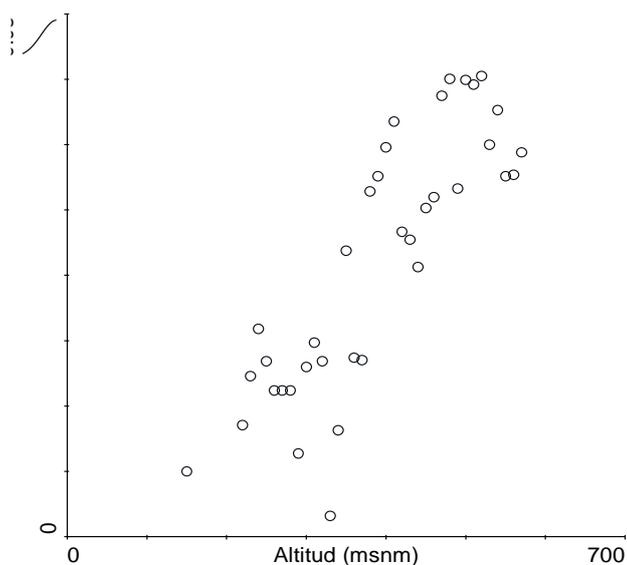
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 85.23$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.33 y  $r^2$  loess residuales = 0.44, lomas de Lúcumo



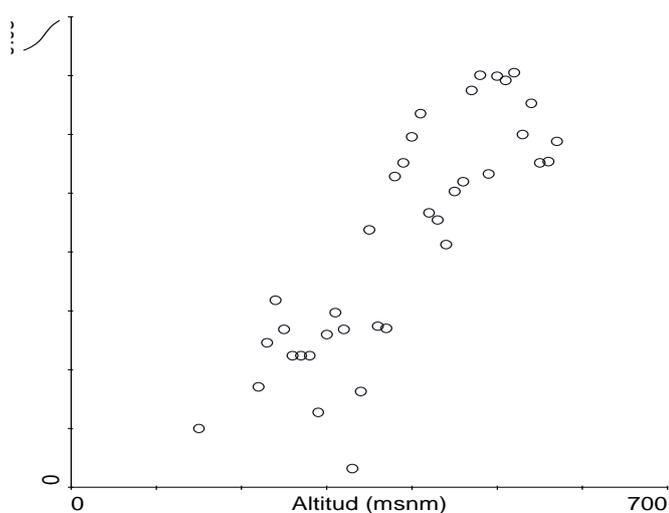
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 94.71$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.86 y  $r^2$  loess residuales = 0.76, lomas de Puquío



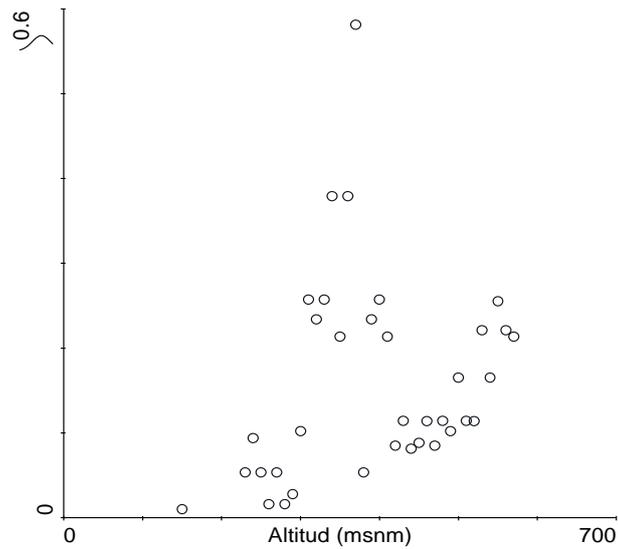
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 84.86$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 2.38 y  $r^2$  loess residuales = 0.57, lomas de Puquío



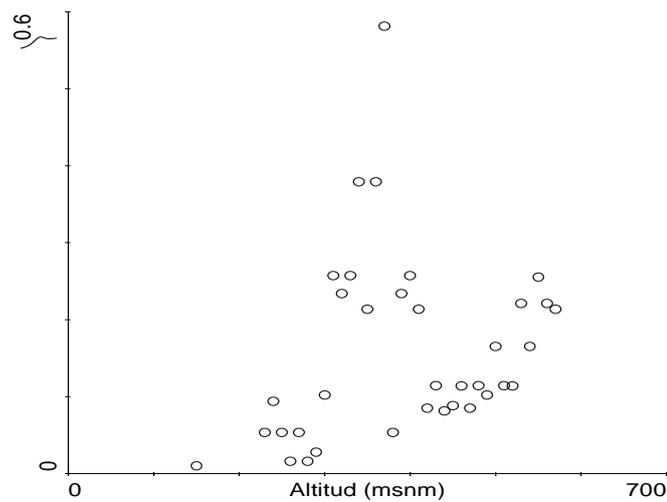
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 68.96$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.14 y  $r^2$  loess residuales = 0.10, lomas de Puquío



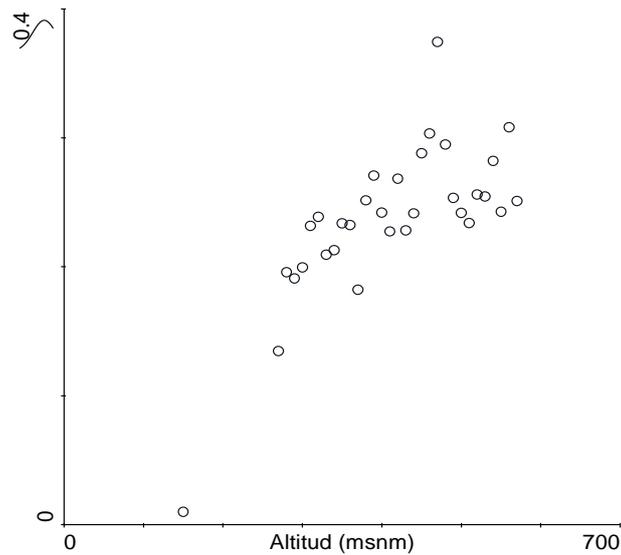
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 70.42$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.13 y  $r^2$  loess residuales = 0.06, lomas de Puquío



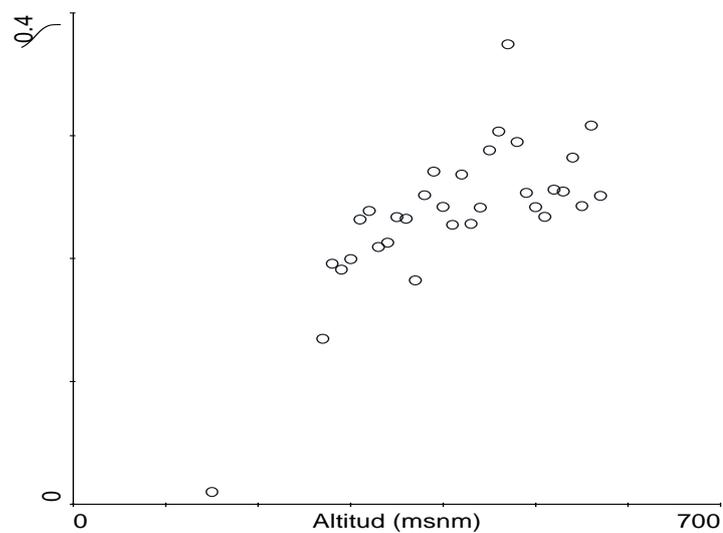
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 18.73$ , p-valor = 0.03, AIC = 2.87 y  $r^2$  loess residuales = 0.40, lomas de Puquio



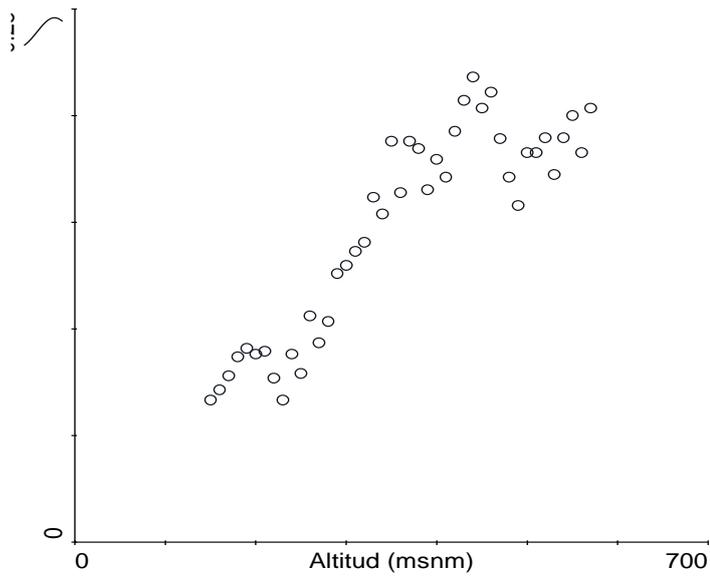
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 31.44$ , p-valor = 0.003, AIC = 2.45 y  $r^2$  loess residuales = 0.32, lomas de Puquio



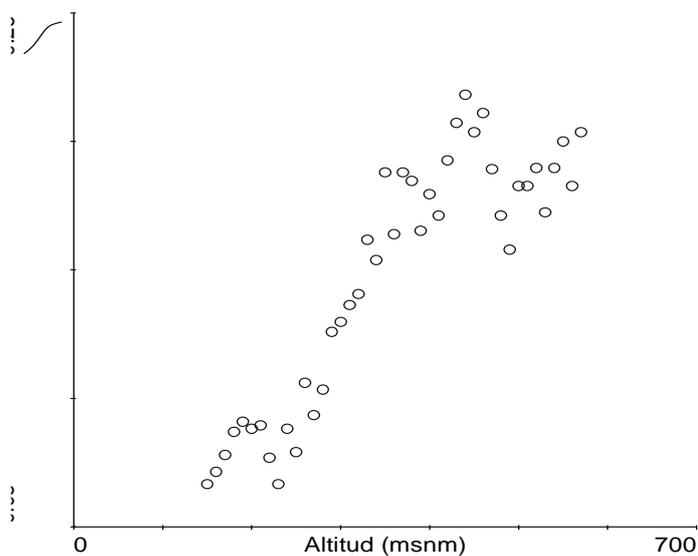
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 70.57$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.22 y  $r^2$  loess residuales = 0.39, lomas de Puquio



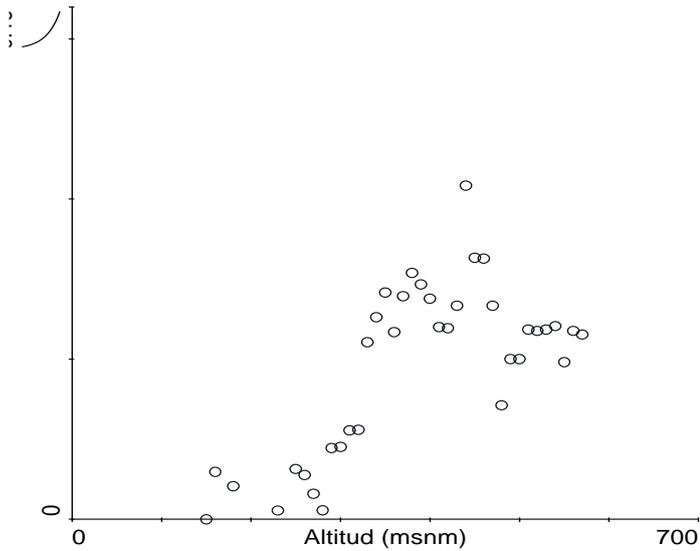
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 66.50$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.25 y  $r^2$  loess residuales = 0.48, lomas de Puquio



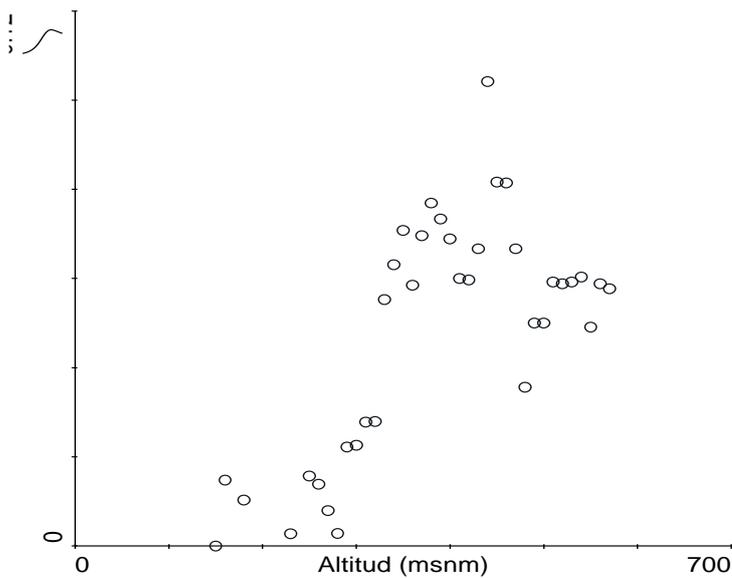
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 89.17$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.09 y  $r^2$  loess residuales = 0.17, lomas de Guayabo



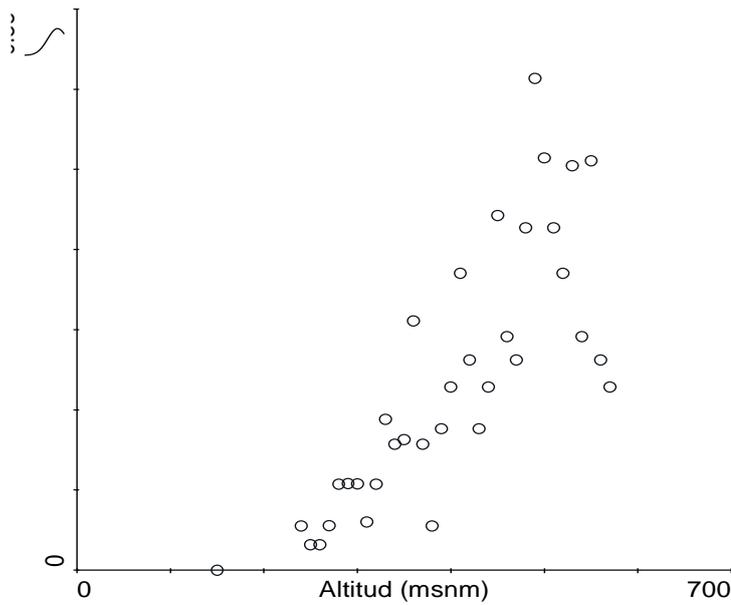
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 89.23$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.09 y  $r^2$  loess residuales = 0.26, lomas de Guayabo



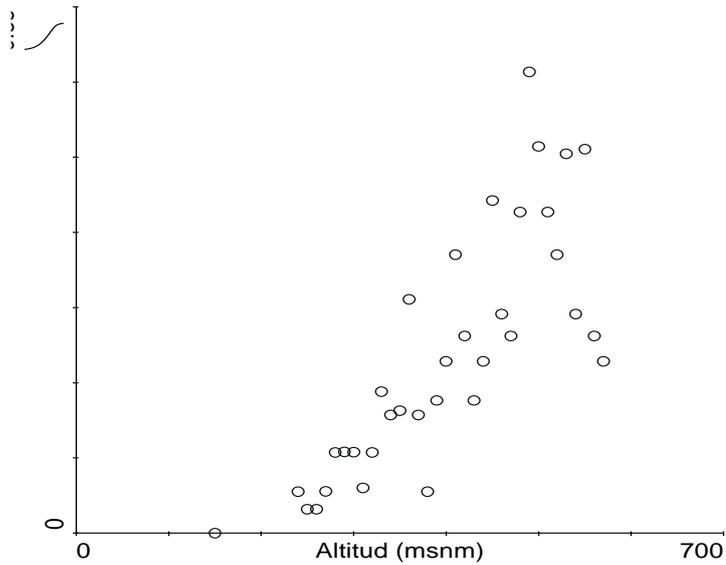
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 87.23$ , p-valor = 0.000004, AIC = 2.58 y  $r^2$  loess residuales = 0.49, lomas de Guayabo



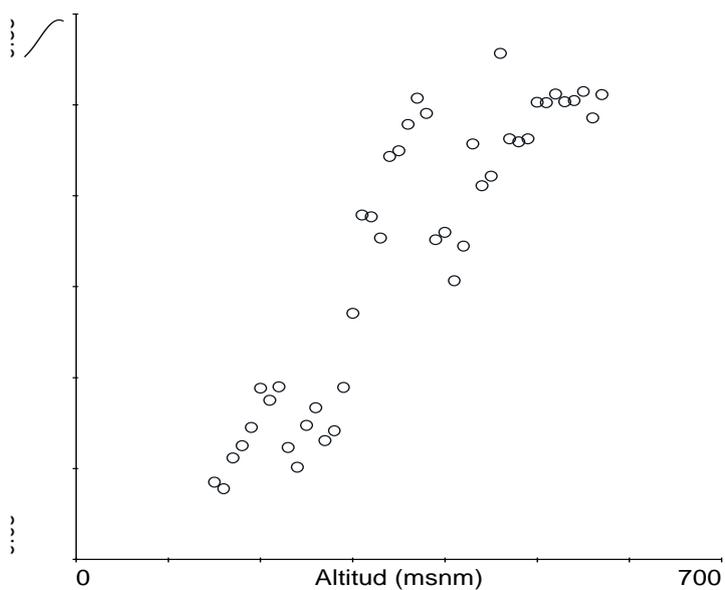
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 71.97$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.22 y  $r^2$  loess residuales = 0.25, lomas de Guayabo



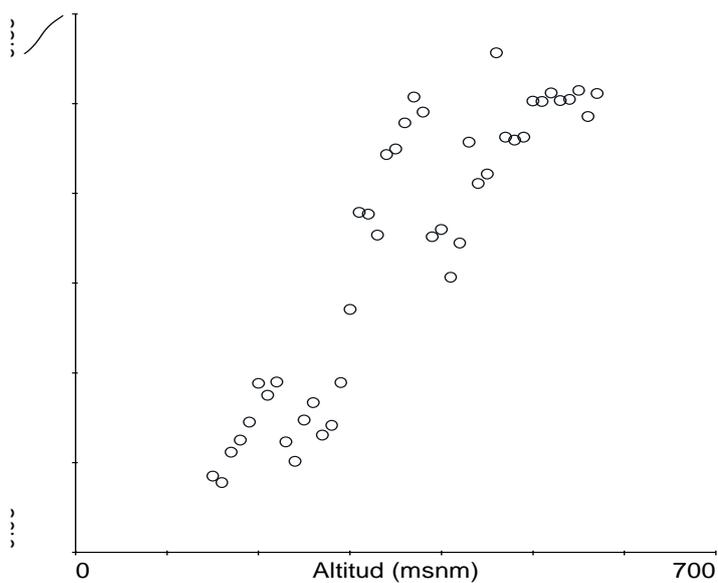
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 76.50$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.55 y  $r^2$  loess residuales = 0.09, lomas de Guayabo



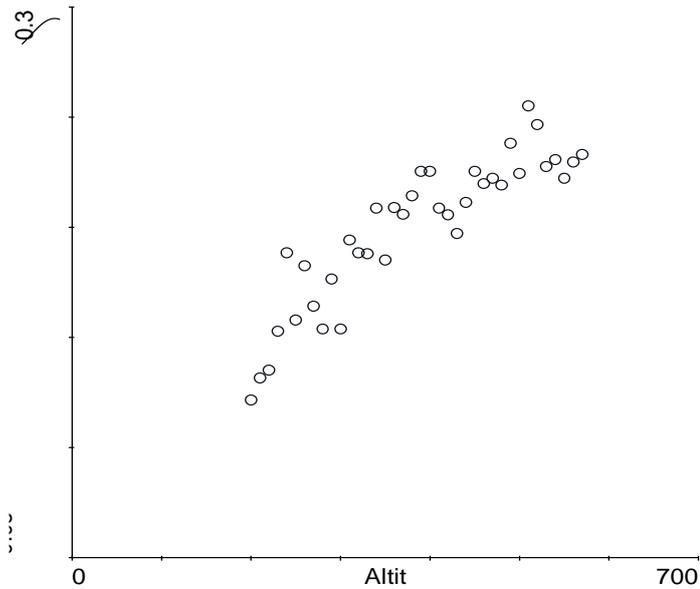
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 74.47$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.60 y  $r^2$  loess residuales = 0.12, lomas de Guayabo



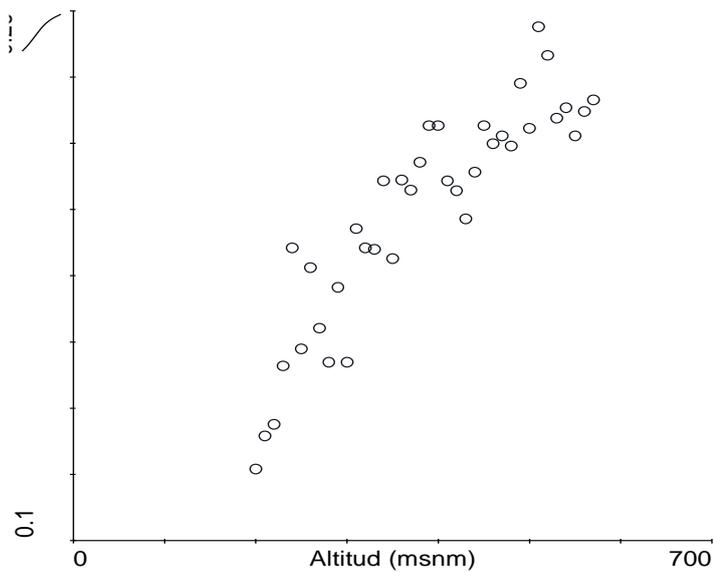
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 83.80$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 1.24 y  $r^2$  loess residuales = 0.09, lomas de Guayabo



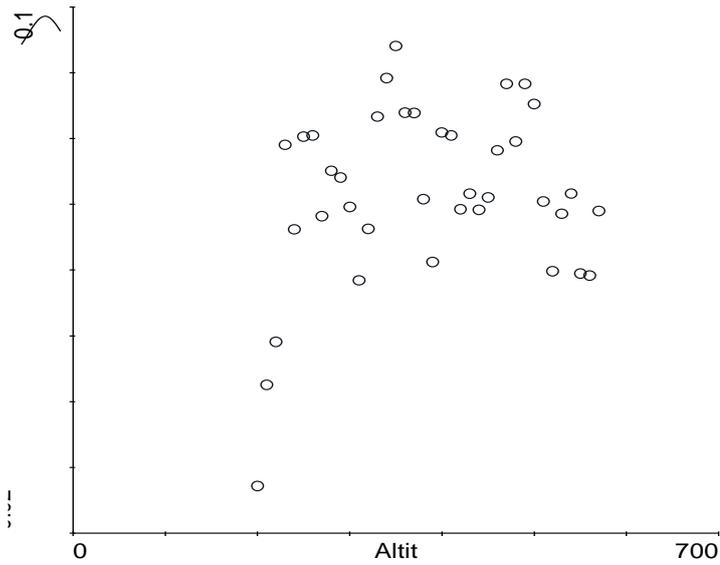
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 84.49$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.23 y  $r^2$  loess residuales = 0.09, lomas de Guayabo



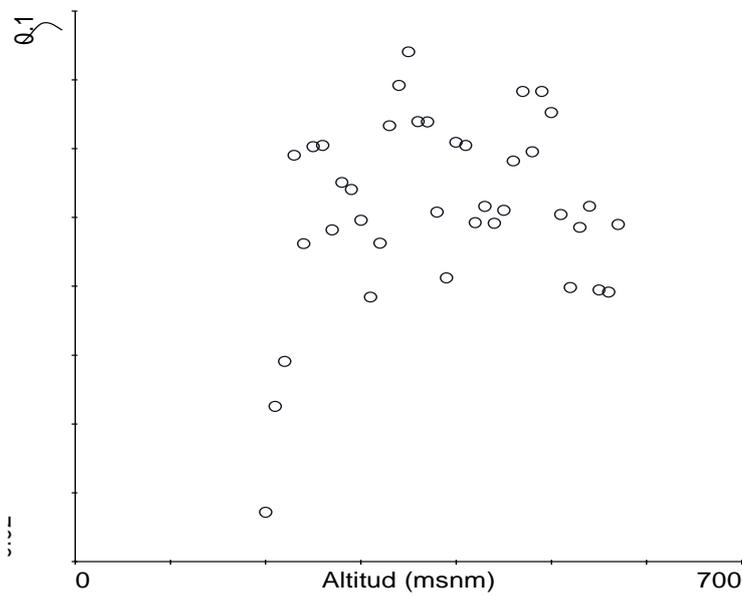
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 85.24$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.037 y  $r^2$  loess residuales = 0.009, lomas de Quebrada Verde Transecto BN



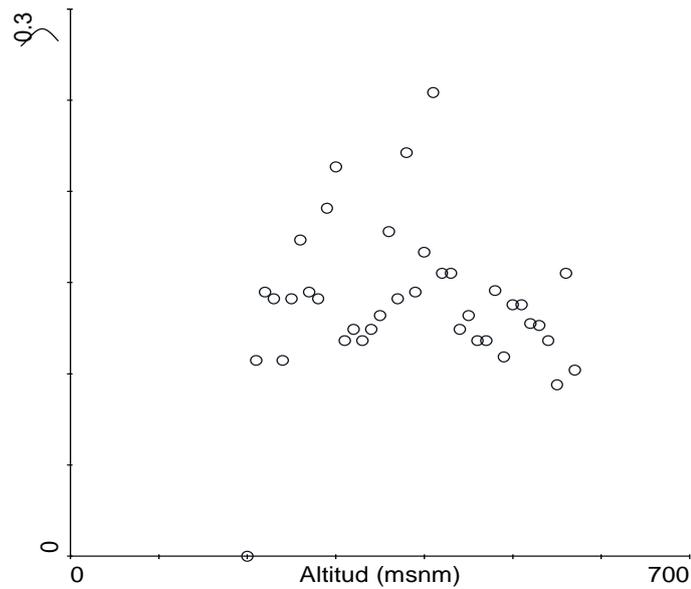
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 84.14$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.041 y  $r^2$  loess residuales = 0.067, lomas de Quebrada Verde Transecto BN



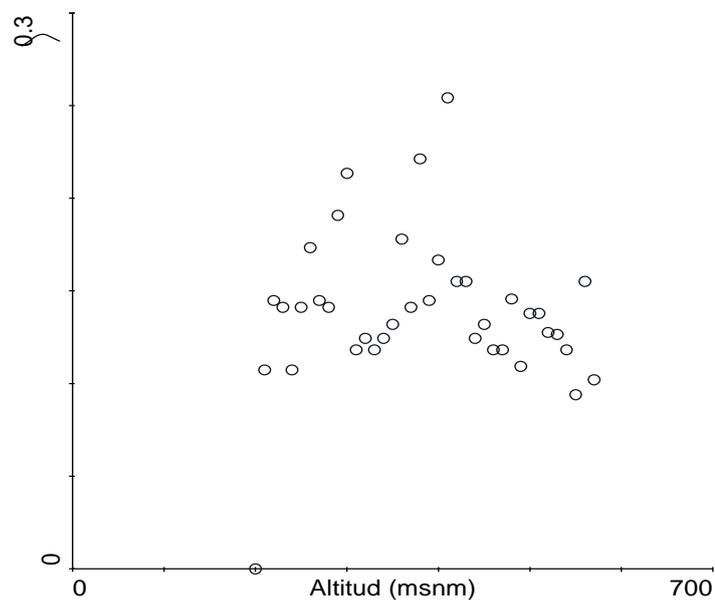
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 36.98$ , p-valor = 0.0002, AIC = 0.075 y  $r^2$  loess residuales = 0.022, lomas de Quebrada Verde Transecto BN



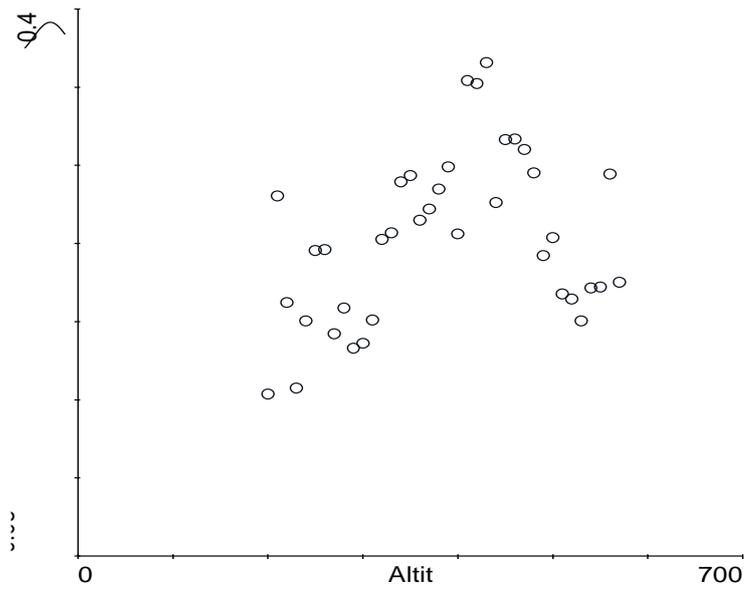
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 33.86$ , p-valor = 0.0006, AIC = 0.079 y  $r^2$  loess residuales = 0.059, lomas de Quebrada Verde Transecto BN



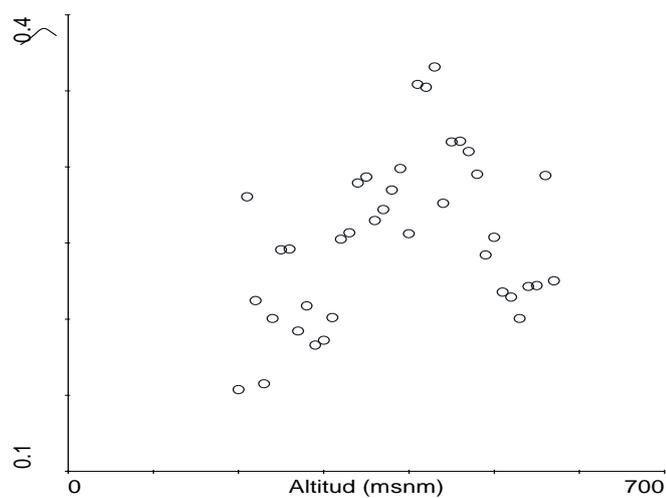
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 21.07$ , p-valor = 0.005, AIC = 0.491 y  $r^2$  loess residuales = 0.008, lomas de Quebrada Verde Transecto BN



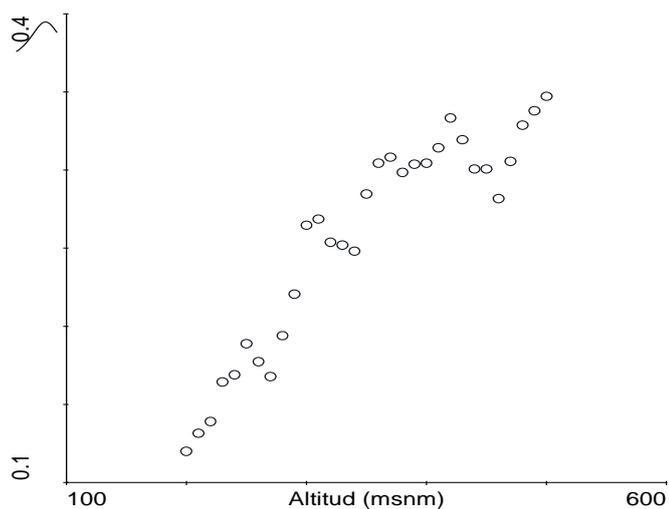
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 19.56$ , p-valor = 0.009, AIC = 0.502 y  $r^2$  loess residuales = 0.032, lomas de Quebrada Verde Transecto BN



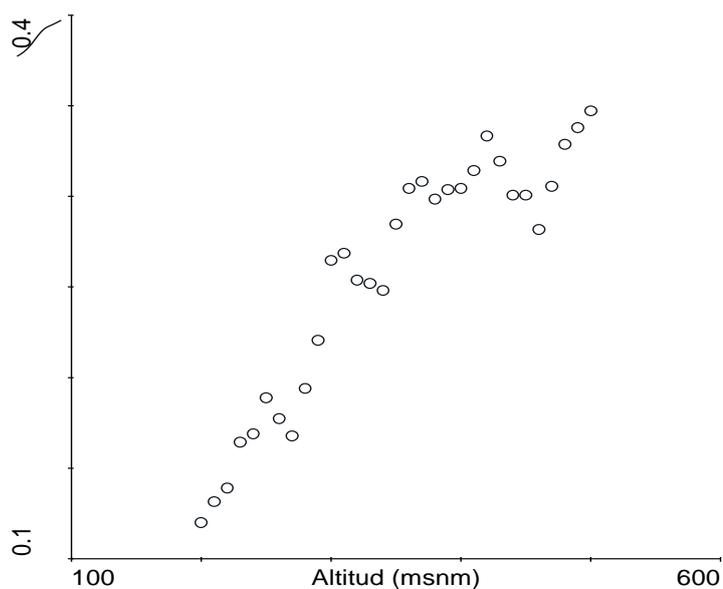
Modelo lineal generalizado para el NDVI World View función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 42.71$ , p-valor = 0.00005, AIC = 0.279 y  $r^2$  loess residuales = 0.115, lomas de Quebrada Verde Transecto BN



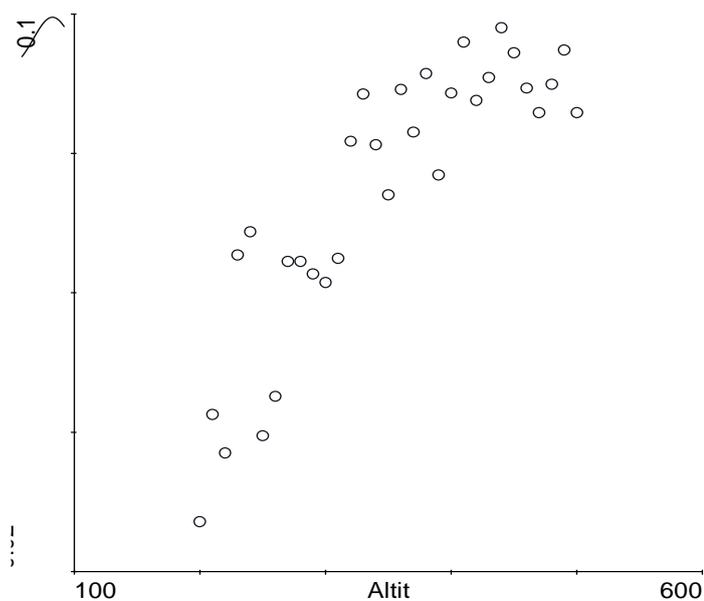
Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 45.58$ , p-valor = 0.00003, AIC = 0.266 y  $r^2$  loess residuales = 0.15, lomas de Quebrada Verde Transecto BN



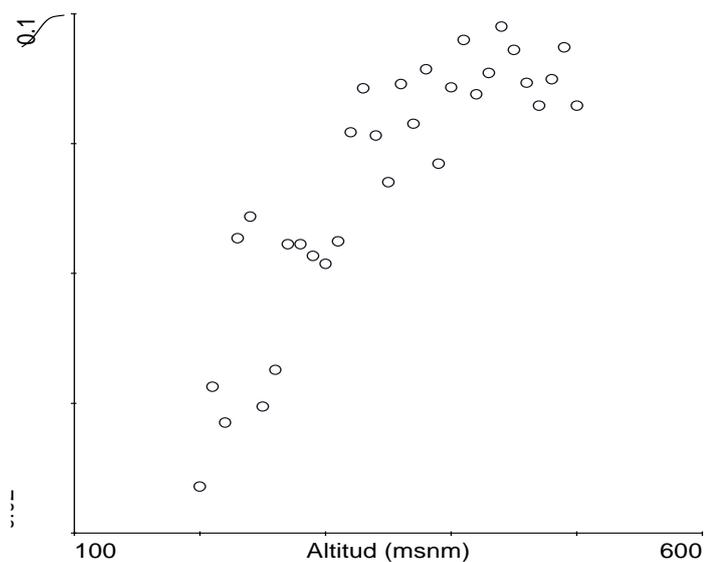
Modelo lineal generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 92.34$ , p-valor =  $< 1.0e-6$  AIC = 0.239 y  $r^2$  loess residuales = 0.227, lomas de Quebrada Verde Transecto BG



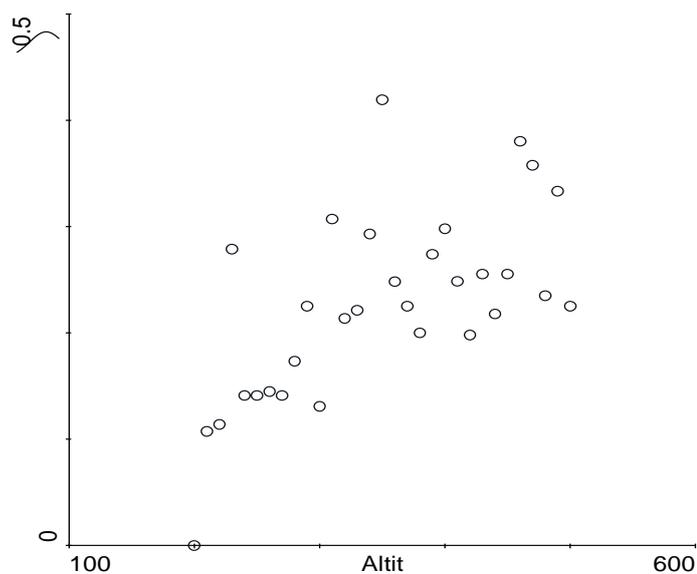
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Spot en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 91.18$ , p-valor =  $< 1.0e-6$  AIC = 0.277 y  $r^2$  loess residuales = 0.413, lomas de Quebrada Verde Transecto BG



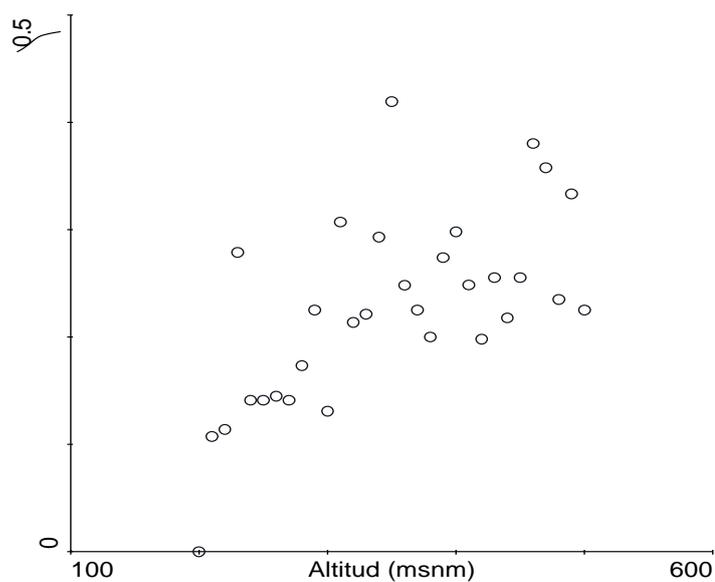
Modelo lineal generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 81.10$ , p-valor =  $< 1.0e-6$  AIC = 0.039 y  $r^2$  loess residuales = 0.002, lomas de Quebrada Verde Transecto BG



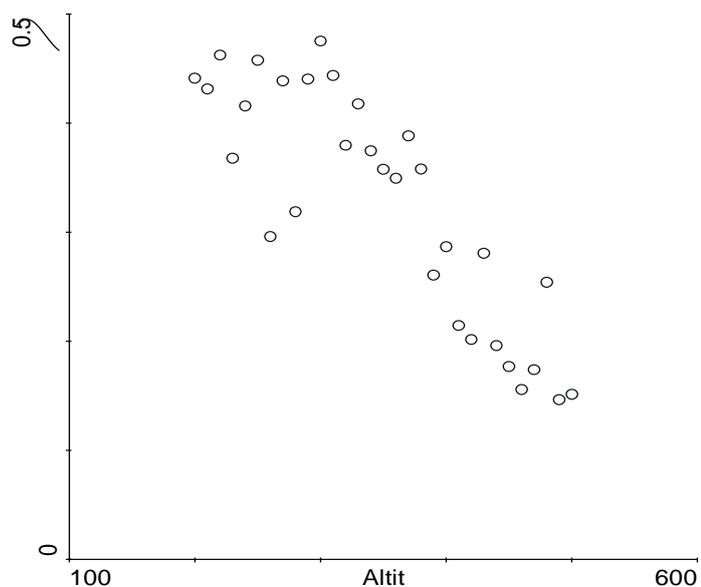
Modelo aditivo generalizado para el NDVI Aster en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 73.62$ , p-valor =  $< 1.0e-6$ , AIC = 0.86 y  $r^2$  loess residuales = 0.12, lomas de Quebrada Verde Transecto BG



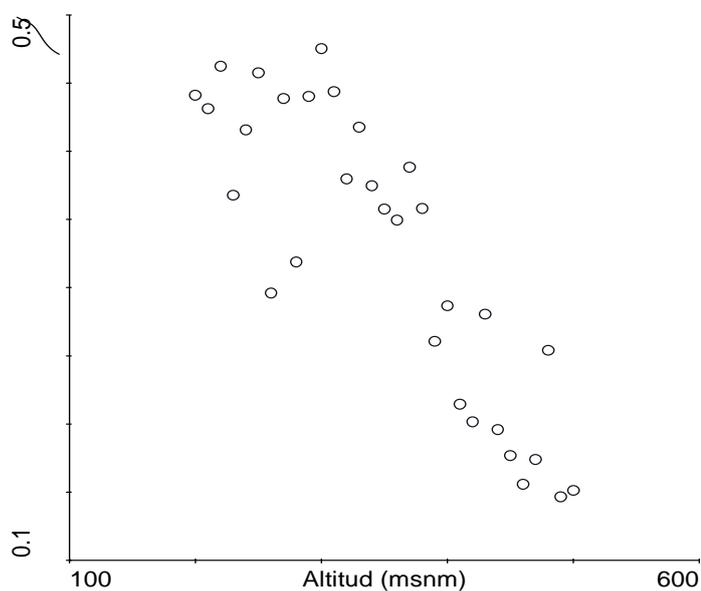
Modelo lineal generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 45.30$ , p-valor = 0.000096, AIC = 0.806 y  $r^2$  loess residuales = 0.043, lomas de Quebrada Verde Transecto BG



Modelo aditivo generalizado para el NDVI Ikonos en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 44.91$ , p-valor = 0.000135, AIC = 0.816 y  $r^2$  loess residuales = 0.097, lomas de Quebrada Verde Transecto BG



Modelo lineal generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 80.73$ , p-valor =  $< 1.0e-6 = 0.806$  y  $r^2$  loess residuales = 0.014, lomas de Quebrada Verde Transecto BG



Modelo aditivo generalizado para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 79.77$ , p-valor =  $< 1.0e-6 = 0.956$  y  $r^2$  loess residuales = 0.115, lomas de Quebrada Verde Transecto BG

## **4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En la presente sección se discuten los resultados sobre las relaciones entre las variables cobertura vegetal y NDVI con respecto a la altitud, y NDVI en función de la cobertura vegetal, en atención a las hipótesis planteadas. Asimismo, se incluye un acápite previo relacionado con la exploración de la estructura espacial de los datos empleados.

### **4.2.1 Estructura espacial de los datos**

En esta sección, bajo el título de estructura espacial de los datos se discuten los resultados obtenidos en la exploración de los datos para probar la normalidad, independencia, autocorrelación y anisotropía. Se concluye que los datos considerados, en el presente estudio, muestran una estructura espacial o comportamiento de gradientes, por lo mismo no deberían haber sido tomados aleatoriamente sino como una serie espacial.

La Tabla 20 muestra que casi un tercio de los juegos de datos, nueve de 25, no presentaron una distribución normal, según resultados de las Pruebas de Shapiro – Wilk, Anderson – Darling, Lilliefors y Jarque – Bera.

Con el fin de superar la limitación de falta de normalidad y poder aplicar las técnicas de regresión se recurrió a su transformación, mediante la técnica Box-Cox, con resultados exitosos (ver Tabla 21), por lo mismo esta característica no resultó crítica. En último caso, los modelos lineales generalizados y los modelos aditivos generalizados no exigen una distribución normal de los datos.

La comprobación de la falta de independencia de los datos si se convirtió en una restricción para aplicar las técnicas estadísticas habituales. Luego de la aplicación de una prueba de rachas se descubrió que solo siete juegos de los 25 mostraban independencia o aleatoriedad (ver Tabla 22). Ello hacía suponer que los datos estaban autocorrelacionados. Si bien habían sido elegidos al azar ello no garantizaba necesariamente que fueran independientes, dada la estructura espacial subyacente en los datos.

Es común asumir que los datos ecológicos provienen de una superficie isotrópica, es decir que corresponden a un mismo patrón espacial en todas direcciones. Sin embargo, ello es una asunción muy forzada sobre todo para las lomas de Atocongo, en la cual se observaron diferentes patrones espaciales en tanto diferentes direcciones de quebradas, como se comprobó en las pruebas de autocorrelación angular. Lo señalado lleva a la recomendación de tratar los datos de altitud, cobertura vegetal y NDVI como gradientes.

Se verificó la autocorrelación espacial de los datos empleando los correlogramas de Moran y Geary. Un tercio de los datos (7 juegos de 25) presentaron una correlación significativa (ver Tabla 23 y Figuras 8 a 29). Si bien en algunos casos las correlaciones de Moran y Geary no fueron significativas ( $p$ -valor  $< 0.05$ ), tales índices señalaban valores elevados de correlación, como es el caso de los datos de altitud, de octubre del 2002, que para un alcance de 100 m presentaba un índice de Moran  $I = 1.09$ , con un  $p$ -valor = 0.13. En similar forma, para la cobertura vegetal, que en una distancia de 100 m, presentaba un  $I = 0.90$ , con un  $p$ -valor = 0.15; y para el NDVI Spot, que en un alcance de 100 m, mostraba un  $I = 0.86$ , con un  $p$ -valor = 0.1995.

En otros casos, los índices de Moran y Geary si se presentaron bastante significativos ( $p$ -valor  $< 0.05$ ). Es el caso de los datos de setiembre del 2001 que para un alcance de 231 m, se obtuvo un índice de Moran = 0.51 y un  $p$ -valor = 0.098. Asimismo, para la cobertura vegetal, en un alcance de 461 m, resultó un  $I = 0.82$ , con un  $p$ -valor = 0.012; y para el NDVI Spot, para un alcance también de 461 m, se obtuvo un  $I = 0.79$ , con un  $p$ -valor = 0.014.

Si bien no se presentó autocorrelación en todos los juegos de datos fue condición suficiente, la ocurrencia de un caso, para afirmar que los datos de altitud, cobertura vegetal y NDVI pueden mostrar autocorrelación significativa, y por ello es imprescindible aplicar las pruebas de verificación de autocorrelación espacial y determinar las distancias o alcances hasta los cuales se presenta la autocorrelación. Es propio anotar que se corrige la autocorrelación tomando las muestras a distancia mayores que los alcances o Lag, por lo mismo es importante determinar estas distancias o alcances.

Es conveniente también verificar si los datos conforman gradientes. Si en los correlogramas de Moran y Geary, los valores de autocorrelación se ordenan como un declive uniforme, se puede afirmar que los datos corresponden a una gradiente. Para la presente investigación, una clara evidencia de comportamiento en gradientes lo muestran los datos de NDVI de setiembre del 2001 (ver Figura 19), altitud, cobertura y NDVI de octubre del 2002 (Figura 20) y NDVI de World View de enero del 2011 (Figura 29). Por ello se concluye que los datos de altitud, cobertura vegetal y NDVI pueden presentarse en forma de gradientes.

Para comprobar la correlación angular se empleó el programa informático PASSaGE y la técnica de correlación angular, propuesto por Simon, 1997, citado por Rosenberg (2011). Los resultados obtenidos (ver Tabla 29 y Figuras 40 a 65) indican que en la estación seca los datos de cobertura vegetal no presentan anisotropía, es decir no hay algún patrón espacial de orientación angular hacia alguna gradiente (quizá se requiere más datos para comprobar algún patrón); en cambio, para esta estación seca, los datos de NDVI si presentan anisotropía, aunque leve; y mucho más, la altitud, una anisotropía, muy marcada. Este comportamiento de la altitud se explica pues los datos altitudinales conforman gradientes orientados hacia la cumbre o vértice si se modela la colina como una figura cónica.

En la estación húmeda las variables estudiadas, altitud, cobertura vegetal y NDVI Spot, se presentan como gradientes espaciales que hacen anisotrópica la superficie; es decir los datos muestran mayor autocorrelación hacia una orientación. La Tabla 29 indica que 16 juegos de datos (de 25) presentan correlación angular, es decir son anisotrópicos. Las Figuras 40 a 65 muestran gráficamente las orientaciones angulares de la estructura espacial de los datos de los inventarios empleados en el presente estudio.

La confirmación de la condición anisotrópica de los datos de las variables en estudio, sobre todo para época húmeda, reduce la aplicabilidad de las pruebas estadísticas que requieren la normalidad e independencia de datos.

Con relación a las series espaciales de NDVI en función de la altitud, puesto que la localización del transecto altitudinal siguiendo el fondo del valle suponía desde su concepción una determinada orientación se esperaba la presencia de anisotropía, lo

cual fue confirmada por las pruebas de autocorrelación y anisotropía, tal como se muestran en las Tablas 30 al 34 y las Figuras 66 a 70.

Las series de datos generados para evaluar la gradiente altitudinal y su relación con el NDVI se muestran autocorrelacionadas hasta alcances de 100 y 200 m aproximadamente; con valores medios a altos del Índice de Moran, 0.19 a 0.85 (ver Tablas 24 a 28 y Figuras 30 a 39).

Por otro lado, como producto de la aplicación de la prueba de correlación angular a las series espaciales, se puede decir que los datos de las variables altitud y NDVI, y por implicancia la cobertura vegetal, tienen patrones espaciales orientados hacia una gradiente. Es importante esta anotación dado que es una restricción para las pruebas estadísticas y técnicas de interpolación de datos que parten de la premisa de estacionariedad de datos (datos isotrópicos), es decir que exigen que las variaciones sean constantes en todas las direcciones, lo cual no es el caso de las variables estudiadas.

Es conveniente anotar que la exploración de datos, no solo de normalidad e independencia de datos sino también de correlogramas y autocorrelación angular, incluida en la presente tesis, fue determinante para seleccionar las pruebas estadísticas aplicadas. Esta acción se corresponde con lo que señala Fortin y Dale (2005), en cuanto a que la fase de análisis de datos en cualquier estudio ecológico, independientemente de que se utilicen datos espacialmente explícitos o no, debería comenzar con una exploración detallada de los mismos.

Si bien los correlograma de Moran y Geary y la Correlación Angular fueron las técnicas que proporcionaron resultados determinantes en la presente tesis es conveniente anotar que no existe una única técnica de análisis espacial que permita capturar todos los atributos y matices del patrón espacial de un conjunto de datos; por tanto será conveniente abordar una misma temática desde planteamientos diferentes y distintas técnicas con los mismos datos.

#### **4.2.2 La cobertura vegetal en función de la altitud**

La hipótesis que estuvo a prueba fue la siguiente: un incremento en la altitud determina una mayor cobertura vegetal, relación que puede expresarse como una función matemática. La contrastación fue realizada a partir de los datos del programa de monitoreo de las lomas de Atocongo, que lleva adelante UNACEM S.A. Se empleó las pruebas de regresión lineal y curvilínea, modelos lineales generalizados y modelos aditivos generalizados.

Los resultados tanto para la regresión lineal y curvilínea, así como para el caso de los modelos generalizados, lineal y aditivo, indicaron que solo los datos de setiembre del 2000 y octubre del 2002 fueron significativos en cuanto a alguna relación entre la cobertura vegetal (%) y la altitud.

Una explicación referente a lo señalado, en el párrafo anterior, puede buscarse en el diseño de muestreo. En secciones precedentes se había anotado que la estrategia de muestreo al azar no era la más indicada para un lugar con anisotropías, estructura espacial y gradientes como es el caso de las lomas de Atocongo.

Otra explicación puede buscarse en la dinámica del ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) o ENSO (por sus siglas en inglés) que ocasiona variaciones significativas en los ecosistemas costeros, con grandes precipitaciones, a veces devastadoras, en la zona norte peruana. Para el caso de lomas existen estudios que señalan los efectos positivos y negativos del ENSO sobre el ecosistema de lomas y su composición florística.

El Índice de Oscilación Sur (IOS) o Southern Oscillation Index (SOI) es un indicador del desarrollo e intensidad del evento El Niño o La Niña en el Océano Pacífico. El SOI es calculado a partir de las diferencias de presión entre Tahití y Darwin (Australia). Los valores negativos de SOI y menores a - 8 indican un episodio El Niño. Contrariamente, los valores mayores que 8 corresponden a episodios La Niña. También existe otro indicador, el Oceanic Niño Index (ONI), que se basa en la temperatura de la superficie del mar en el este ecuatorial del Océano Pacífico. El SOI y el ONI tienen una forma similar pero con signo opuesto.

## Episodios El Niño y La Niña para los datos de monitoreo de lomas de Atocongo

Fecha del inventario	Estación climática del Hemisferio Sur	Southern Oscillation Index (SOI), Episodio	Oceanic Niño Index (ONI), Episodio
12 y 14 de abril del 2001	Otoño	0.3 Neutro	-0.4 Neutro
12 a 15 de Junio del 2002	Otoño	-6.3 Neutro	0.7 El Niño
23 al 30 de setiembre del 2000	Primavera	9.9 La Niña	-0.6 La Niña
14 y el 18 de setiembre del 2001	Invierno	1.4 Neutro	-0.1 Neutro
Octubre del 2002	Primavera	-7.4 Neutro	1.2 El Niño
28 al 31 de Diciembre del 2002	Verano	-10.6 El Niño	1.3 El Niño
10 al 13 de Setiembre 2007	Invierno	1.5 Neutro	-0.8 La Niña
28 al 30 de Diciembre 2007	Verano	14.4 La Niña	-1.4 La Niña
Diciembre del 2011	Verano	23.0 La Niña	-1.0 La Niña

Fuente: Elaboración propia a partir de <http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml> y [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)

La Tabla 58 asocia los indicadores SOI y ONI a las fechas de los datos de los inventarios de vegetación. A partir de esta tabla se puede decir que en atención al indicador ONI (Oceanic Niño Index), los inventarios de setiembre del 2000, setiembre del 2007, diciembre del 2007 y diciembre del 2011 correspondieron a episodios La Niña, en cambio los inventarios de octubre del 2002, diciembre del 2002 y junio del 2002 correspondieron a episodios El Niño (ONI). Por otro lado, los inventarios de abril del 2001 y setiembre del 2001 correspondieron a episodios neutros o interfaces.

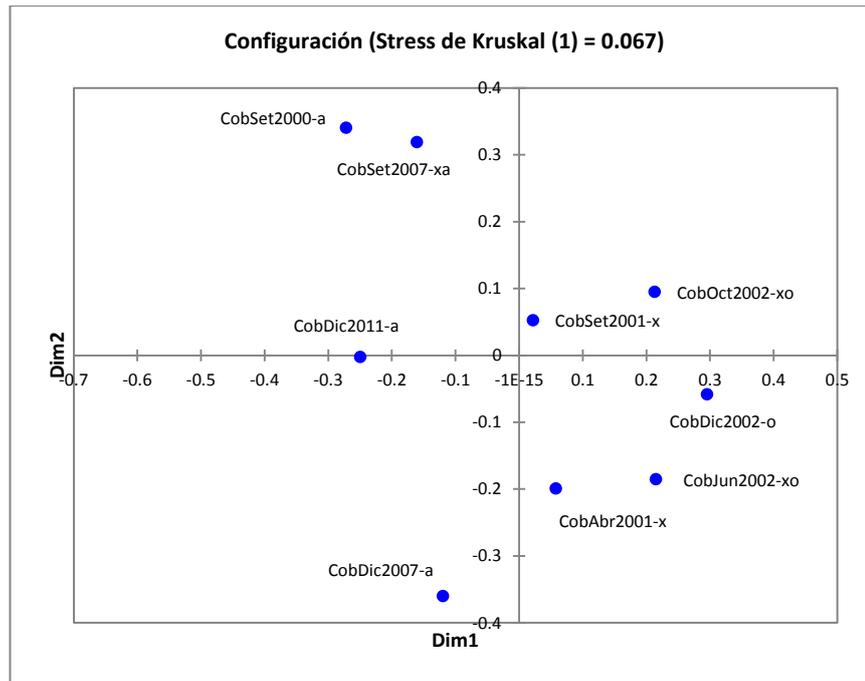
Por otro lado, de acuerdo con el indicador SOI (Southern Oscillation Index) los inventarios de setiembre del 2000, diciembre del 2007 y diciembre del 2011 correspondieron al episodio La Niña. Por otro parte, los inventarios de abril del 2001, setiembre del 2001, junio del 2002, octubre del 2002 y setiembre del 2007 correspondieron a periodos neutros o de interface. El inventario de diciembre del 2002 si correspondió a un episodio El Niño.

En la presente tesis no se incluyó el objetivo de determinar la correlación de los indicadores SOI y ONI con los datos de cobertura vegetal. Se tendría que haber trabajado con toda una serie completa de datos mensuales o anuales, de cobertura vegetal, lo cual no estuvo disponible para la presente investigación. Dado que dicho análisis no fue parte de los alcances de la presente tesis quedó pendiente (como recomendación) saber si alguna variabilidad observada, debido al ENSO, explicaba la falta de correspondencia o ajustes en la relación entre la cobertura vegetal y la altitud.

Para efectos preliminares y con fines de la presente discusión se corrieron regresiones entre las coberturas media, máxima y mínima (como variables dependientes) versus los valores de SOI y NOI, respectivamente. En ninguno de los casos se apreció alguna relación, por lo que no se podría afirmar que los valores de SOI y NOI determinan la cobertura vegetal de las lomas de Atocongo.

Adicionalmente se efectuó un análisis de escalamiento multidimensional (MDS) con los valores de las coberturas medias, máximas y mínimas y los respectivos valores del SOI y NOI. El MDS se realizó sobre la base del Índice de Gower, un modelo absoluto (no ordinal), Stress de Kruskal (1), configuración inicial aleatoria y cinco repeticiones. La Figura 146 muestra este escalamiento. Se observan bastante dispersos los datos, en una primera vista. Con algún mayor detenimiento puede observarse que los datos que corresponden a los años La Niña se colocan al otro lado al otro de los datos de años El Niño, separados por el eje de la primera dimensión.

Para complementar el escalamiento multidimensional se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Se obtuvo un K (valor observado) de 78.412, un K (valor crítico) de 15.507, GDL 8, p-valor (bilateral)  $< 0.0001$  significativo para un alfa de 0.05. Esta prueba señaló que los datos no eran similares. Se incluyó en la prueba las comparaciones múltiples por pares mediante el procedimiento de Conover-Iman (ver Tabla 59). Se observan algunas regularidades como el caso de los juegos de datos de cobertura de diciembre del 2011, setiembre del 2007 y setiembre del 2000 que se muestran agrupados (episodios La Niña). De igual manera, se observan cercanos los juegos de datos de junio del 2002, diciembre del 2002 y octubre del 2002 (episodios El Niño).



Escalamiento multidimensional de los datos de cobertura vegetal sobre la base de sus coberturas mínimas, medias y máximas, SOI y NOI (a = La Niña, o = El Niño, x = neutro)

No se incluyó una prueba de análisis de componentes principales dado que no se contaba con una matriz completa de datos. El número de observaciones (n) de los juegos de datos por años no eran iguales. Si se hubiera incluido la estimación de datos faltantes mediante la media o el vecino más cercano se hubiera agregado ruido.

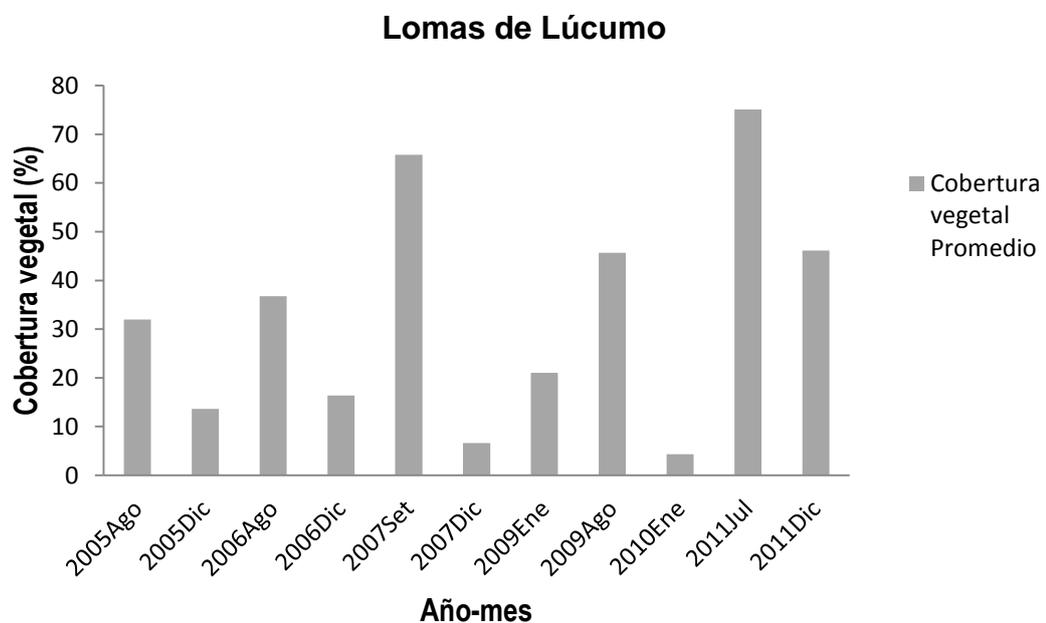
Comparaciones por pares (Conover-Iman) de los juegos de datos de cobertura vegetal para episodios El Niño y La Niña

Muestra	Grupos
CobDic2007-a	A
CobAbr2001-x	A
CobJun2002-xo	A      B
CobDic2002-o	B      C
CobOct2002-xo	C      D
CobSet2001-x	C      D
CobDic2011-a	D      E
CobSet2007-xa	E
CobSet2000-a	E

Simbología: a = La Niña, o = El niño, x = interface o neutro

Se concluye que el ENOS agrega variabilidad que debe ser atendida en un análisis de gradiente de cobertura vegetal respecto a la altitud. Cabría la conjetura que en años de elevada posibilidad de mayor cobertura vegetal la gradiente mencionada se puede comportar con una curva unimodal y en el caso de años con baja posibilidad de mayor cobertura vegetal la gradiente cobertura vegetal vs altitud podría tener una comportamiento lineal. Estas conjeturas se mantienen y la presente tesis no agrega pruebas a favor ni en contra.

La Figura 147 ha sido tomada de un estudio relacionado (Cuya, 2016) y muestra una serie de tiempo de la cobertura vegetal promedio de 12 transectos. Dicho estudio construyó la mencionada serie de tiempo del 2005 al 2011, a partir de datos registrados en transectos permanentes, información que no estuvo disponible para el presente estudio. La inclusión de la mencionada figura tiene el propósito ilustrativo de mostrar la variabilidad de la cobertura vegetal a lo largo de los años. No fue un objetivo de la presente investigación evaluar la relación de los indicadores del ENOS versus las variables de comportamiento de la vegetación. La inferencia de que tales variables de vegetación dependen de variables del ENOS no queda probada y se recomienda la respectiva investigación.



Serie de tiempo (2005-2011) de cobertura vegetal promedio para las lomas de Atocongo, Fuente (Cuya, 2016)

### Análisis mediante regresión lineal

Dado que las características de la vegetación de lomas dependen de las variaciones estacionales fue pertinente determinar la relación de las variables estudiadas considerando la estación más seca (verano) y la más húmeda (invierno). Como se había anotado en la sección anterior, también es importante tener en cuenta que tales variaciones pueden estar asociadas al ENSO. La variable cobertura vegetal, en la época de verano, se mostró aleatoria respecto a la altitud pues no se observó alguna gradiente o tendencia definida determinada por esta variable (ver Tablas 35, 36 y 37).

En la época de invierno, si bien el modelo teórico esperado para la variable cobertura vegetal explicada por la altitud era una curva unimodal, cabía la posibilidad de obtener relaciones lineales; y ese fue el caso de la relación cobertura vegetal y altitud como regresora, para datos de invierno, setiembre del 2000 ( $r^2 = 0.517$ ) y para datos de octubre del 2002 ( $r^2 = 0.954$ ). Las ecuaciones respectivas se anotan a continuación: Cobertura =  $-36.79 + 0.26$  Altitud; y Cobertura =  $2.9 + 0.12$  Altitud

### Análisis mediante regresión curvilínea

Dado que el modelo ideal era una curva unimodal se incluyó una regresión cuadrática. Las Tablas 39 al 41 muestran que para los datos de invierno, la relación de la cobertura vegetal respecto a la altitud, evaluada mediante una regresión cuadrática, solo fue significativa ( $p$ -valor  $< 0.5$ ) para los datos de setiembre del 2000 (datos interpolados), con un  $r^2 = 0.299$  y octubre del 2002, con un  $r^2 = 0.966$ . Los datos de setiembre del 2000, setiembre del 2001, diciembre del 2002, setiembre del 2007 y diciembre del 2007 no mostraron la tendencia esperada de una curva unimodal ni tampoco lineal.

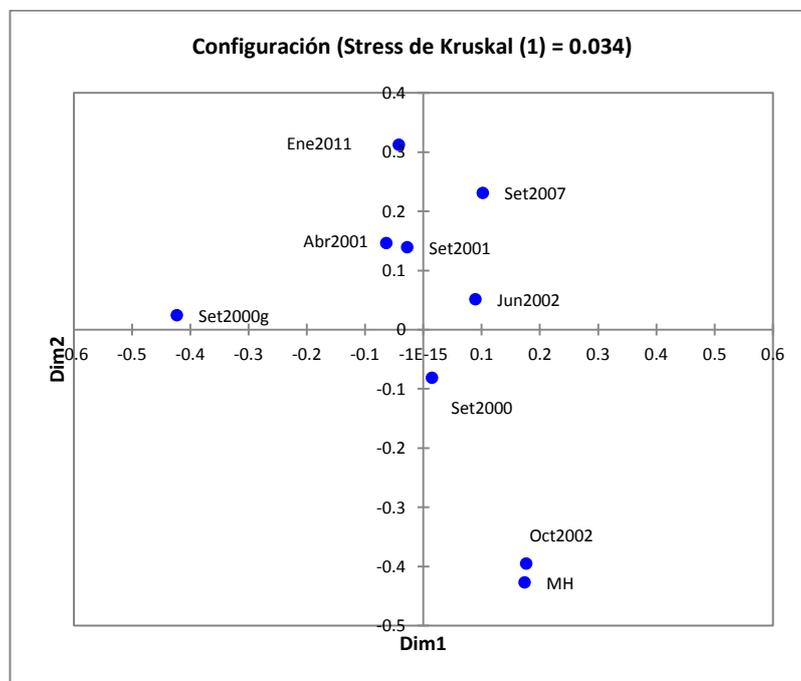
A continuación se muestran las ecuaciones respectivas para datos de setiembre del 2000 (datos interpolados), y octubre del 2002: Cobertura =  $42.321 - 0.134$  Altitud +  $0.0004$  Altitud<sup>2</sup>; Cobertura =  $7.357 - 0.060$  Altitud +  $0.001$  Altitud<sup>2</sup>

### Análisis mediante el modelo lineal generalizado

La Tabla 43 y la Figuras 71, 77, 81, 87, 89, 93, 99 y 102 muestran los resultados para este análisis. Los modelos lineales generalizados obtenidos para la relación de la cobertura vegetal respecto a la altitud tienen una devianza entre 12.6 y 93.1 %, es

decir, ajustes desde bajos hasta muy altos (ver Tabla 43). Los modelos para los cuales habría una mención son los que corresponden al mes de octubre 2002 con 93.1 % de ajuste (Figura 93) y setiembre del 2000 con un ajuste de 54.2 % (Figura 71); ambos lineales. El primero de los mencionados explica el 100 % de la variabilidad debido a la altitud y el siguiente solo explica el 21 % de esta variabilidad como asociada a la altitud. También es importante incluir el modelo para junio del 2002 (Figura 89), que presentó un comportamiento unimodal, con un 37.5 % de ajuste a los datos y un 40 % de explicación de la variabilidad asociada a la altitud. Este modelo es que mejor explica la variabilidad asociada a la altitud ( $r^2=0.4$ ) aunque su p-valor fue 0.07.

El escalamiento multidimensional que muestra la figura 148 indica que el modelo lineal generalizado para octubre del 2002 es el que más se acerca al modelo hipotético (MH). El modelo ideal debe tener una alta devianza, un p-valor menor de 0.05, un AIC bajo, ser cuadrático, con distribución gamma y función de enlace logarítmica y forma unimodal. Por otro lado, adicionalmente, el modelo lineal generalizado para setiembre del 2000 podría incluirse entre los que reúnen también algunas de las características deseadas.



Escalamiento multidimensional de los modelos GLM de cobertura vegetal en función de la altitud, sobre la base de su devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo

En cuanto a las ecuaciones de los modelos que mejores ajustes tuvieron se puede señalar las siguientes: para octubre del 2002 la ecuación resultante fue Cobertura =  $1.43366 + 0.00732579 \text{ Altitud}$  (ver Figura 93); para setiembre del 2000, Cobertura =  $3.71059 + 0.00139059 \text{ Altitud}$  (ver Figura 71) y para junio del 2002, Cobertura =  $-30.8373 + 0.145152 \text{ Altitud} - 0.000154861 \text{ Altitud}^2$  (ver Figura 89).

Respecto al comportamiento unimodal podría decirse que tan solo se presenta en los datos de junio del 2002 y enero del 2011. La Figura 89 muestra el modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de junio del 2002 en función de la altitud (msnm), el cual es cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 37.52$ , p-valor = 0.07, AIC = 6.63 y  $r^2$  loess residuales = 0.40. Asimismo, la Figura 102 muestra el modelo lineal generalizado para la cobertura vegetal (%) de enero del 2011 en función de la altitud, el cual es cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 22.17$ , p-valor = 0.13, AIC = 12.39 y  $r^2$  loess residuales = 0.03.

Tal comportamiento se correspondería con lo que señaló Uğurlu y Oldeland (2012), que mediante modelos Huisman Olf Fresco (HOF) determinaron que en el 16% de los casos las respuestas fueron unimodales, mientras que el 31% mostró respuestas lineales y los restantes 31%. También estaría en la línea de lo que Muenchow, Bräuning, Rodríguez y von Wehrden (2013), hallaron para las lomas del cerro Mongón, cerca de Casma, en la región Ancash, para una respuesta unimodal de la distribución y riqueza de especies de lomas a lo largo del gradiente altitudinal. De igual modo con lo que señala Grau, Grytnes y Birks (2007), para una respuesta unimodal de la riqueza de especies de hepáticas y musgos a lo largo de una gradiente altitudinal en el Himalaya central en Nepal (100–5500 msnm).

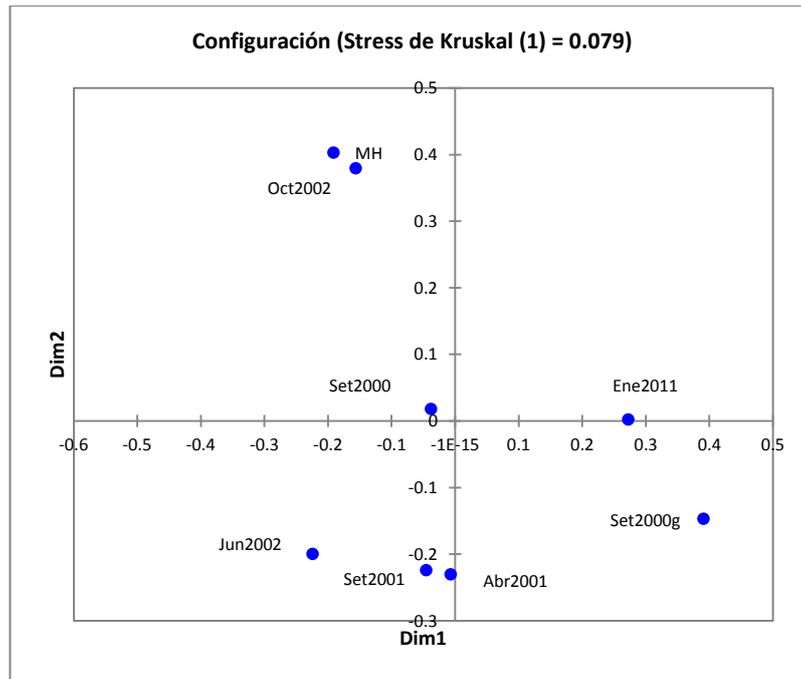
Referente al comportamiento unimodal es conveniente tener en cuenta lo que señala Zhong Wang, Luo, Li, Tang y Du (2013), quienes estudiaron las causas del patrón unimodal de la biomasa y la productividad en prados alpinos a lo largo del gradiente altitudinal en regiones semiáridas. Tales autores señalan que el crecimiento es limitado por la sequedad a las altitudes bajas y en altitudes mayores por las temperaturas bajas, lo cual produce un modelo unimodal de biomasa y productividad asociado a una combinación óptima de temperatura y disponibilidad de agua.

En el caso de las lomas los niveles medios presentan una mayor captación de humedad atmosférica, respecto a las partes bajas y altas. Los vientos húmedos descargan la humedad directamente en la parte media de las laderas, en los sitios específicos bien orientados hacia la dirección de los vientos, originando parches de mayor cobertura vegetal. Cuando un transecto altitudinal cruza tales parches se tendría un comportamiento unimodal. En el caso que dicho transecto no atravesara tales parches de mayor cobertura vegetal el comportamiento no sería unimodal sino su tendencia sería más hacia un comportamiento lineal. Se tendrían varios modelos que representen tales comportamientos y también varios umbrales o modas que represente la mayor cobertura vegetal en relación con la altitud. Una explicación mayor se incluye en la sección 4.2.6 Distribución espacial del NDVI, en la cual se aporta evidencias sobre la base de isolíneas de NDVI.

En general, si se dispusieran muestras de cobertura vegetal ubicándolas exactamente en transectos altitudinales se obtendrían respuestas más definidas sobre el comportamiento unimodal. Se recomienda que en futuros trabajos se incluya dicho criterio. En el presente estudio se empleó información de muestras provenientes de un diseño aleatorio y ello podría explicar el porqué no se obtuvieron comportamientos unimodales bien definidos en varios análisis considerados. La Figura 150 muestra la distribución geográfica de las muestras que se emplearon en el presente estudio.

#### Análisis mediante modelos aditivos generalizados

La Tabla 46 y las Figuras 72, 78, 82, 88, 90, 94 y 103 presentan la información sobre los modelos GAM para la cobertura vegetal en función de la altitud. Al igual que el caso de los modelos GLM, los modelos para octubre del 2002 y setiembre del 2000 son los que más se acercan al ideal hipotético, según se desprende de la observación del escalamiento multidimensional que muestra la Figura 149.



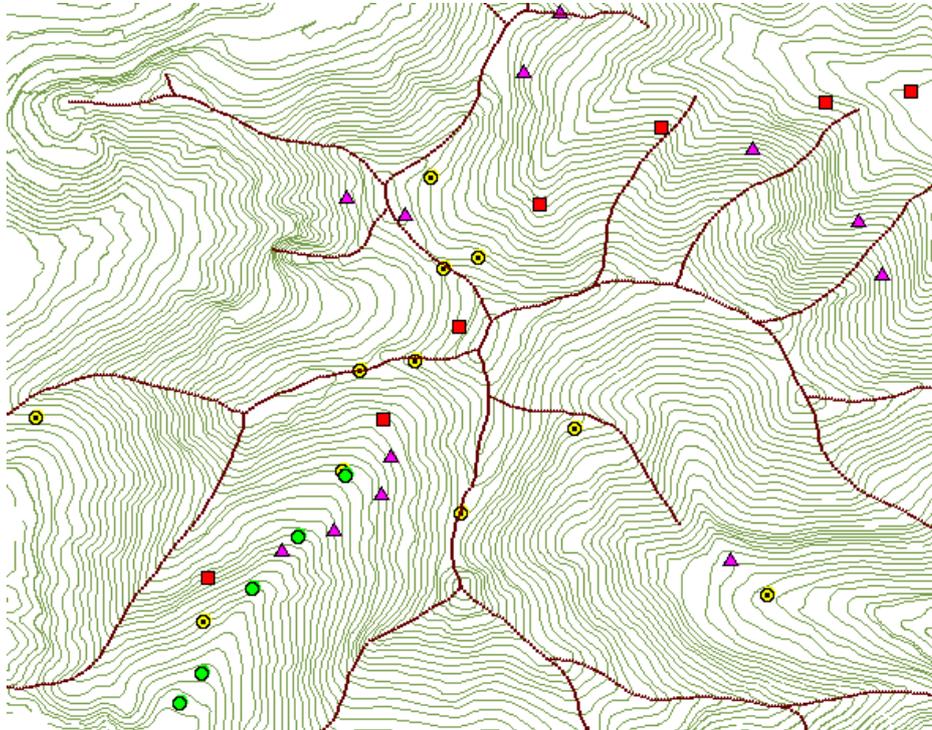
Escalamiento multidimensional de los modelos GAM de cobertura vegetal e función de la altitud sobre la base de la devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo

Se concluye que los modelos lineales generalizado y modelos aditivos generalizados muestran una relación significativa entre la cobertura vegetal y la altitud, aunque no en todas las muestras estudiadas. Las variabilidades puede deberse a otros factores diferentes a la altitud, al ENOS o al diseño de muestreo aleatorio.

La Figura 150 muestra que los datos de octubre del 2002 (en círculos verdes) y setiembre del 2000 (cuadrados rojos) se organizan como gradientes, es decir siguen una alineamiento. Ello explicaría el porqué tales juegos de datos presentaron los modelos GLM y GAM más cercanos al ideal.

También es importante anotar, tal como se hizo para el caso de los modelos GLM respecto al comportamiento unimodal, que tan solo los datos de junio del 2002 y enero del 2011 presentaron un comportamiento unimodal. Así, la Figura 90 muestra el modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de junio del 2002 en función de la altitud (msnm), el cual cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 34.31$ , p-valor = 0.13, AIC = 7.60 y  $r^2$  loess residuales = 0.41. Así también, la Figura 103 presenta el modelo aditivo generalizado para la cobertura vegetal (%) de enero del 2011 en función de la altitud, el cual es cuadrático, con

distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 45.31$ ,  $p\text{-valor} = 0.05$ ,  $AIC = 47.69$  y  $r^2$  loess residuales = 0.30



Ubicación de las diferentes muestras: setiembre del 2000 (cuadrados), setiembre del 2001 (triángulos), octubre del 2002 (círculos) y enero del 2011 (círculo y punto concéntrico)

### 4.2.3 El NDVI con respecto a la cobertura vegetal

La hipótesis que estuvo a prueba fue la siguiente: el aumento de la cobertura vegetal determina el incremento de la reflectancia espectral expresada como NDVI, relación que puede expresarse como una función matemática.

El interés en establecer alguna función matemática que describa la relación entre la cobertura vegetal y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) fue la posibilidad de predecir coberturas vegetales a partir de la información de NDVI de las imágenes de satélite. Si la correlación entre la cobertura vegetal y el NDVI es elevada es posible el camino inverso o calibración (obtener el valor de la cobertura

vegetal a partir del NDVI). Las ventajas de esta opción estarían principalmente en la reducción de tiempo y costo de obtener datos de cobertura vegetal. Para ciertos fines, como la planificación del uso de áreas, este nivel aproximado podría ser suficiente. Evidentemente, no se está planteando restar importancia o reducir la evaluación de campo en la estimación de la cobertura vegetal.

En la presente tesis, un aspecto a tener en cuenta, con relación a las fechas de las imágenes, fue que los datos de cobertura vegetal de setiembre del 2000, setiembre del 2001, octubre del 2002 y diciembre del 2002 se relacionaron con el NDVI de la imagen Spot de noviembre de 1998. El mismo procedimiento se siguió para los datos de cobertura vegetal de abril del 2001 y junio del 2002, los cuales se correlacionaron con el NDVI de la imagen Ikonos del marzo del 2002. Lo ideal hubiera sido relacionar cada fecha de cobertura con una imagen respectiva del mismo año (no se logró obtener las imágenes respectivas).

Por lo señalado, en ninguno de los casos, los datos de NDVI de la presente investigación fueron la expresión directa del porcentaje de cobertura vegetal registrada en los años en mención. Puesto que no se pretendió explicar la particularidad de la cobertura vegetal en cada uno de los años mencionados sino verificar si se puede obtener una relación entre estas dos variables (NDVI y cobertura) el análisis realizado fue válido. Sin embargo, de todas maneras, dado que no fue posible lograr la coincidencia de fechas de las imágenes y las fechas de los inventarios, los resultados deben considerarse aproximativos y de ninguna manera definitivos.

#### Análisis mediante regresión lineal

Como se había adelantado, el presente trabajo de investigación planteó como hipótesis que la relación entre la cobertura vegetal como variable independiente y el NDVI con variable dependiente se comportaban linealmente y que podría haber alguna función que lo describiera. Las Tablas 35 y 36 muestran los resultados que se discuten en esta sección.

Para la época de verano, no se observó alguna relación del NDVI Ikonos respecto a la cobertura vegetal. Para el caso de los datos de invierno, se confirma el supuesto teórico acerca de la existencia de una relación lineal entre la cobertura vegetal y el

NDVI Spot 1998. Los coeficientes de regresión así lo señalan: un  $r^2$  del orden 0.508 para setiembre del 2001,  $r^2 = 0.929$  para octubre del 2002 y  $r^2 = 0.761$  para diciembre del 2002. Si bien para los datos de setiembre del 2000 no se observó alguna relación significativa del NDVI Spot 1998 y la cobertura vegetal; en cambio si se notó una relación lineal entre los datos interpolados del mismo año, setiembre del 2000 (mediante geoestadística) y el NDVI Spot 1998, con un  $r^2 = 0.439$ .

Las ecuaciones respectivas obtenidas fueron las siguientes: NDVI Spot-1998 = -1.25E-02 + 5.64E-03 Cobertura-set-2001; Transformado NDVI Spot-1998 = -1.87 + 8.75E-03 Cobertura-oct-2002; Transformado NDVI Spot-1998 = -6.32 + 7.45E-02 Cobertura-dic-2002.

#### Análisis mediante regresión curvilínea

Las Tablas 38 al 41 muestran los resultados del análisis realizado y permiten inferir que para la cobertura de la época seca no se observó alguna relación cuadrática entre el NDVI con relación a la cobertura vegetal. En cambio para invierno si se obtuvo relaciones significativas; así, la relación del NDVI Spot 1998 con respecto a la cobertura vegetal fue significativa ( $p$ -valor  $< 0.5$ ) para los siguientes casos: setiembre del 2000 (interpolado), que mostró un  $r^2 = 0.467$ ; setiembre del 2001, un  $r^2 = 0.705$  y diciembre del 2002, un  $r^2 = 0.815$ . Por otra parte, no se presentaron ajustes significativos para los datos de setiembre del 2000, octubre del 2002, setiembre del 2007 y diciembre del mismo año.

Las ecuaciones que se obtuvieron se anotan a continuación: Transformado NDVI Spot-1998 = -1.972 + 0.016 Cobertura-set-2000 - 8.708E-05 Cobertura-set-2000 <sup>2</sup>; Transformado NDVI Spot-1998 = -12.612 + 0.441 Cobertura-set-2001 - 0.005 Cobertura-set-2001 <sup>2</sup>; Transformado NDVI Spot-1998 = -25.747 + 1.285 Cobertura-set-2002 - 0.017 Cobertura-set-2002 <sup>2</sup> (ver Tablas 40 y 41).

#### Análisis mediante el test de Mantel

Referente al Test de Mantel (Tabla 38), para la relación lineal entre el NDVI Spot y la cobertura vegetal, se confirma la influencia de la altitud y la distancia geográfica entre estas dos variables. Si bien en todas la pruebas no se obtuvo significación en la prueba ( $p$ -valor  $< 0.05$ ) el hecho que los datos de diciembre 2000 (generados),

setiembre 2001 (solo para el caso de la altitud) y diciembre del 2002 hayan resultado significativas es argumento suficiente para concluir que estas terceras variables (altitud y distancia geográfica) afectarían la relación lineal entre el NDVI y la cobertura vegetal.

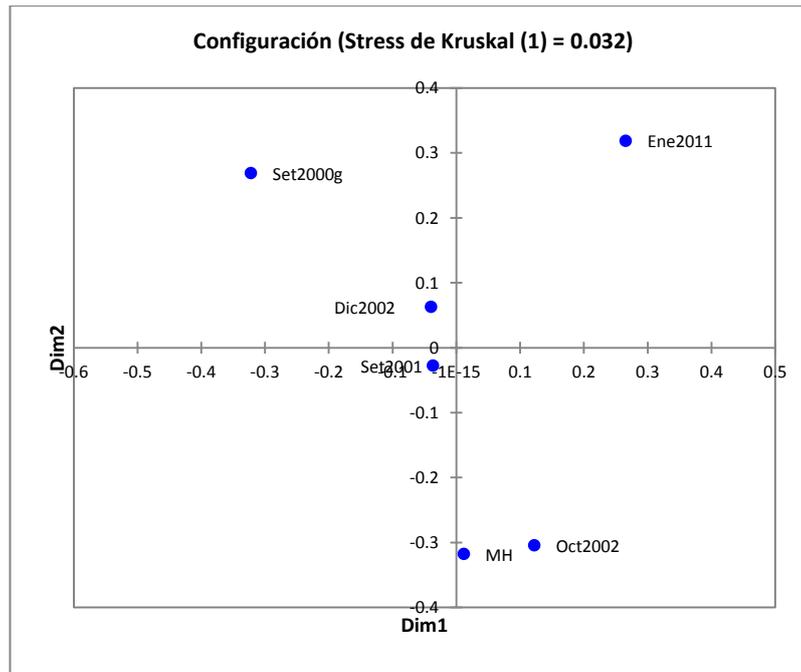
#### Análisis mediante modelos lineales generalizados

Para la respectiva contrastación de la hipótesis, la Tabla 42 y las Figuras 75, 85, 91, 97 y 100 presentan los modelos lineales generalizados obtenidos para el análisis del NDVI en función de la cobertura vegetal.

Se comprueba la hipótesis acerca de la relación lineal, directamente proporcional, entre estas dos variables. Se induce esta generalización a partir de la Tabla 42 que presenta los modelos lineales generalizados que se discuten en este acápite.

La referida tabla muestra cuatro modelos significativos (cobertura de setiembre del 2000 generados, setiembre del 2001, octubre del 2002, diciembre del 2002) y un modelo adicional incluido con criterio flexible, enero del 2011, con  $r^2 = 0.12$ .

La Figura 151 presenta un escalamiento multidimensional de los cinco modelos incluyendo un modelo hipotético ideal (MH). El modelo que corresponde a la cobertura vegetal de octubre 2002 como regresora del NDVI 1998 muestra su mayor cercanía al modelo ideal (MH).



Escalamiento multidimensional de los modelos GLM de NDVI con relación a la cobertura vegetal sobre la base de las características de devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo de modelo

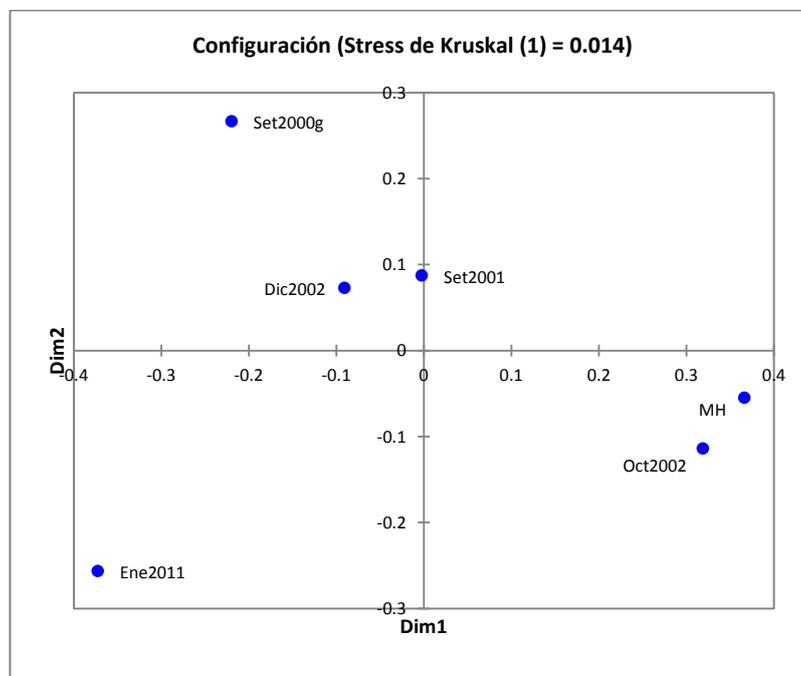
El modelo que relaciona el NDVI spot 1998 y la cobertura de octubre del 2002 es el que muestra con mayor claridad la relación esperada. Este modelo lineal generalizado tiene una distribución gamma y una función de enlace logarítmica. El modelo obtenido explica el 93.5 % de la variabilidad (ver la devianza); asimismo, muestra que la tendencia observada del NDVI se explica por la cobertura vegetal ( $r^2 = 1$ ). El modelo resultante es el que se escribe a continuación:  $NDVI\ Spot-1998 = -3.22203 + 0.0517198\ Cobertura-oct-2002 - 0.000272546\ Cobertura-oct-2002^2$

La explicación del porqué tan solo un juego de datos se acercó al modelo ideal se debe a que los datos de NDVI 1998 y cobertura vegetal de octubre del 2002 conforman una serie o gradiente, en la línea de la mayor variación. Los otros juegos de datos tienen una distribución espacial un tanto aleatoria y no conforman una gradiente.

### Análisis mediante modelos aditivos generalizados

La Tabla 45 y las Figuras 76, 86, 92, 98 y 101 presentan los modelos aditivos generalizados (GAM) para la relación del NDVI respecto a la cobertura vegetal. Los modelos para setiembre del 2000 (datos generados), setiembre del 2001, octubre del 2002 y diciembre del 2002 son significativos ( $p$ -valor  $< 0.05$ ). Si bien el modelo para NDVI World View 2011 en función de los datos de enero del 2011 no fue significativo se incluyó en la lista puesto que su  $p$ -valor estaba en el orden de 0.13, es decir todavía en un tolerable error de 13%, si se tiene en cuenta datos ecológicos, provenientes de la observación.

Como en el caso de los modelos GLM, la relación entre el NDVI spot 1998 con la cobertura de octubre del 2002 se mostró significativa reuniendo lo esperado para una relación ideal. El escalamiento multidimensional que presenta la Figura 152 muestra con énfasis que la relación de la cobertura vegetal correspondiente a octubre del 2002 con el NDVI spot 1998 es la que mejores característica reúne: la más alta devianza (89.47),  $p$ -valor = 0.02, AIC = 0.08 y el más alto valor de  $r^2$  (1.0).



Escalamiento multidimensional de los modelos GAM de NDVI con relación a la cobertura vegetal sobre la base de las características de devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo de modelo

Se concluye la sección con la afirmación que la relación de la reflectancia espectral, expresada como índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y la cobertura vegetal es de tipo lineal y puede ser modelado bien como un modelo lineal generalizado (GLM) o modelo aditivo generalizado (GAM).

No se recomienda una regresión lineal toda vez la necesidad de normalizar los datos. Dado que siempre es posible que los datos no presenten independencia espacial y estén autocorrelacionados o tengan correlación angular, será necesario su procesamiento como serie espacial.

Los resultados de la presente investigación sobre la relación del NDVI y la cobertura vegetal son aproximados puesto que no se contó con las imágenes de satélite de las fechas de los inventarios de vegetación.

#### **4.2.4 El NDVI en función de la altitud**

La hipótesis que estuvo a prueba fue la siguiente: un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal.

Con el juego de datos provenientes del monitoreo de las lomas de Atocongo (UNACEM S.A.) se prueba que efectivamente un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral o NDVI, aunque habría que precisar que este incremento no es proporcional puesto se comporta lineal o unimodalmente (mayores incrementos se observan en una faja altitudinal media).

Los valores de NDVI que se han empleado en este análisis corresponden solo a dos imágenes: Spot del 30 de noviembre de 1998 e Ikonos del 10 de marzo del 2002. Los valores de NDVI spot 1998 fueron relacionados con la altitud de los puntos de muestreo de los inventarios correspondientes a setiembre del 2000, setiembre del 2001, octubre del 2002 y diciembre del 2002. Por lo mismo podría decirse que se tuvo cuatro réplicas de la relación NDVI spot 1998 versus la altitud. En similar

forma, los valores de NDVI Ikonos 2002 fueron relacionados con las altitudes de los puntos de muestreo de los inventarios de abril del 2001 y junio del 2002. En este caso se tuvo dos réplicas.

Para efectos solo de presentación de la información sobre el NDVI en relación con la altitud, en las diferentes tablas, se ha considerado las fechas de los inventarios. Debe entenderse que la relación del NDVI spot 1998 o Ikonos 2002 con la altitud corresponde a las altitudes de los puntos de muestreo de los inventarios de las fechas referidas (setiembre 2000, setiembre 2001, octubre 2002, diciembre 2002, abril 2001, junio 2002).

La Tabla 60 muestra el episodio que corresponde (El Niño o La Niña) a la fecha de la captura de la imagen. La imagen Spot 1998 corresponde a un periodo La Niña y la imagen Ikonos 2002 correspondió a un periodo neutro.

#### Episodios El Niño y La Niña para las imágenes de satélite

Fecha del inventario	Estación climática Hemisferio Sur	Southern Oscillation Index (SOI) / Episodio	Oceanic Niño Index (ONI) / Episodio
Spot 30-11-1998	Primavera	12.5 La Niña	-1.4 La Niña
Aster 03-03-2001	Verano	6.7 Neutro	-0.5 La Niña
Ikonos 10-03-2002	Verano	-5.2 Neutro	0.1 Neutro
World view 10-03-2011	Verano	21.4 La Niña	-0.9 La Niña

Fuente: Elaboración propia a partir de <http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml> y [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)

La anotación sobre el proceso o tipo de episodio (El Niño o La Niña) que estaba sucediéndose en la fecha de obtención de la imagen se orienta a explicar alguna fuente de variaciones debido al ENSO, que si bien en la presente tesis no estuvo contemplada, es determinante dejar anotada su presencia.

### Análisis mediante test de Mann-Kendall

Si bien los datos de NDVI no conformaban series se aplicó el test de Mann-Kendall, un test no paramétrico, estadísticamente basado en el ranking (o número de orden) de dos variables (en este caso, altitud y cobertura) que permite detectar si los datos están libres de tendencia (es decir si son estacionarios). El criterio de estacionariedad implica que los datos deben estar libres de tendencia. Los valores de NDVI Spot 1998 (para el set de puntos de altitud del inventario de diciembre del 2002) y NDVI Ikonos 2002 (para el set de puntos de altitud del inventario del 2001) mostraron una tendencia. Este resultado refuerza la hipótesis que los datos de cobertura vegetal deben ser analizados como series espaciales.

### Análisis mediante regresión lineal

Si bien el comportamiento teórico esperado para la relación del NDVI con la altitud era una curva unimodal era posible una relación lineal, exponencial u otras formas de curva (plano, meseta, unimodal simétrico, unimodal asimétrico, bimodal simétrico, bimodal asimétrico). Las Tablas 35 y 36 presentan la información para corroborar la hipótesis.

En el caso de la época seca, tan solo los datos correspondientes a NDVI Ikonos 2002 para puntos altitudinales del inventario de abril del 2001 presentaron una relación significativa. El NDVI Ikonos con relación a la altitud, mostró una relación lineal del orden de  $r^2 = 0.557$  (ver Tabla 35). Tales datos fueron transformados vía el método de Box-Cox (Lambda -0.245) y luego se aplicó la regresión lineal simple y luego otra bajo el Modelo de Cochran-Orcutt puesto que la Prueba de Durbin - Watson indicó una autocorrelación. La ecuación que se obtuvo fue 'NDVI-Ikonos transformado' = - 3.7 + 0.004 'Altitud transformada'

En cuanto a la regresión lineal para los datos de época húmeda, para el caso del NDVI Spot 1998 (datos generados) para puntos altitudinales del inventario de setiembre del 2000 se observó una relación con  $r^2 = 0.539$ ; y otra relación con  $r^2 = 0.967$  para el NDVI Spot 1998 para puntos altitudinales del inventario de octubre del 2002. Las ecuaciones obtenidas fueron las siguientes: NDVI Spot 1998 = - 0.24+1.56E-03 Altitud; 'NDVI Spot transformado' = -2.25+2.16E-03 Altitud

La sola ocurrencia de un caso, como la relación significativa entre el NDVI Ikonos y la altitud, para los datos de época seca (puntos altitudinales del inventario de abril del 2001), comprueba la existencia de la relación y comprueba la hipótesis: un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática. Encontrar otros casos que manifiesten una relación similar dependerá principalmente de un muestreo bajo la premisa de gradientes y anisotropía.

#### Análisis mediante regresión curvilínea

Al igual que en el caso de la regresión lineal, para el verano, solo se obtuvo una prueba significativa para la regresión curvilínea, y fue para la relación del NDVI Ikonos 2002 con la altitud, con un  $r^2 = 0.547$ , para los puntos altitudinales del inventario de abril del 2001. La ecuación obtenida fue 'NDVI Ikonos transformado' =  $-4.049 + 0.006 \text{ Altitud} - 2.068\text{E-}06 \text{ Altitud}^2$

En el caso de la época húmeda, la relación del NDVI Spot 1998 (datos generados) con respecto a la altitud se mostró significativa para los puntos altitudinales del inventario de setiembre del 2000 y presentó un ajuste de  $r^2 = 0.541$ ; también fue significativa para puntos altitudinales del inventario de octubre del 2002 y su ajuste fue de  $r^2 = 0.991$ . La relación no fue significativa para los puntos altitudinales de los inventarios de setiembre del 2000, setiembre del 2001 y diciembre del 2002. Las ecuaciones obtenidas fueron:  $\text{NDVI Spot} = 0.127 - 0.001 \text{ Altitud} + 4.628\text{E-}06 \text{ Altitud}^2$ ; 'NDVI Spot transformado' =  $-2.371 + 0.003 \text{ Altitud} - 1.136\text{E-}06 \text{ Altitud}^2$

Se concluye que el comportamiento del NDVI respecto a la altitud presenta un comportamiento cuadrático, aunque no en todos los casos. Posiblemente la forma de la toma de muestras determine la mayor o menor relación entre estas variables. Si se hubiera tomado las muestras como una gradiente espacial probablemente se hubieran encontrados un mayor número de modelo cuadráticos significativos.

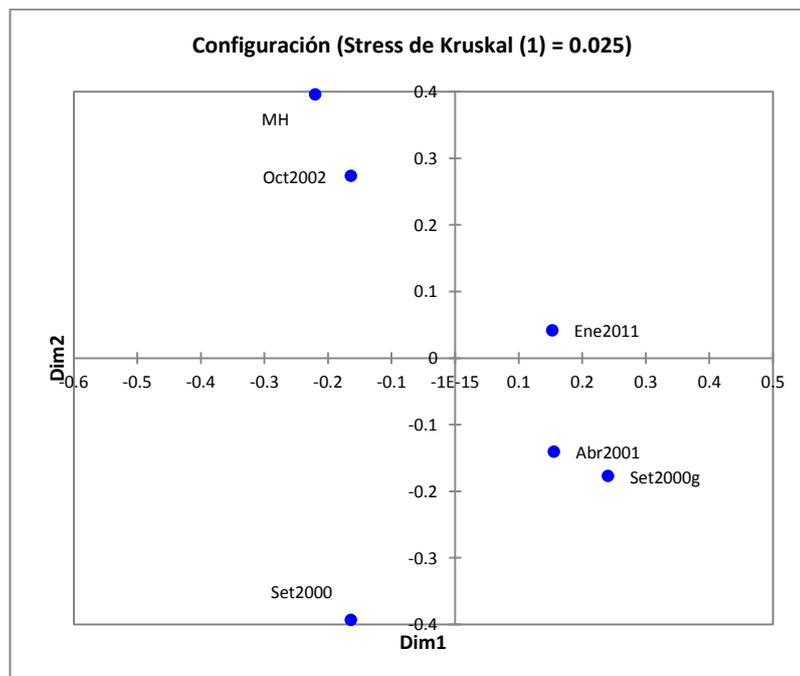
#### Análisis mediante modelos lineales generalizados

Se comprueba la hipótesis acerca de que un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una

función matemática unimodal. La Tabla 42 y las Figuras 73, 79, 83, 95 y 104 presentan los modelos lineales generalizados obtenidos para el análisis del NDVI en función de la altitud.

Si bien la Tabla 44 muestra cinco modelos significativos solo dos de ellos pueden considerarse convenientes pues tienen un  $r^2$  de los residuales que explican por lo menos el 50% de la variabilidad del NDVI asociado a la altitud. Así, el NDVI Spot 1998 con respecto a la altitud se mostró significativo para los puntos altitudinales del inventario de setiembre del 2000, con un ajuste de  $r^2 = 0.53$  (Figura 73); también fue significativo el NDVI Spot 1998 para puntos altitudinales del inventario de octubre del 2002, con un ajuste de  $r^2 = 0.503$  (Figura 104). Las ecuaciones obtenidas fueron:  $\text{NDVI Spot} = -5.03541 + 0.0153431 \text{ Altitud} - 1.62\text{E} - 05 \text{ Altitud}^2$ ; y  $\text{NDVI Spot} = 36.5471 - 0.166276 \text{ Altitud} + 0.000202832 \text{ Altitud}^2$

La Figura 153 presenta un escalamiento multidimensional de los cinco modelos incluyendo un modelo hipotético ideal (MH). El único modelo que resulta pertinente es el NDVI Spot 1998 para los puntos altitudinales del inventario de octubre del 2002, por su cercanía al modelo ideal (MH).

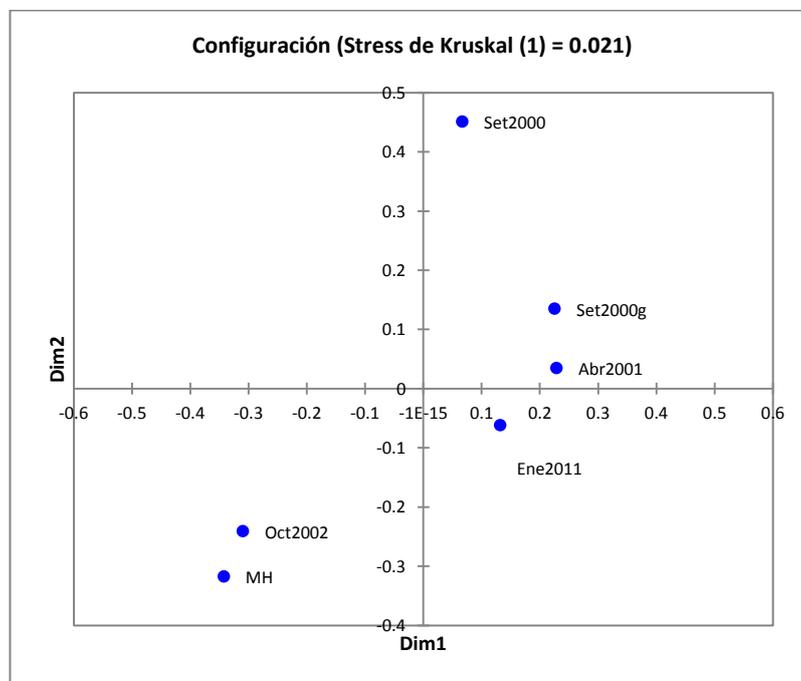


Escalamiento multidimensional de los modelos GLM de NDVI con relación a la altitud sobre la base de las características de devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo de modelo

Análisis mediante modelos aditivos generalizados

La Tabla 47 y las Figuras 74, 80, 96, 84 y 105 presentan los modelos aditivos generalizados obtenidos para el análisis del NDVI en función de la altitud. Al igual que los modelos GLM, el NDVI Spot 1998 con respecto a la altitud se mostró significativo para los puntos altitudinales del inventario de setiembre del 2000, con un ajuste para los residuales de  $r^2 = 0.398$  (Figura 74); también fue significativo el NDVI Spot 1998 para puntos altitudinales del inventario de octubre del 2002, con un ajuste de residuales de  $r^2 = 0.75$  (Figura 96)

La Figura 154 presenta un escalamiento multidimensional de los cinco modelos e incluye un modelo hipotético ideal (MH). El único modelo que resulta pertinente es el NDVI Spot 1998 para los puntos altitudinales del inventario de octubre del 2002, por su cercanía al modelo ideal (MH).



Escalamiento multidimensional de los modelos GAM de NDVI con relación a la altitud sobre la base de las características de devianza, p-valor, AIC, forma, funciones, tipo de modelo

#### **4.2.5 Series espaciales de NDVI con relación a la altitud**

En las secciones anteriores se había enfatizado en que los juegos de datos de las variables de NDVI, cobertura vegetal y altitud, correspondientes a los inventarios de vegetación del área de estudio, presentaban una estructura espacial. Así lo había señalado el análisis exploratorio de datos y así se había corroborado en los análisis de regresión y modelos generalizados. Tanto datos de octubre del 2002 y setiembre del 2000 presentaron modelos muy significativos, y justamente su ubicación en campo tenían una disposición de gradientes (ver Figura 150).

Tales afirmaciones sustentaron las recomendaciones para el diseño de muestreo, el cual debería considerar el comportamiento de tales variables como series espaciales. Dado que esta recomendación, para la relación del NDVI en función de la altitud, se podía incorporar en la presente investigación, se procedió a tomar datos de NDVI como una serie espacial altitudinal.

Se obtuvo series de datos espaciales de NDVI, tomando los valores en una línea altitudinal, en la intersección con las curvas de nivel (cada 10 m) sobrepuestas sobre la imagen NDVI. Estas gradientes correspondían a transectos que siguieron la orientación del fondo de cada quebrada evaluada. Las quebradas contempladas fueron: Lúcumo, Verde, Guayabo y Puquio, para todas las imágenes seleccionadas Spot, Ikonos, Aster y World View. Para la Quebrada Verde se consideraron dos transectos que se denominaron BN y BG respectivamente.

La hipótesis que se pretendió probar fue la siguiente: un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal.

En atención a los resultados y análisis realizados, las series espaciales de NDVI en función de la altitud permiten afirmar que las tendencias de estas series tiene un comportamiento unimodal, lo cual corrobora la hipótesis.

Si bien el comportamiento se puede expresar como una función matemática, con bastante significación y ajuste elevado, no hay una única ecuación, sino varias, correspondientes a modelos lineales generalizados; y curvas de modelos aditivos generalizados.

Los resultados obtenidos muestran curvas con alta significación y ajuste elevado para la relación del NDVI con la altitud. Se comprueba así la hipótesis: un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal.

Como se había señalado las series espaciales se componen de una tendencia, una variación estacional y el error. El análisis efectuado en la presente tesis solo tiene alcance para la tendencia.

Puede darse el caso que la curva se ajuste a los datos con un valor elevado sin embargo la explicación de la variabilidad por parte de la variable regresora no sea elevada. Este doble análisis fue realizado como parte de la obtención de los modelos GLM y GAM. El programa informático CANOCO 4.5 resultó muy versátil para estos cálculos.

En los datos obtenidos bajo el criterio de series espaciales, cada serie obtenida representaba el fondo de valle de una de las quebradas o microcuencas del área de estudio; por lo mismo se estaba así también analizando el comportamiento de la gradiente en función de las orientaciones de las quebradas.

Asimismo es posible comparar estacionalmente, épocas seca y húmedas, a partir de los NDVI por ello se incorpora también un acápite específico sobre el particular. En las secciones que siguen se explican las aseveraciones realizadas en esta introducción.

#### Series altitudinales de NDVI por imágenes

Dado que los NDVI dependen de las imágenes de satélite, entre otros condicionantes, y puesto que en la presente tesis se empleó varios tipos de imágenes, indirectamente también se estaba evaluando las diferencias entre las imágenes, en particular su resolución espacial. Ello explica que se haya incluido esta sección que discute el desempeño de cada imagen empleada.

### Análisis mediante el modelo lineal generalizado

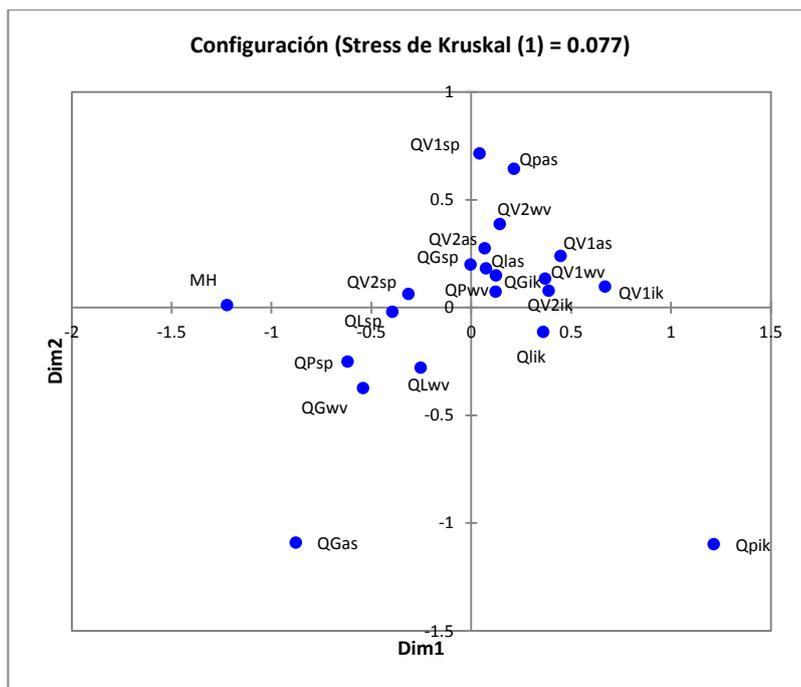
Los datos analizados fueron los que se presentan en las Tablas 48 al 52. Con el fin de reconocer el mejor modelo GLM o GMA se aplicó pruebas de escalamiento multidimensional (MDS por sus siglas en inglés) a partir de una matriz de proximidad estimada mediante el Índice de Gower.

La Figura 155 muestra la ubicación bidimensional de los modelos obtenidos para cada NDVI por imagen codificada así: sp = spot, as = Aster, ik = Ikonos, wv = Word View, y por gradiente altitudinal de quebradas, simbolizadas como: QL = Quebrada Lúculo, QP = Quebrada Puquio, QV1 = Quebrada Verde BN, QV2 = Quebrada Verde BG. A modo de ejemplo, para comprender la nomenclatura empleada, por ejemplo QPsp corresponde a dimensiones de los modelos GLM del NDVI Spot con relación a la altitud en la Quebrada Puquio.

La referida Figura 155 deja entrever que la imagen Spot, época húmeda, con los modelos GLM para las quebradas Puquio (Figura 114), Lúculo (Figura 106) y Verde transecto BG (Figura 138), es la que mejor tipifica el comportamiento para la relación NDVI vs Altitud. Las devianzas respectivas para Lúculo, Puquio y Verde BG fueron  $D^2 = 96.83$ ,  $D^2 = 94.71$ ,  $D^2 = 92.34$ ; y los  $r^2$  de los residuales con altitud fueron  $r^2 = 0.39$ ,  $r^2 = 0.08$  y  $r^2 = 0.23$ .

A partir de los modelos mencionado podría considerarse que el modelo lineal generalizado ideal sería el que corresponde a la imagen Spot para la quebrada Lúculo como sigue:  $NDVI_{Spot} = 31.6258 - 0.134727 \text{ Altitud} + 0.000154172 \text{ Altitud}^2$  puesto que su ajuste a los datos es del orden de casi 97 % con una explicación de la variabilidad debida a la altitud de una magnitud del 39%.

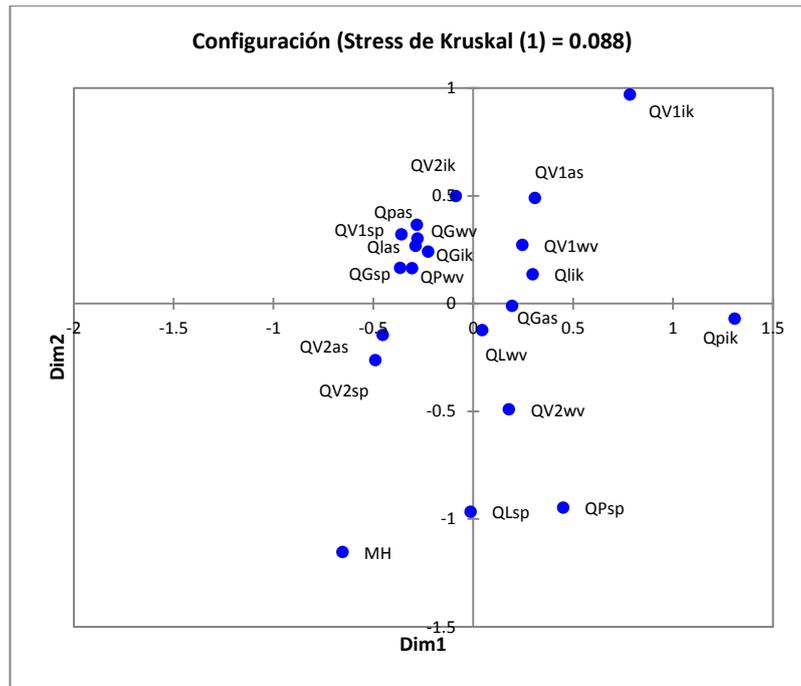
Se puede concluir que los modelos GLM de NDVI Spot para la Q. Puquio, GLM de NDVI World View y GLM de NDVI Spot para la Q. Verde BG son los modelos GLM que más se acercan al ideal hipotético (MH) puesto que tienen características conjuntas de mayor devianza, menor p-valor, menor AIC y más alto  $r^2$  de residuales.



MDS de NDVI vs altitud para los modelos GLM y diferentes imágenes

Análisis mediante el modelo aditivo generalizado

Los valores de las Tablas 53 al 57 sirvieron para el análisis MDS con fines de determinar el modelo aditivo generalizado (GAM) que mejor ajuste presentaba.



MDS de NDVI vs altitud para los modelos GAM y diferentes imágenes

La Figura 156 deja entrever que la imagen Spot, época húmeda, con los modelos GAM para las quebradas Lúcumo (Figura 106) y Puquio (Figura 114) son las que tipifican el comportamiento unimodal entre el NDVI y la altitud para el caso de los modelos aditivos generalizados.

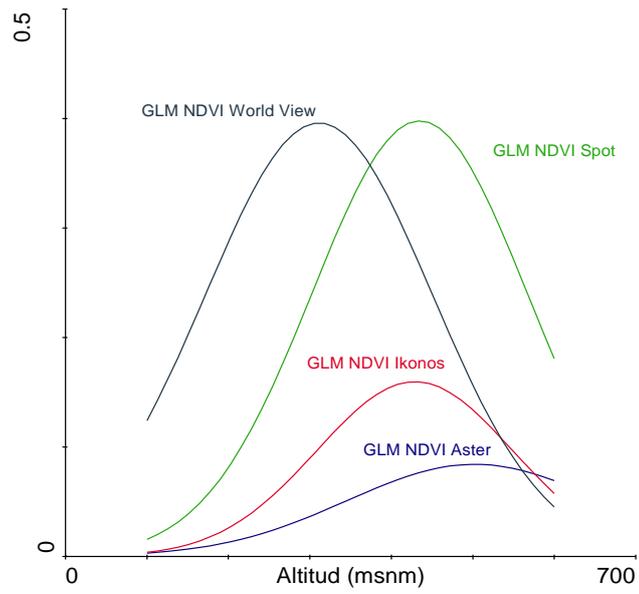
En un análisis visual complementario y como visión panorámica, las Figuras 157 al 161 muestran los modelos GLM de las gradientes de NDVI en función de la altitud, para las diferentes imágenes y ordenadas por quebradas. En estas figuras se muestran agrupados los modelos GLM por quebrada, para proporcionar una idea de conjunto de los modelos obtenidos, que se detallan en las Tablas 48 al 52.

La Figura 157 corresponde a Q. Lúcumo e integra las Figuras 106, 108, 110 y 112. La Figura 158 corresponde a Q. Puquio e integra las Figuras 114, 116, 118 y 120. La Figura 159 corresponde a Q. Guayabo e integra las Figuras 122, 124, 126 y 128. La Figura 160 corresponde a Q. Verde BN e integra las Figuras 130, 132, 134 y 136. La Figura 161 corresponde a Q. Verde BG e integra las Figuras 138, 140, 142 y 144. A partir de estas figuras integradoras, se puede afirmar que en general las gradientes de NDVI respecto a la altitud tienen un comportamiento unimodal, con lo cual se corrobora la hipótesis.

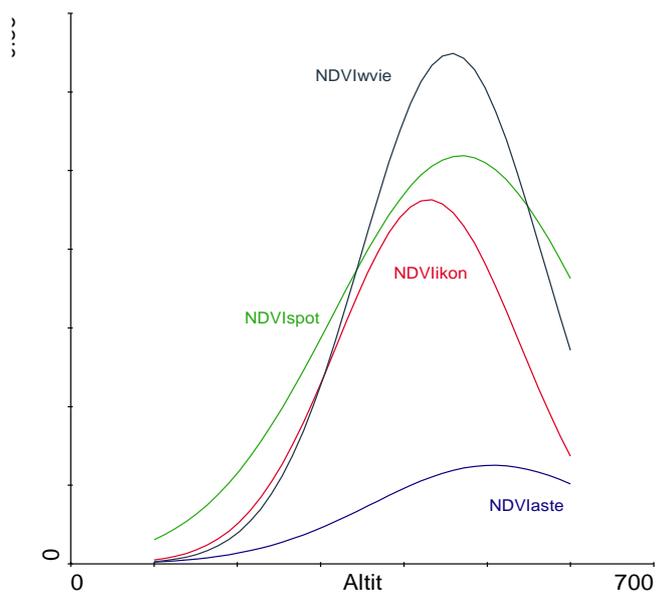
Es conveniente tener en cuenta en la observación de las figuras integradoras, Figuras 157 a 161, que dado que cada NDVI corresponde a una determinada imagen, con una resolución espacial particular y fechas propias, no es posible una comparación directa entre ellas, respecto a la mayor o menor presencia de cobertura vegetal.

Es decir si se observa, por ejemplo, la Figura 157 no es posible afirmar que dado que las curvas de GLM de NDVI World View y GLM NDVI Spot tienen forma y altura similar están representando una cantidad similar de vegetación. No es posible esta comparación puesto que la resolución de la imagen World View es 0.05 m y de la imagen Spot es 20 m. Solo se puede decir que el comportamiento de ambos modelos frente a la altitud es unimodal. Si se requiere realizar comparaciones entre el NDVI de esta dos imágenes se debe escalar la imagen World View a 20 m de resolución (igualar a la resolución del Spot 20 m). En una sección, más adelante, se incluye una comparación estacional con imágenes reescaladas justamente para lograr una comparación correcta.

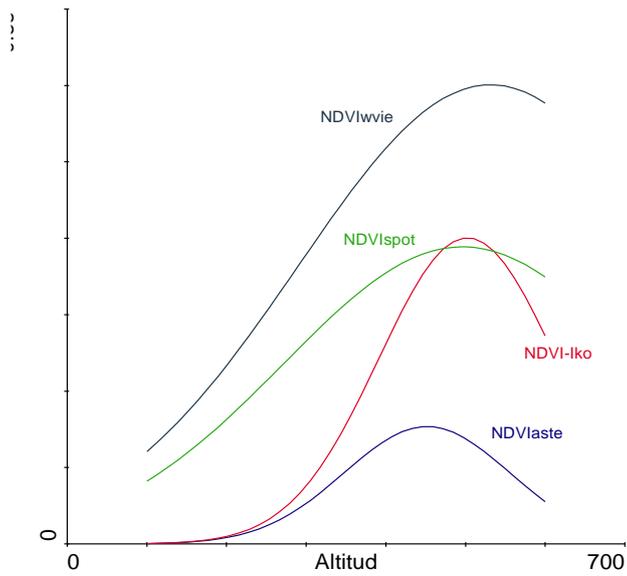
Se concluye esta sección con la confirmación que las imágenes empleadas permitieron obtener gradientes de NDVI respecto a la altitud y en todos los casos, considerando su resolución (Spot 20 m, Aster 15, Ikonos 1m y World View 0.5), se obtuvieron modelos con ajustes razonables (ver devianzas en las Tablas 48 al 52). Las imágenes Landsat TM de 30 m de resolución espacial, no fueron investigadas en esta tesis dado que en la fase de selección de imágenes, en las pruebas iniciales los valores de NDVI que se obtuvieron fueron negativos (ausencia de vegetación); es decir la resolución espacial muy amplia no detectaba la presencia de vegetación.



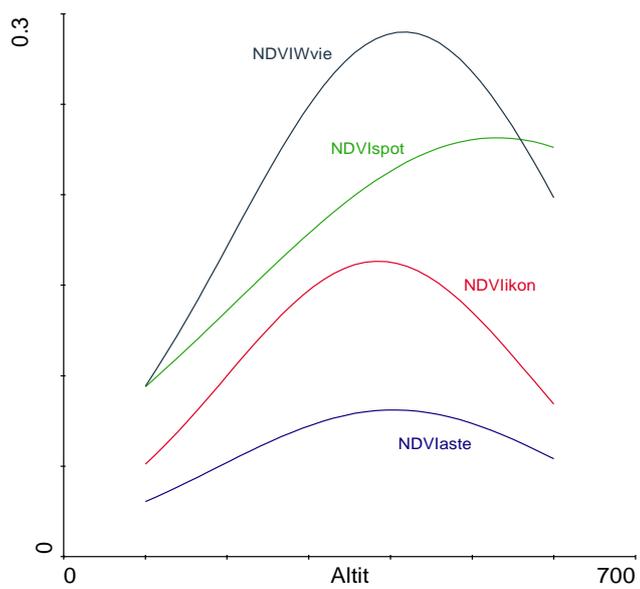
Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Lúcumo



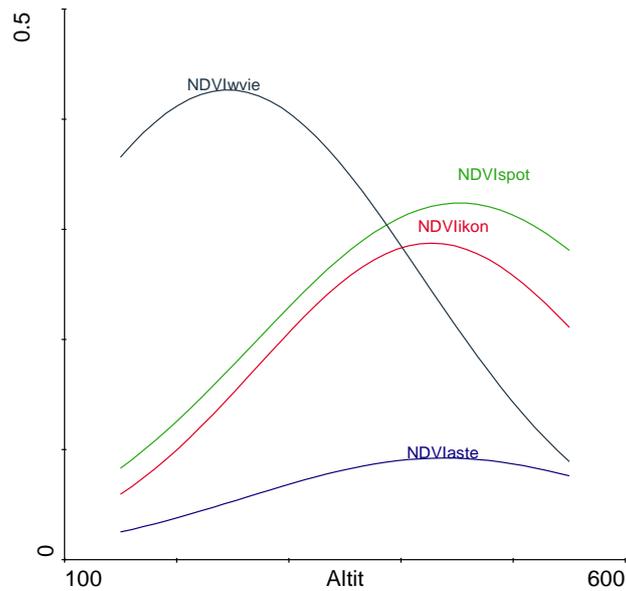
Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Puquío



Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Guayabo



Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Verde BN



## Modelos GLM para NDVI Spot, Aster, Ikonos y World View en Quebrada Verde BG

### Series altitudinales de NDVI por quebradas

Dado que las quebradas o microcuencas del área de estudio presentan variaciones en su orientación, pendiente y otros parámetros de cuencas fue necesario analizar el comportamiento de las series altitudinales considerando cada quebrada. Se sabe que la cobertura vegetal en lomas depende de la mayor o menor humedad de los vientos del litoral por ello era de esperar que los sitios con orientación hacia tales vientos presentaran suelos más húmedos y por ende mayor cobertura vegetal.

Las series espaciales de NDVI en función de las altitud, investigadas en la presente tesis, correspondían a NDVI de varias imágenes. Por lo mismo, la interpretación del tipo de relación del NDVI y la altitud tenía que tener en cuenta este condicionamiento.

Se consideró que la imagen SPOT, de fecha 30-11-1998, con resolución espacial de 20 m, era representativa de una época húmeda y de la mayor cobertura vegetal que puede ocurrir en las lomas de Atocongo. Se había explicado y argumentado su selección, además de su disponibilidad, por la particularidad climática ocurrida en el 1998, finales del ENSO 1997-1998. La imagen del 30-11-1998 corresponde al inicio

de un periodo de La Niña. Las series espaciales de la gradiente de NDVI Spot respecto a la altitud son entonces representativas de una condición de un desarrollo de las lomas en los máximos niveles.

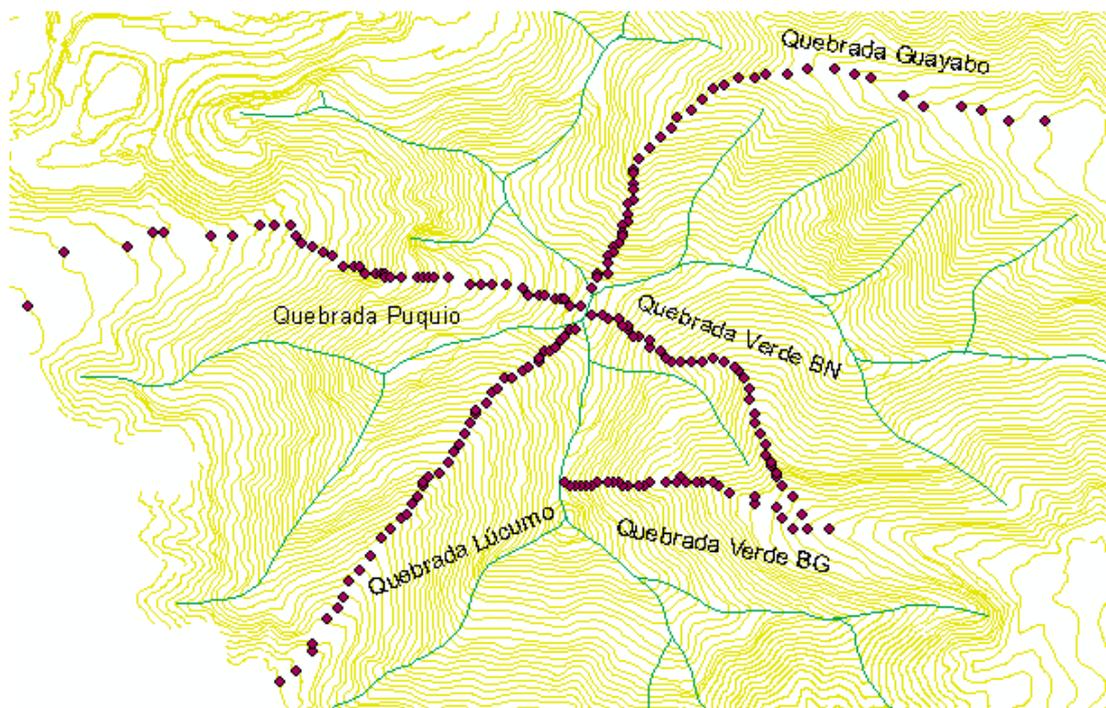
Por otro lado, se consideró como representativas de época seca las imágenes IKONOS, 10-03-2002 y ASTER, 03-03-2001. Estas imágenes son de fechas cercanas y corresponden a episodios neutros entre El Niño y La Niña. Ambas imágenes proporcionan información diferente por la gran diferencia entre su resolución espacial, 1 m y 15 m respectivamente. Es decir Ikonos proporciona información de más detalle y Aster más panorámica (dos escalas de observación).

La imagen WORLD VIEW, 10-03-2011 es representativa también de una época seca, aunque su fecha de captura corresponde a la finalización del periodo La Niña 2010-2011. Otra característica de la imagen es su resolución del 0.5 m que ofrece un detalle mucho mayor que cualquiera de las otras imágenes.

La presente tesis ha llegado a confirmar la relación del NDVI con respecto a la altitud y su comportamiento unimodal; y que además esta relación depende de las características de cada quebrada (su orientación por ejemplo). Por otro lado, deja constancia que una las fuentes de las variaciones entre las funciones matemáticas obtenidas, si se compara las series espaciales por imagen, tendría que ser el fenómeno ENSO (periodos de El Niño y la Niña).

La presente tesis no planteó entre sus alcances evaluar tales variaciones, sin embargo los anota con la recomendación de estudios de series espaciales y temporales de cobertura vegetal y NDVI y su relación con los indicadores del ENSO, como por ejemplo el Índice Oceánico de El Niño (ONI). Para sortear esta fuente de variación, las comparaciones solo han sido realizadas entre gradientes de NDVI-Altitud provenientes de la misma imagen.

La Figura 162 muestra las quebradas del área de estudio y los transectos en cada quebrada estudiada. Estos transecto se localizaron en los fondos de valle o fondo de quebradas.



Quebradas del área de estudio y ubicación de los transectos de NDVI

En rombos marrones los puntos de muestreo del transecto para la serie espacial de NDVI. En líneas amarillas las curvas a nivel y en líneas verdes las divisorias de agua.

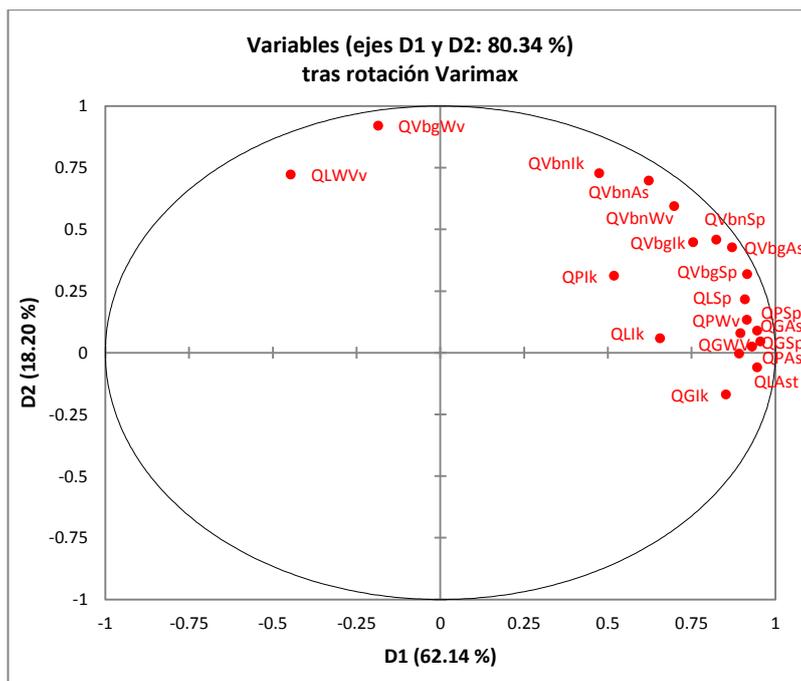
## Análisis de similitud entre las series de NDVI

Las Figura 163 muestra el análisis de componentes principales de las series espaciales del NDVI en relación con la altitud, con el fin de observar la mayor o menor similitud entre estas gradientes. Dicha figura permite afirmar que las series se muestran diferentes y en general no hay patrones marcados de similitud por quebradas o por imágenes. Hay entremezclas sin núcleos que puedan responder a una determinada quebrada o imagen.

En un intento de explicación de la distribución que muestra la Figura 163 se podría decir que las series de NDVI Spot que corresponde a la época húmeda se presentan cercanas a series de NDVI Aster, Ikonos o World View que representan condiciones de épocas secas. La explicación puede estar en las coincidencias entre quebradas más secas en la época húmeda y las quebradas menos secas en la época seca.

Dado que los modelos GLM y GAM para la series Q. Lúcumo NDVI Spot presentaron los mejores ajustes se puede hacer sus seguimientos en la distribución que muestra la Figura 163. Se observa que el NDVI Spot de Q. Lúcumo está cerca de Q. Verde BG y al extremo se encuentran los NDVI de World View para Q. Lúcumo y Q. Verde BG, ambos cercanos. Ello puede indicar un comportamiento similar de ambas quebradas; lo que hace diferente a estos dos grupos es que la imagen Spot corresponde a la época húmeda y la imagen World View, a la época seca.

Adicionalmente podría anotarse que las series de NDVI en función de la altitud para la quebrada Guayabo mantienen cercanía entre ellas; lo cual no ocurre con las respectivas series de otras quebradas. La explicación podría ser que la resolución espacial de las diferentes imágenes, muy variadas, empleadas en el estudio no generó grandes diferencias. La Figura 159 no apoya esta conjetura. Lo que estaría ocurriendo es que entre ellas hay una mayor correlación (Pearson) que es lo que el análisis de componentes principales (ACP) considera.



ACP de NDVI vs altitud para quebradas y por imagen

Análisis mediante el modelo lineal generalizado

Las series de NDVI Spot noviembre 1998 son representativas de la época húmeda; y para la época seca, representan las series de NDVI de las imágenes Aster marzo 2001, Ikonos marzo 2002 y World View marzo 2011. Las Tablas 61 al 64 permiten inferir las generalizaciones. Estas tablas se corresponden con las Tablas 48 al 52, con la diferencia que las que se presentan en esta sección están organizados por quebradas.

Respecto a las quebradas que presentaron los modelos GLM con mejores ajustes podría señalarse a la Q. Lúcumo para el NDVI spot (ver Figura 106) y la Q. Guayabo para el NDVI Aster (ver Figura 124). La Figura 164 muestra el análisis multidimensional de todas las series por quebradas, sobre la base de su devianza y  $r^2$  del ajuste de residuales a la altitud.

### Modelo lineal generalizado por quebradas para el NDVI SPOT

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuación
QL	96.83	0	0.502	0.39	2	4	NDVI Spot= 31.6258 - 0.134727 Altitud + 0.000154172 Altitud <sup>2</sup>
QP	94.71	0	0.86	0.076	3	4	NDVI Spot = -5.93644 + 0.0196508 Altitud -2.10E-05 Altitud <sup>2</sup>
QG	89.17	0	0.089	0.17	1	4	NDVI Spot = - 4.08001 + 0.00984444 Altitud - 9.92E-06 Altitud <sup>2</sup>
QVI BN	85.24	0	0.037	0.009	1	2	NDVI Spot= - 2.83304 + 0.00516155 Altitud - 4.86E-06 Altitud <sup>2</sup>
QV2 BG	92.34	0	0.239	0.227	2	4	NDVI Spot= 17.8507 - 0.0676941 Altitud + 7.73E-05 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo lineal generalizado por quebradas para el NDVI ASTER

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuación
QL	79.91	0	0.212	0.18	1	4	NDVI Aster= - 7.61686+ 0.0204831 Altitud -2.04E-05 Altitud <sup>2</sup>
QP	68.96	0	0.14	0.102	1	2	NDVI Aster = -6.15125 + 0.0113263 Altitud -9.31E-06 Altitud <sup>2</sup>
QG	87.23	0.0	2.584	0.49	3	2	NDVI Aster = -5.31352 + 0.00556962 Altitud
QVI BN	36.98	0.0	0.075	0.022	1	4	NDVI Aster= - 4.24578 + 0.00857211 Altitud - 1.06E-05 Altitud <sup>2</sup>
QV2 BG	81.1	0	0.039	0.002	1	4	NDVI Aster= - 5.38663 + 0.013705 Altitud -1.56E-05 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo lineal generalizado por quebradas para el NDVI IKONOS

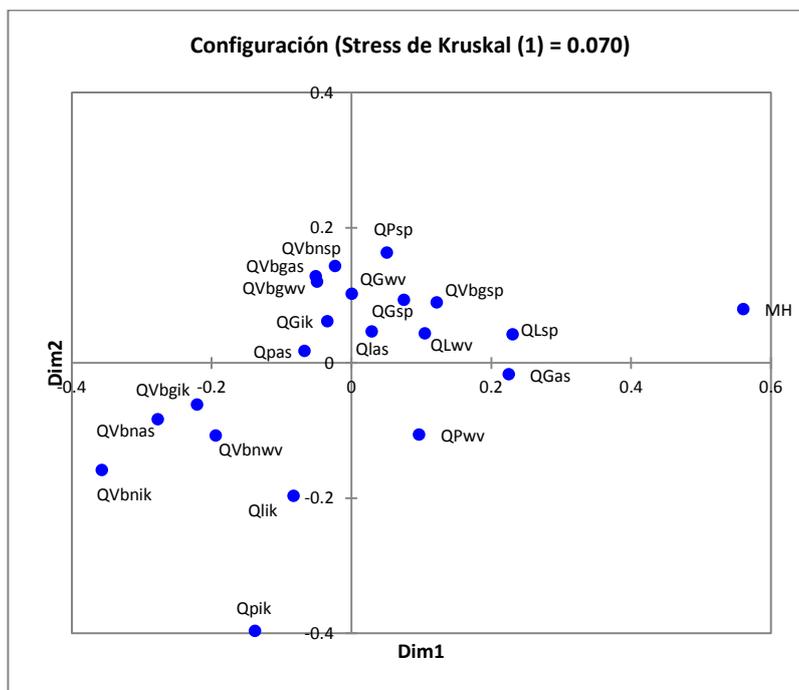
Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuación
QL	46.37	0	0.959	0.29	1	4	NDVI Ikonos= -6.34213+ 0.0222679 Altitud -2.74E-05 Altitud <sup>2</sup>
QP	18.73	0.03	2.87	0.397	1	4	NDVI Ikonos = -6.49304 + 0.0231062 Altitud -2.70E-05 Altitud <sup>2</sup>
QG	76.50	0	0.553	0.09	1	4	NDVI Ikonos = - 10.067 + 0.0327451 Altitud - 3.18E-05 Altitud <sup>2</sup>
QVI BN	21.07	0.0	0.491	0.008	1	4	NDVI Ikonos= - 3.93247 + 0.0110161 Altitud - 1.43E-05 Altitud <sup>2</sup>
QV2 BG	45.3	0.0	0.806	0.043	1	4	NDVI Ikonos= - 4.98868 + 0.0175171 Altitud -2.05E-05 Altitud <sup>2</sup>

Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo lineal generalizado para el NDVI WORLD VIEW

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	r <sup>2</sup>	Función	Forma	Ecuación
QL	86.37	0	1.367	0.26	2	4	NDVI Wview= 13.2471 -0.0711013 Altitud + 0.00011582 Altitud^2
QP	70.57	0	0.22	0.387	1	4	NDVI World View = - 4.97692 + 0.0159165 Altitud - 1.70E-05 Altitud^2
QG	83.8	0	1.235	0.09	3	4	NDVI World View = -3.55371 + 0.00868001 Altitud - 7.99E-06 Altitud^2
QV1 BN	42.71	0.0	0.279	0.115	1	4	NDVI Wview= - 3.18486 + 0.00935691 Altitud - 1.12E-05 Altitud^2
QV2 BG	80.73	0	0.263	0.014	1	5	NDVI Wview= - 1.87178 + 0.00830167 Altitud -1.69E-05 Altitud^2

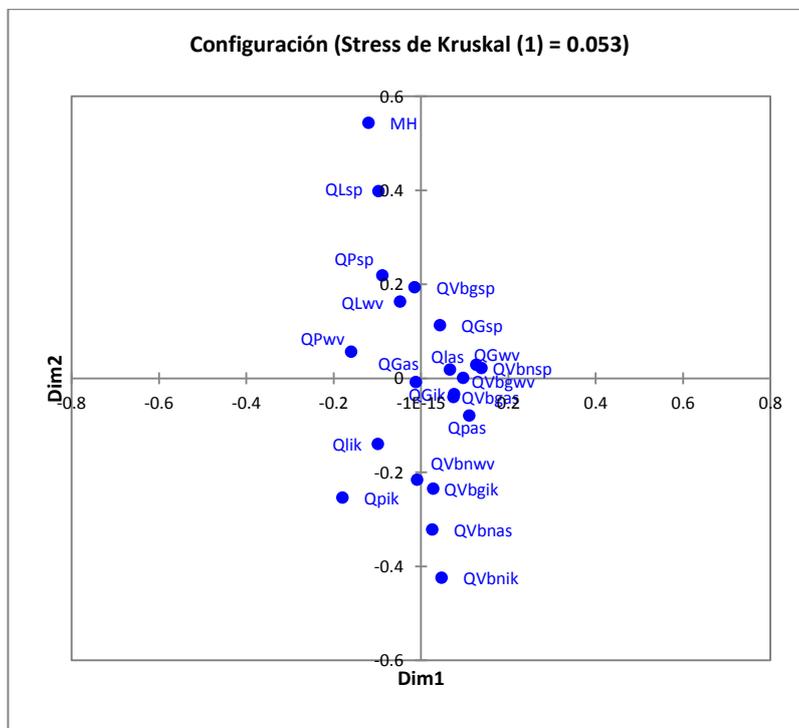
Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico



MDS de NDVI vs altitud para los modelos GLM y diferentes quebradas

### Análisis mediante el modelo aditivo generalizado

Con relación a la quebrada que detenta el mejor modelo GAM se puede citar también a la quebrada Lúcumo con la serie de NDVI spot 1998, representativa de la época húmeda. También para la época seca, la quebrada Lúcumo tendría el mejor modelo, sobre la base del NDVI World View. La Figura 165 muestra lo señalado. Esta figura presenta el análisis multidimensional de todas las series de NDVI, sobre la base de devianza y el  $r^2$  de los residuales respecto a la altitud. Las Tablas 65 al 68 presentan la información de los modelos GAM de las series de NDVI organizados por quebradas.



MDS de NDVI vs altitud para los modelos GAM y diferentes quebradas

### Modelo aditivo generalizado por quebradas para el NDVI SPOT

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	$r^2$	Modelo GAM	Funciones	Forma
QL	89.68	0	1.616	0.842	2	2	4
QP	84.859	0	2.379	0.566	2	2	5
QG	89.23	0	0.089	0.256	2	1	2
QVI BN	84.14	0	0.041	0.067	2	1	2
QV2 BG	91.18	0	0.277	0.413	2	2	2

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo aditivo generalizado por quebradas para el NDVI ASTER

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	$r^2$	Modelo GAM	Funciones	Forma
QL	79.78	0	0.213	0.167	2	1	2
QP	70.42	0	0.13	0.055	2	1	2
QG	71.97	0	0.217	0.246	2	1	5
QVI BN	33.86	0.000559	0.079	0.059	2	1	4
QV2 BG	73.62	0	0.863	0.122	2	2	2

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo aditivo generalizado por quebrada para el NDVI IKONOS

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	$r^2$	Modelo GAM	Funciones	Forma
QL	51.19	0.000011	0.879	0.269	2	1	4
QP	31.44	0.002707	2.447	0.323	2	1	6
QG	74.47	0	0.603	0.124	2	1	2
QVI BN	19.56	0.008785	0.502	0.032	2	1	4
QV2 BG	44.91	0.000135	0.816	0.097	2	1	2

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Modelo aditivo generalizado por quebradas para el NDVI WORLD VIEW

Serie NDVI	Devianza	p-valor	AIC	$r^2$	Modelo GAM	Funciones	Forma
QL	85.23	0	0.334	0.441	2	1	4
QP	66.5	0	0.251	0.484	2	1	2
QG	84.49	0	0.234	0.087	2	1	2
QVI BN	45.58	0.000025	0.266	0.15	2	1	4
QV2 BG	79.77	0	0.956	0.115	2	2	5

Modelo GAM: 1 Lineal, 2 Cuadrático. Funciones de distribución y enlace: 1 Poisson y logarítmica, 2 Gamma e inversa, 3 Gamma y logarítmica. Forma: 1 plano, 2 exponencial, 3 meseta, 4 unimodal simétrico, 5 unimodal asimétrico, 6 bimodal simétrico, 7 bimodal asimétrico

### Comparación de curvas de NDVI por quebradas

Las Figuras 166 al 169 muestran las curvas de NDVI por quebradas. Dado que cada imagen captura la cobertura vegetal, en una determinada fecha, por bandas espectrales y sobre todo en una resolución espacial, es pertinente comparar las curvas de NDVI por quebradas, considerando por separado cada imagen.

Como se había señalado, las series espaciales de NDVI fueron obtenidas de transectos del fondo de valle por lo cual son indicadoras de la orientación principal de la quebrada. La orientación de la quebrada es determinante respecto a la mayor o menor cantidad de vientos húmedos o neblinas provenientes del litoral. Las quebradas que se orienten frontalmente a estos vientos recibirán la mayor cantidad de humedad. Por tanto una curva unimodal más elevada, con el cenit más alto, será indicadora de una quebrada que recibe más humedad.

Para probar esta conjetura se tuvo los NDVI de las diferentes imágenes. Es conveniente anotar que los NDVI son indicadores relativos, pues dependen de las características técnicas de la imagen (resolución espacial, resolución radiométrica y resolución temporal) y sobre todo dependen de la fecha de captura de la imagen. Esta fecha implica un hora del día (hora en que el sensor del satélite esta posicionado sobre el sitio de interés), las condiciones del tiempo del día de captura, una estación climática y a la vez un episodio climático (El Niño, La Niña o interface) por lo mismo las comparaciones directas de NDVI no pueden hacerse con respecto al

universo de imágenes empleadas en el estudio. Tienen que hacerse para cada imagen y por estación climática.

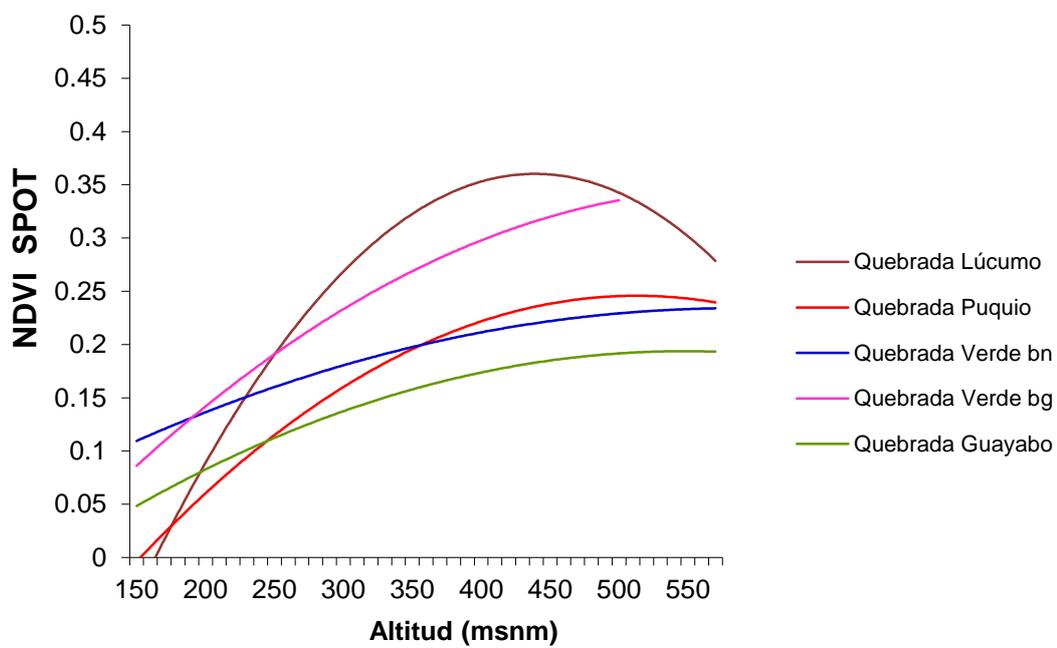
Para la época húmeda, la Figura 166 presenta las curvas de NDVI Spot para las diferentes quebradas. Si revisamos los datos de NDVI que nos proporciona la imagen Spot del 30 de noviembre del 1998 se puede decir que Q. Lúcumo alcanza los mayores niveles de cobertura vegetal dado que la curva unimodal alcanza máximos valores de NDVI, 0.43 a los 430 y 440 msnm. Esta quebrada se orienta hacia el suroeste. Luego se presenta Q. Verde transecto BG que no forma un modelo unimodal perfecto, y que a 500 msnm alcanza un NDVI de 0.35. Esta quebrada se orienta al sureste. Sigue Q. Puquio, que forma una leve curva unimodal con valores máximos de NDVI de 0.32 a los 450 msnm, con una orientación Oeste. Luego Q. Verde transecto BN con un NDVI 0.26 a los 510 msnm, con orientación sureste; y finalmente Q. Guayabo con orientación Este, NDVI 0.22 a los 440 msnm.

Lo señalado nos lleva a la conclusión que en la época húmeda en la Q. Lúcumo se presenta la mayor cobertura vegetal expresada como NDVI, ello a partir de la constatación que la gradiente NDVI en relación con la altitud alcanza los mayores valores presentado un comportamiento unimodal. También se puede decir que sigue en orden Q. Verde transecto BG. Ambas curvas mencionadas sobresalen si compara con las curvas de las otras quebradas.

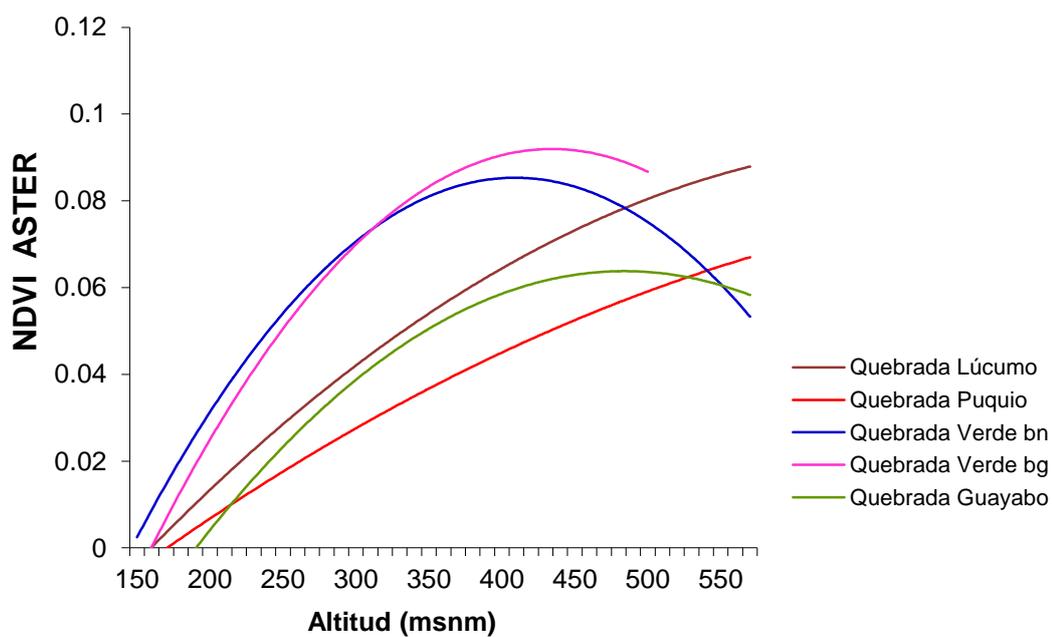
El comportamiento anotado corresponde a la época húmeda de una fecha muy favorable para el desarrollo de lomas, noviembre de 1998. También se puede decir que en la época húmeda, la quebrada orientada al suroeste es la que presenta mayor cobertura vegetal expresada como NDVI.

Para la época seca se pueden observar las Figuras 167, 168 y 169. En todas estas figuras, las curvas de NDVI de Q. Verde transecto BG sobresalen sobre las otras curvas de las otras quebradas. La curva unimodal se levanta por encima de las demás curvas. Lo cual quiere decir entonces que es la quebrada más húmeda en verano. También se puede afirmar que la orientación sureste es la que permanece con más humedad durante el verano. Probablemente la exposición a mayores horas de luz solar, por tanto desecamiento, en horas de la tarde, en la orientación suroeste

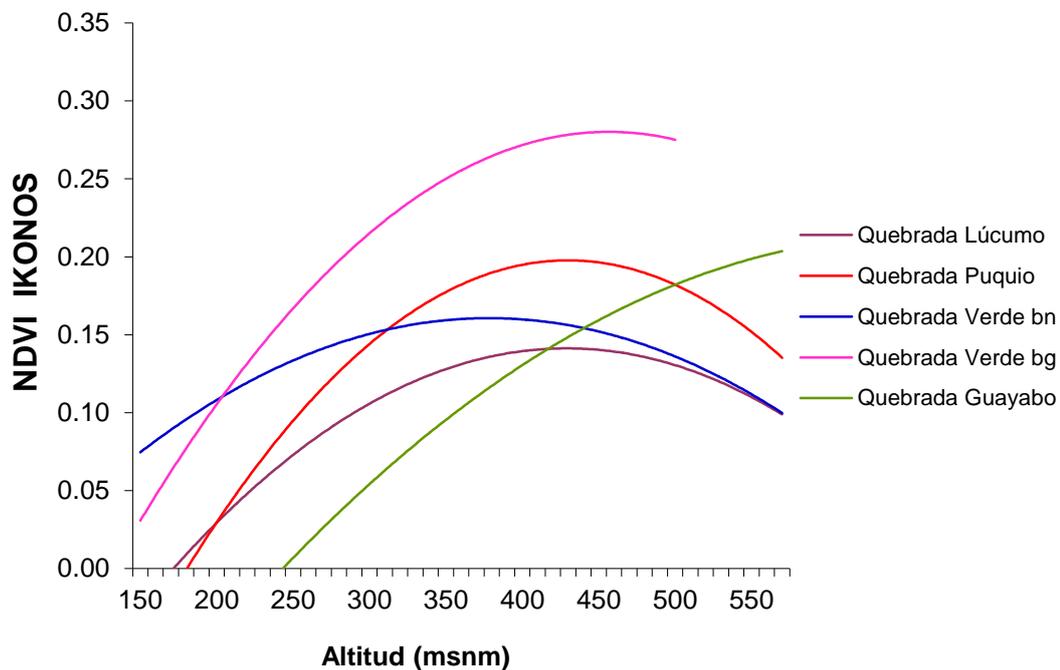
respecto a la orientación sureste, explique esta conjetura, que queda como recomendación su comprobación.



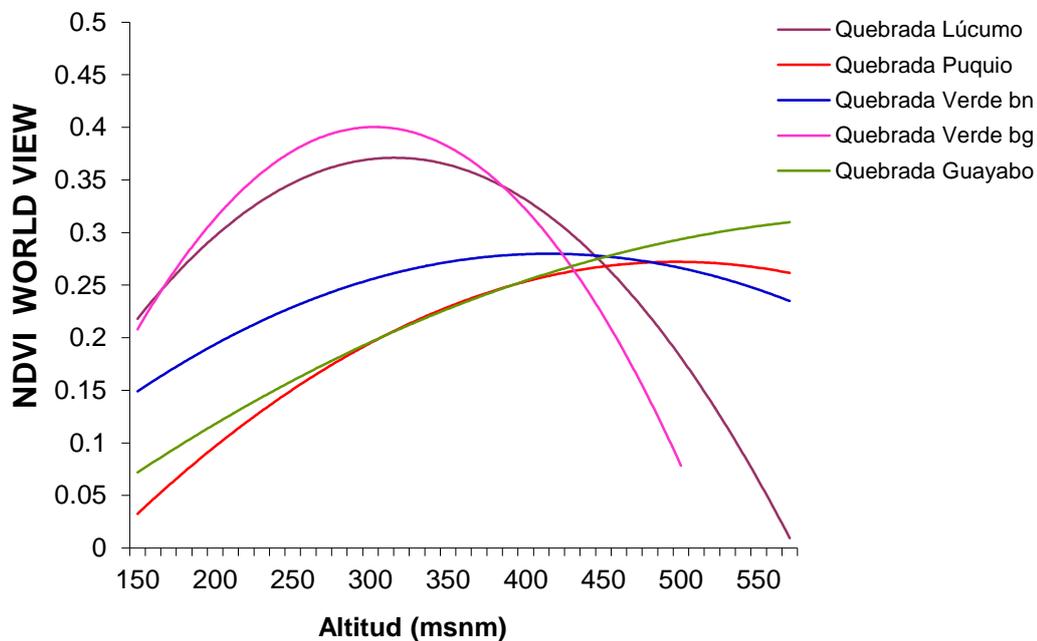
NDVI vs altitud para diferentes quebradas a partir de SPOT, 30-11-1998



NDVI vs altitud para diferentes quebradas a partir de ASTER 03-03-2001



NDVI vs altitud para diferentes quebradas a partir de IKONOS, 10-03-2002



NDVI vs altitud para las quebradas a partir de WORLD VIEW, 10-03-2011

### Análisis por variación estacional

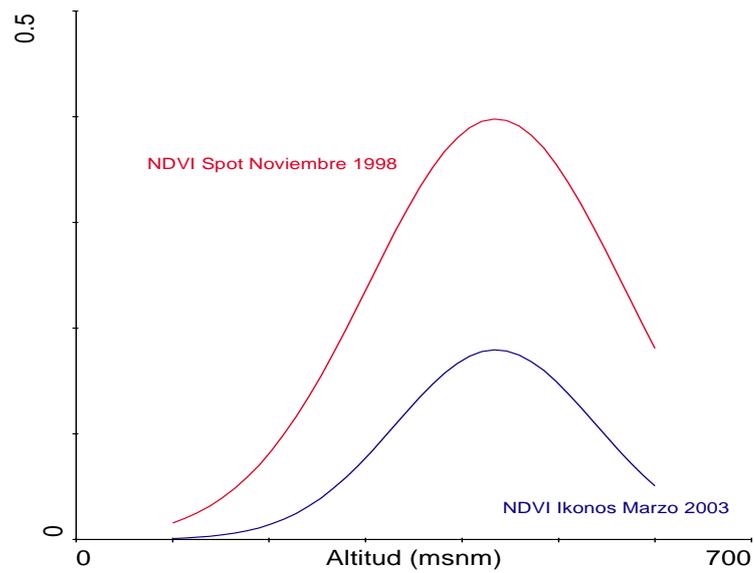
El ecosistema de lomas es de naturaleza estacional, asociado a la presencia de la neblina invernal costera, que permite mayor humedad de los suelos y por lo mismo un desarrollo notorio de la vegetación estacional, en esta época húmeda. En el verano, época seca, solo se mantienen vivos individuos de las pocas especies perennes que tipifican la comunidad vegetal de lomas.

Por lo señalado se espera que tanto la cobertura vegetal y el NDVI de la época de invierno sea mayores a los de verano. La Figura 170 corrobora esta asunción. Dicha figura muestra los modelos lineales generalizados (GLM) de las gradientes de NDVI Spot e Ikonos para el transecto fondo de valle en la quebrada Lúcumo. Se nota con creces que la cobertura vegetal de noviembre supera al de marzo. No obstante debería tenerse en cuenta la variabilidad provocada por el ENSO.

Lo ideal sería una comparación entre NDVI de la misma imagen para reducir la influencia de las características técnicas de la imagen, y del mismo año o de un episodio neutral (El Niño y La Niña) para reducir esta influencia climática.

Para obtener una comparación lo más cercana a la ideal se escaló la imagen Ikonos de resolución 1 m a 20 m para tener una resolución espacial parecida a la imagen Spot de resolución de 20 m.

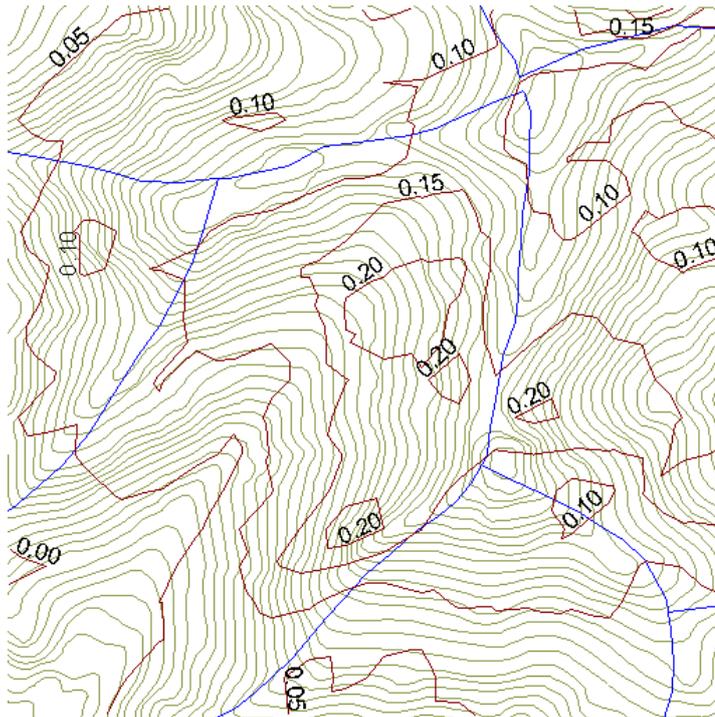
La figura mencionada muestra la diferencia entre la cobertura vegetal o NDVI en ambas épocas. La curva unimodal correspondiente a Spot noviembre 1998, 20 m, es representativa de la época húmeda y se muestra más elevada respecto a la curva del NDVI Ikonos marzo 2002, 20 m, representativa de la época seca. Dado que ambas curvas corresponden a imágenes igualadas en su nivel de resolución las distancias entre los puntos de dichas curvas, al mismo nivel altitudinal, es la diferencia proporcional entre la intensidad de la cobertura vegetal o NDVI en estas dos épocas.



Variación estacional de la gradiente altitudinal de NDVI en lomas

#### Distribución espacial del NDVI

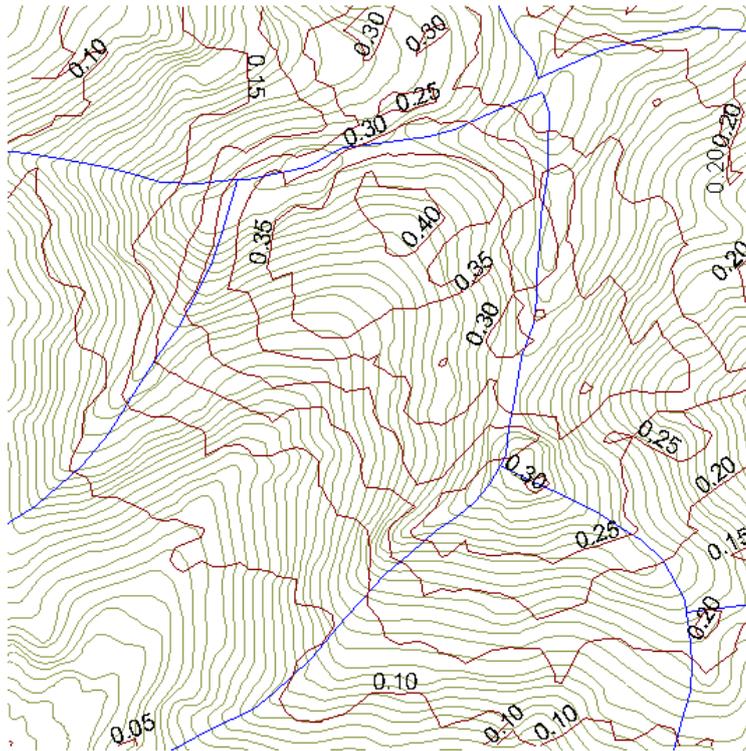
La Figura 171 muestra las isolíneas de NDVI Ikonos de marzo del 2002, época seca, para la quebrada Lúcumo. El fondo de la figura corresponde a las curvas de nivel. Las isolíneas de NDVI Ikonos graficadas son los niveles 0.5, 0.10, 0.15 y 0.20. El nucleó hacia el centro de la imagen muestra el parche en el cual se presenta la mayor cobertura vegetal en el mes de verano. Se puede decir que las líneas de NDVI Ikonos no siguen las curvas de nivel, estrictamente.



Isolíneas (en color marrón) de NDVI Ikonos 10-03-2002 para Q. Lúcumo sobre curvas de nivel (en verde) y divisorias (en azul)

La presencia de un parche de mayor NDVI, de valor 0.20, hacia una ladera y no en la cima de la quebrada indica que además de la altitud existen otros factores que condicionan la mayor o menor cobertura vegetal. Probablemente, la orientación general de la ladera y la presencia de rocosidad o pedregosidad sean también determinantes. El presente estudio solo se focalizó sobre la altitud y queda pendiente evaluar la incidencia del factor relieve (orientación, pendiente, rocosidad, pedregosidad) en la presencia de mayor o menor cobertura vegetal.

La Figura 172 muestra las isolíneas del NDVI Spot de noviembre de 1998, época húmeda, final de episodio El Niño e inicio del episodio La Niña. Los niveles de NDVI que se muestran son los niveles 0.5, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35 y 0.40.



Isolíneas (en color marrón) de NDVI Spot 30-11-1998 para Q. Lúcumo sobre curvas de nivel (en verde) y divisorias (en azul)

El parche de mayor cobertura, nivel 0.40 de NDVI se localiza también en la quebrada Lúcumo hacia una ladera, en la parte alta de la quebrada pero no en la cima. Ocurriría una gradiente unimodal perfecta si el transecto toma una orientación perpendicular a los niveles de NDVI.

Se puede anotar que el comportamiento espacial del NDVI es marcadamente diferente entre la época seca y la época húmeda. Como se había señalado en el párrafo anterior, queda buscar la explicación del porqué en cierta ladera, en cierto lugar, y no en otro, se presenta un núcleo con alto nivel de NDVI o cobertura vegetal.

Se concluye en esta sección que la distribución altitudinal de los NDVI tiene núcleos de mayor NDVI, diferente entre verano e invierno, sobre el cual concéntricamente se van organizando las isolíneas.

# CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente tesis “Variación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en relación con la gradiente altitudinal en las lomas de Atocongo (Lima – Perú)” ha llegado a las conclusiones y recomendaciones que se detallan en el presente capítulo.

## 5.1 CONCLUSIONES

### 5.1.1 Con relación a la exploración de datos

Los datos no cumplieron en su totalidad las exigencias de normalidad e independencia por lo mismo no fueron todos aptos para pruebas paramétricas, regresión lineal y modelos lineales generales. Varios juegos presentaron autocorrelación espacial y anisotropía.

Un tercio de los juegos de datos (9 de 25 análisis) no presentaron una distribución normal al aplicar la Pruebas de Shapiro – Wilk, Anderson – Darling, Lilliefors y Jarque – Bera. La transformación Box-Cox fue exitosa.

Un tercio de los juegos de datos (7 de 25 análisis) no presentaron independencia según aplicación de la prueba de rachas.

Un tercio de los juegos de datos (7 de 25 análisis) presentaron una estructura espacial y comportamiento de gradientes, al aplicar los autocorrelogramas de Moran y Geary.

Todas las series de datos generados para evaluar la gradiente altitudinal y su relación con el NDVI (26 análisis) se mostraron autocorrelacionadas hasta alcances de 100 y 200 m con valores Índice de Moran entre 0.19 a 0.85

Dos tercios de los juegos de datos (16 de 25 análisis) presentaron anisotropía. Las variables altitud, cobertura vegetal y NDVI Spot para la estación húmeda presentaron

anisotropía o correlación angular. Para la estación seca la cobertura vegetal y el NDVI no presentaron anisotropía, solo la altitud presentó una orientación angular.

Todas las series de datos generados para evaluar la gradiente altitudinal y su relación con el NDVI, excepto una (25 de 26 análisis) presentaron autocorrelación angular elevada.

La comprobación de la falta de normalidad y la dependencia espacial de varios juegos de datos determinó el empleo de modelo lineales generalizados (GLM) y modelos aditivos generalizados (GAM).

### **5.1.2 Respuesta de la cobertura vegetal a la altitud**

Se comprueba la hipótesis que plantea que un incremento en la altitud determina una mayor cobertura vegetal, relación que puede expresarse como una función matemática unimodal. Se explica el comportamiento en las lomas de Atocongo considerando que a niveles medios se presenta una mayor captación de humedad atmosférica, respecto a las partes bajas y altas. Los vientos húmedos descargan la humedad directamente en la parte media de las laderas en los sitios orientados hacia los vientos.

Los resultados tanto para la regresión lineal y curvilínea, así como para el caso de los modelos generalizados, lineal y aditivo, indicaron que los datos de setiembre del 2000 y octubre del 2002 fueron significativos en cuanto a alguna relación entre la cobertura vegetal (%) y la altitud. Estos datos fueron tomados en campo como gradientes, es decir con un alineamiento; ello explicaría el porqué solo tales juegos de datos presentaron relaciones significativas entre la cobertura vegetal y la altitud.

Los datos de cobertura vegetal de junio del 2002 y enero del 2011 presentaron curvas unimodales de respuesta a la gradiente altitudinal, aunque sus ajustes (devianzas) fueron medianos.

#### Regresión lineal

La variable cobertura vegetal, en la época de verano, se mostró aleatoria respecto a la altitud pues no se observó alguna gradiente o tendencia definida por esta variable.

Las regresiones lineales no fueron significativas por lo que no se logró probar, para este caso, que el incremento en la altitud determina una mayor cobertura vegetal.

En la época de invierno, si bien el modelo teórico esperado para la variable cobertura vegetal y su relación con la altitud era una curva unimodal, solo se obtuvieron relaciones lineales, caso de los datos de setiembre del 2000 ( $r^2 = 0.52$ ) y para datos de octubre del 2002 ( $r^2 = 0.95$ ). En los datos de setiembre del 2001, diciembre del 2002, setiembre del 2007 y diciembre del 2007 no se presentaron comportamientos lineales asociados con la gradiente altitudinal; tampoco se presentaron comportamientos unimodales.

### Regresión curvilínea

La relación de la cobertura vegetal respecto a la altitud, evaluada mediante una regresión cuadrática, solo fue significativa ( $p$ -valor  $< 0.05$ ) para setiembre del 2000 (datos interpolados), con un  $r^2 = 0.30$  y para octubre del 2002, con un  $r^2 = 0.97$ . Los datos de setiembre del 2000, abril del 2001, setiembre del 2001, junio del 2002, diciembre del 2002, setiembre del 2007 y diciembre del 2007 no mostraron la tendencia esperada de una curva unimodal ni tampoco lineal.

### Modelo lineal generalizado (GLM)

Los modelos GLM para la relación de la cobertura vegetal respecto a la altitud presentaron devianzas entre 12.6 y 93.13 %, es decir, ajustes bajos a muy altos con relación a los datos.

Los modelos GLM para los cuales habría una mención son los que corresponden al mes de octubre 2002, con  $D^2 = 93.13$ ,  $p$ -valor = 0.005, AIC = 0.197 y  $r^2$  loess residuales = 1, distribución gamma y enlace logarítmico; y setiembre del 2000 con  $D^2 = 54.20$ ,  $p$ -valor = 0.03, AIC = 0.25 y  $r^2$  loess residuales = 0.21, distribución gamma y enlace logarítmico.

Para octubre del 2002 la ecuación del modelo GLM resultante fue: Cobertura = 1.43 + 0.007 Altitud. Para setiembre del 2000, la ecuación del modelo GLM resultante fue: Cobertura = 3.71 + 0.001 Altitud

Los modelos que presentaron curvas unimodales fueron el correspondiente a junio del 2002, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 37.52$ , p-valor = 0.07, AIC = 6.63 y  $r^2$  loess residuales = 0.40; y el correspondiente a enero del 2011, cuadrático, con distribución gamma y enlace inverso,  $D^2 = 22.17$ , p-valor = 0.13, AIC = 12.39 y  $r^2$  loess residuales = 0.03

#### Modelo aditivo generalizado (GAM)

Los modelos GAM para la relación de la cobertura vegetal respecto a la altitud presentaron devianzas entre 14.03 y 95.33 %, es decir, ajustes bajos a muy altos con relación a los datos.

Los modelos GAM para los cuales habría una mención son los que corresponden al mes de octubre 2002, con  $D^2 = 95.33$ , p-valor = 0.004, AIC = 5.45 y  $r^2$  loess residuales = 1, distribución poisson y enlace logarítmico; y setiembre del 2000 con  $D^2 = 54.20$ , p-valor = 0.040, AIC = 0.26 y  $r^2$  loess residuales = 0.21, distribución poisson y enlace logarítmico.

Los modelos que presentaron curvas unimodales fueron el de junio del 2002, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 34.31$ , p-valor = 0.13, AIC = 7.60 y  $r^2$  loess residuales = 0.41; y el de enero del 2011, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 45.31$ , p-valor = 0.05, AIC = 47.69 y  $r^2$  loess residuales = 0.30

### **5.1.3 Respuesta del NDVI a la cobertura vegetal**

Se comprueba la hipótesis que el aumento de la cobertura vegetal determina el incremento de la reflectancia espectral, relación que puede expresarse como una función matemática.

#### Regresión lineal

La variable NDVI Ikonos, en la época de verano, mostró un comportamiento aleatorio con relación a la cobertura vegetal pues no se observó alguna gradiente o tendencia determinada por esta variable, por lo que se concluye que para la época de verano, en el caso del NDVI Ikonos, no se comprueba la hipótesis.

Para el caso de invierno, se observó un ajuste lineal significativo, con  $r^2 = 0.508$  para setiembre del 2001,  $r^2 = 0.929$  para octubre del 2002 y  $r^2 = 0.761$  para diciembre del 2002; asimismo,  $r^2 = 0.439$  para datos de setiembre de 2000 interpolados (mediante geoestadística), lo cual corrobora la hipótesis.

### Regresión curvilínea

Empleando la regresión no polinomial cuadrática, también se ha encontrado ajustes de  $r^2$  elevados para el caso de la cobertura vegetal y el NDVI Spot para los datos de setiembre del 2002, con  $r^2 = 0.71$ , mejor que el correspondiente lineal  $r^2 = 0.51$ . También para el caso de diciembre del 2002 con un  $r^2 = 0.82$  mejor que el correspondiente lineal  $r^2 = 0.76$ .

### Test de Mantel

El Test de Mantel corroboró la existencia de una relación lineal entre el NDVI Spot y la cobertura vegetal, con valores de  $r = 0.39$  para setiembre del 2001,  $r = 0.87$  para octubre del 2002,  $r = 0.55$  para diciembre del 2002 y  $r = 0.22$  para datos interpolados de setiembre de 2000. Sin embargo, cuando se agregó una tercera matriz a la relación resultaron estadísticamente significativas solo las pruebas para los datos de setiembre 2001 (cuando se incluye la variable altitud) y para los datos de diciembre del 2002 (al incluirse la altitud o bien la distancia geográfica).

### Modelo lineal generalizado (GLM)

Cuatro modelos GLM fueron significativos (cobertura de setiembre del 2000 generados, setiembre del 2001, octubre del 2002, diciembre del 2002) y un modelo adicional incluido con criterio flexible, enero del 2011, con  $r^2 = 0.12$ .

El modelo GLM que relaciona el NDVI spot 1998 con la cobertura de octubre del 2002 es el que muestra el mejor ajuste a los datos. El modelo es cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 93.5$ , p-valor = 0.03, AIC = 0.27 y  $r^2$  loess residuales = 1. El modelo resultante tiene la ecuación siguiente:  $NDVI\ Spot-1998 = - 3.22 + 0.052\ Cobertura-oct-2002 - 0.0003\ Cobertura-oct-2002^2$

También el modelo GLM de NDVI spot 1998 con la cobertura de setiembre del 2001 resultó pertinente. El modelo es lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,

$D^2 = 57.26$ , p-valor = 0.0008, AIC = 1.34 y  $r^2$  loess residuales = 0.53. El modelo resultante tiene la ecuación siguiente:  $NDVI\ Spot-1998 = -2.72 + 0.027\ Cobertura-set-2001$

#### Modelo lineal generalizado (GAM)

Los modelos GAM para setiembre del 2000 (datos generados), setiembre del 2001, octubre del 2002 y diciembre del 2002 fueron significativos (p-valor < 0.05).

El modelo GAM de la relación del NDVI spot 1998 con la cobertura de octubre del 2002 mostró el mejor ajuste. El modelo es lineal, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 89.47$ , p-valor = 0.02, AIC = 0.08 y el más alto valor de  $r^2$  (1.0).

También el modelo GAM de NDVI spot 1998 con la cobertura de setiembre del 2001 resultó pertinente. El modelo es lineal, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 57.26$ , p-valor = 0.00, AIC = 1.36 y  $r^2$  loess residuales = 0.53

El único modelo que presentó una respuesta unimodal típica fue el correspondiente a enero del 2011, cuadrático, con distribución poisson y enlace logarítmico,  $D^2 = 45.31$ , p-valor = 0.05, AIC = 47.69 y  $r^2$  loess residuales = 0.30

### **5.1.4 Respuesta del NDVI a la altitud**

Se probó la hipótesis que un incremento en la altitud determina un incremento en la reflectancia espectral o índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), relación que puede expresarse como una función matemática unimodal

Los valores de NDVI Spot 1998 (para el set de puntos de altitud del inventario de diciembre del 2002) y NDVI Ikonos 2002 (para el set de puntos de altitud del inventario del 2001) mostraron una tendencia, cuando se aplicó el test de Mann-Kendall, lo cual reforzó la afirmación de que los datos de cobertura vegetal deben ser analizados como series espaciales.

#### Regresión lineal

El NDVI Ikonos, correspondiente a verano, mostró en los datos de abril del 2001, una relación lineal del orden de  $r^2 = 0.557$ , con datos de NDVI Ikonos transformados

vía Box-Cox (Lambda -0.245) y aplicación del Modelo de Cochrane-Orcutt para corregir la autocorrelación señalada por la Prueba de Durbin – Watson. Sin embargo, para los datos de junio del 2002, el NDVI Ikonos mostró un comportamiento aleatorio con relación a la altitud pues no se observó alguna gradiente o tendencia determinada por la altitud.

Con referencia al invierno, para el caso de NDVI Spot con relación a la altitud se observó una relación lineal del orden de  $r^2 = 0.54$  para los datos interpolados a partir de los datos de setiembre del 2000 y  $r^2 = 0.97$  para los datos de octubre del 2002. Sin embargo, en los datos de setiembre del 2001 y diciembre del 2002 no se presentaron comportamientos lineales asociados con la gradiente altitudinal y el NDVI Spot.

#### Regresión curvilínea

Al igual que en el caso de la regresión lineal, para el verano, solo se obtuvo una prueba significativa para la regresión curvilínea, y fue para la relación del NDVI Ikonos 2002 con la altitud, con un  $r^2 = 0.55$ , para los puntos altitudinales del inventario de abril del 2001.

En el caso de la época húmeda, la relación del NDVI Spot 1998 (datos generados) con respecto a la altitud se mostró significativa para los puntos altitudinales del inventario de setiembre del 2000 y presentó un ajuste de  $r^2 = 0.54$ ; también fue significativa para puntos altitudinales del inventario de octubre del 2002 y su ajuste fue de  $r^2 = 0.99$ .

#### Modelo lineal generalizado (GLM)

El NDVI Spot 1998 con respecto a la altitud se mostró significativo para los puntos altitudinales del inventario de octubre del 2002. El modelo es cuadrático, con  $D^2 = 99.55$ , p-valor = 0.002; AIC = 0.019 y ajuste de  $r^2 = 0.50$ . La ecuación obtenida fue la siguiente:  $\text{NDVI Spot 1998} = 36.55 - 0.167 \text{ Altitud} + 0.0002 \text{ Altitud}^2$

El modelo GLM de NDVI Spot 1998 con datos de altitud de setiembre del 2000 resultó también pertinente. El modelo es cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 56.95$ , p-valor = 0.075, AIC = 1.59 y  $r^2$  loess residuales = 0.53. El modelo resultante tiene la ecuación siguiente:  $\text{NDVI Spot-1998} = -5.04 + 0.016 \text{ Altitud} - 1.62\text{E-}05 \text{ Altitud}^2$ . Este modelo presentó una curva unimodal.

También presento una curva unimodal el GLM para el NDVI World View en función de la altitud, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 75.66$ , p-valor = 0.0004, AIC = 1.07 y  $r^2$  loess residuales = 0.001

#### Modelo lineal generalizado (GAM)

Los modelos que presentaron curvas unimodales fueron el GAM para el NDVI Spot, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 56.64$ , p-valor = 0.14, AIC = 1.97 y  $r^2$  loess residuales = 0.40. También el GAM para el NDVI World View, cuadrático, con distribución gamma y enlace logarítmico,  $D^2 = 74.24$ , p-valor = 0.001, AIC = 1.23 y  $r^2$  loess residuales = 0.002

### **5.1.5 La serie de NDVI con relación a la gradiente altitudinal**

Con la incorporación de una serie de datos espaciales de NDVI en función de la altitud y la obtención de modelos lineales generalizados (GLM) y modelos aditivos generalizados (GAM) significativos se probó que el NDVI (y por extensión la cobertura vegetal) se comporta como serie espacial dependiente de la gradiente altitudinal.

Se confirma que la relación del NDVI con respecto a la altitud y su comportamiento unimodal dependen de las características de cada quebrada. Cada quebrada se muestra particular en su respuesta del NDVI a la gradiente altitudinal.

Las quebradas que presentaron los modelos GLM con mejores ajustes son la Q. Lúcumo para el NDVI spot y la Q. Guayabo para el NDVI Aster.

La Q. Lúcumo detenta el mejor modelo GAM para la respuesta del NDVI spot 1998 a la altitud. También para la época seca, la Q. Lúcumo tiene el mejor modelo GAM para la respuesta del NDVI World View a la altitud.

Se prueba que en la época húmeda, en la Q. Lúcumo (cuya orientación es suroeste) se presenta la mayor cobertura vegetal expresada como NDVI, ello a partir de la constatación que la curva de respuesta de NDVI en relación con la gradiente altitudinal alcanza los mayores valores. También se puede decir que sigue en orden Q. Verde transecto BG.

Para la época seca, la curvas de NDVI de Q. Verde transecto BG sobresalen sobre las otras curvas de respuestas de las otras quebradas lo cual indica que es la quebrada más húmeda en verano (su orientación es sureste).

El comportamiento espacial del NDVI es marcadamente diferente entre la época seca y la época húmeda.

La distribución altitudinal de los NDVI tiene núcleos de mayor NDVI, diferentes entre verano e invierno, sobre el cual concéntricamente se van organizando las isolíneas.

#### Modelo lineal generalizado (GLM)

Los modelos GLM para las quebradas Puquio, Lúcumo y Verde BG son los que mejor tipifican la relación NDVI SPOT vs Altitud. Las devianzas respectivas para Lúcumo, Puquio y Verde BG fueron  $D^2 = 96.83$ ,  $D^2 = 94.71$ ,  $D^2 = 92.34$ ; y los  $r^2$  de los residuales con altitud fueron  $r^2 = 0.39$ ,  $r^2 = 0.08$  y  $r^2 = 0.23$ .

El modelo GLM ideal con respuesta unimodal simétrica corresponde a la imagen Spot para la quebrada Lúcumo, con una ecuación:  $NDVI\ Spot = 31.63 - 0.13\ Altitud + 0.00015\ Altitud^2$ . El ajuste a los datos es del orden de casi 97 % con una explicación de la variabilidad debida a la altitud del orden del 39%.

Los modelos de NDVI Spot para la Q. Puquio y NDVI World View y NDVI Spot para la Q. Verde BG son los modelos GLM que más se acercan al ideal hipotético puesto que tienen características conjuntas de mayor devianza, menor p-valor, menor AIC y más alto  $r^2$  de residuales.

#### Modelo lineal generalizado (GAM)

La imagen Spot (época húmeda) presentó modelos GAM con respuesta unimodal para las quebradas Lúcumo y Puquio.

Las imágenes Aster, Ikonos y World View, si bien no presentaron respuestas unimodales, permitieron obtener gradientes de NDVI respecto a la altitud con ajustes significativos.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

### **5.2.1 Con relación a nuevos temas de investigación**

Dado que las ecuaciones obtenidas explicaron muy limitadamente las variaciones obtenidas es recomendable incluir otras variables explicatorias como la pendiente o la orientación geográfica.

Dado que los datos fueron tomados de un estudio de monitoreo de lomas, cuya criterio de muestreo fue aleatorio, y dado que las variables estudiadas tienen un comportamiento de gradiente, resultó que tales datos del estudio de monitoreo no permitieron fehaciente falsar las hipótesis. Se recomienda por tanto para investigaciones de la relación de la altitud con la cobertura vegetal y el NDVI tomar los datos como series espaciales. También ello implica recomendar que los monitoreos de la cobertura vegetal, en lomas, se considere el criterio de gradientes y no diseños aleatorios simples.

Se observó que los comportamientos de las variables estudiadas varían según la estación climática, invierno o verano, por ello las conclusiones para los análisis efectuados deberán reportarse por estación climática. Probablemente haya una variación por quebradas y por años. El presente estudio no concluye sobre variaciones anuales puesto que no fue un objetivo previsto. Respecto a las variaciones por quebrada, si bien no fue planteado su estudio en el objetivo de la Tesis se deduce dicha influencias a partir de las series espaciales de NDVI utilizadas para el análisis de gradiente altitudinal en el referido NDVI

### **5.2.2 Con relación a la metodología de estudio**

El empleo de los modelos lineales generalizados (GLM) y la versión semiparamétrica, el modelo aditivo generalizado (GLM) es más apropiado para casos similares al estudiado, en especial cuando debe aplicarse regresiones y los datos no presentan normalidad.

Es conveniente desarrollar una investigación similar aplicando otras técnicas que la literatura también recomienda como son los modelos lineales generalizados mixtos

(GLMM) y modelos aditivos generalizados (GAMM), así como los modelos jerárquicos de regresión logística.

Tanto las variables de cobertura vegetal y NDVI como la altitud deben ser evaluadas como series espaciales puesto que el análisis exploratorio de datos mostró que su comportamiento espacial es anisotrópico, es decir responden a una gradiente espacial determinada.

Como procedimiento metodológico estándar se recomienda que en el procesamiento de los resultados de los inventarios de vegetación se aplique pruebas de verificación de autocorrelación espacial y correlación angular para descartar la anisotropía de los datos y la dependencia espacial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaraz, F. (2013). Fundamentos de la clasificación de la vegetación. En *Geobotánica*. Murcia: Universidad de Murcia. Recuperado de <http://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema10.pdf>
- Amaral, S., Soares, J. V., Alves, D. S., Mello, E. de, Almeida, S. A. S., Silva, O. da y Silveira, A. M. (1996). Relações entre Índice de Área Foliar (LAI), Área Basal e Índice de Vegetação (NDVI) em relação a diferentes estágios de crescimento secundário na Floresta Amazônica em Rondônia. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 8. Recuperado de <http://bibdigital.sid.inpe.br/rep-sid.inpe.br/deise/1999/01.29.11.24>
- Arana, C. (2000). *Evaluación de la vegetación en el sector Atocongo. Informe técnico científico. Año 2000*. Lima: Walsh Perú S.A.
- Arana, C. (2001a). *Monitoreo de la vegetación del sector Atocongo, periodo húmedo del año 2001. Informe técnico científico* (p. 25). Lima: Walsh Perú S.A.
- Arana, C. (2001b). *Monitoreo de la vegetación del sector Atocongo, periodo seco del año 2001. Informe técnico científico* (p. 15). Lima: Walsh Perú S.A.
- Austin, M. P. (1971). Role of regression analysis in plant ecology. *Proc. Ecol. Soc.*, (6), 63–75.
- Austin, M. P. (1980). Searching for a model for use in vegetation analysis. *Vegetatio*, 42(1-3), 11-21. <https://doi.org/10.1007/BF00048865>
- Austin, M. P. (1987). Models for the analysis of species' response to environmental gradients. *Vegetatio*, 69(1-3), 35-45. <https://doi.org/10.1007/BF00038685>
- Austin, M. P. (1999). A Silent Clash of Paradigms: Some Inconsistencies in Community Ecology. *Oikos*, 86(1), 170. <https://doi.org/10.2307/3546582>

- Austin, M. P. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157(2-3), 101-118. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00205-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00205-3)
- Austin, M. P. y Austin, B. O. (1980). Behaviour of experimental plant communities along a nutrient gradient. *Journal of Ecology*, (68), 891-918.
- Austin, M. P., Belbin, L., Meyers, J. A., Doherty, M. D. y Luoto, M. (2006). Evaluation of statistical models used for predicting plant species distributions: Role of artificial data and theory. *Ecological Modelling*, 199(2), 197-216. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.023>
- Austin, M. P., Cunningham, R. B. y Fleming, P. M. (1984). New approaches to direct gradient analysis using environmental scalars and statistical curve-fitting procedures. *Vegetatio*, 55(1), 11-27. <https://doi.org/10.1007/BF00039976>
- Austin, M. P. y Smith, T. M. (1989). A new model for the continuum concept. *Vegetatio*, 83(1-2), 35-47. <https://doi.org/10.1007/BF00031679>
- Benito de Pando, B. y Peñas de Giles, J. (2007). Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus*, (7), 100-119.
- Bio, A. M. F., Alkemade, R. y Barendregt, A. (1998). Determining alternative models for vegetation response analysis: a nonparametric approach. *J. Veg. Sci.*, 9, 5-16.
- Boelman, N. T., Stieglitz, M., Rueth, H. M., Sommerkorn, M., Griffin, K. L., Shaver, G. R. y Gamon, J. A. (2003). Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. *Oecologia*, 135(3), 414-421. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1198-3>
- Box, E. O., Holben, B. N. y Kalb, V. (1989). Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO<sub>2</sub> flux. *Vegetatio*, 80(2), 71-89. <https://doi.org/10.1007/BF00048034>

- Brower, J. E., Zar, J. H. y von Ende, C. (1990). *Field and laboratory methods for general ecology* (3.<sup>a</sup> ed.). Dubuque: W.C. Brown Publishers.
- Buenaventura Ingenieros S.A. (2008a). *Monitoreo biológico canteras de Atocongo. Primer semestre 2007* (p. 57). Lima: Cementos Lima S.A.
- Buenaventura Ingenieros S.A. (2008b). *Monitoreo biológico canteras de Atocongo. Segundo semestre 2007* (p. 49). Lima.
- Cano, A., Roque, J., Arakaki, M., Arana, C., LaTorre, M., Llerena, N. y Refulio, N. (1999). Diversidad florística de las lomas de Lachay (Lima) durante el evento «El Niño 1997-1998». *Revista Peruana de Biología, Extraordinario*, 125-132.
- Carlson, T. N., Perry, E. M. y Schmugge, T. J. (1990). Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52(1), 45–69.
- Carlson, T. N. y Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62(3), 241–252.
- Cereceda, P., Schemenauer, R. y Suit, M. (1993). Producción de agua de nieblas costeras en Perú. *Alisios*, 63-74.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: RIALP.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental*. Barcelona: Ariel.
- Conover, W. J., y Iman, R. L. (1979). *On multiple-comparisons procedures* (Technical Report LA-7677-MS). Los Alamos Scientific Laboratory.
- Crippen, R. E. (1990). Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*, 34(1), 71-73. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90085-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90085-Z)
- Cuya, O. (2016). *Clasificación de los ecosistemas de las lomas de Atocongo mediante el enfoque de la ecología del paisaje (versión en revisión)* (Tesis para optar el grado de Doctor en Biología). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.

- Dillon, M. O., Nakazawa, M., Leiva, S., Haas, J. y Dillon, M. O. (2003). The Lomas formations of coastal Peru: Composition and biogeographic history. *El Niño in Peru: biology and culture over, 10*, 1–9.
- Ding, M., Zhang, Y., Liu, L., Zhang, W., Wang, Z. y Bai, W. (2007). The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, *17*(3), 259-268. <https://doi.org/10.1007/s11442-007-0259-7>
- Fairbanks, D. H. K. y Mcgwire, K. C. (2004). Patterns of floristic richness in vegetation communities of California: regional scale analysis with multi-temporal NDVI. *Global Ecology and Biogeography*, *13*(3), 221-235.
- Ferreya, R. (1953). Comunidades vegetales de algunas lomas costaneras del Perú. *Boletín Estación Experimental Agrícola de La Molina*, (53), 11-13.
- Ferreya, R. (1983). Los tipos de vegetación de la costa peruana. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, *40*, 241-256.
- Fortin, M.-J. y Dale, M. R. T. (2005). *Spatial Analysis: A Guide for Ecologists*. Cambridge University Press.
- Franklin, J., McCullough, P. y Gray, C. (2000). Terrain variables used for predictive mapping of vegetation communities in southern California. *Terrain Analysis : Principles and Applications / Edited by John P. Wilson, John C. Gallant*. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301796218>
- Gauch, H. G. y Whittaker, R. H. (1972). Comparison of Ordination Techniques. *Ecology*, *53*(5), 868. <https://doi.org/10.2307/1934302>
- Gleason, H. A. (1926). The Individualistic Concept of the Plant Association. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, *53*(1), 7. <https://doi.org/10.2307/2479933>
- Grau, O., Grytnes, J.-A. y Birks, H. J. B. (2007). A comparison of altitudinal species richness patterns of bryophytes with other plant groups in Nepal, Central

- Himalaya. *Journal of Biogeography*, 34(11), 1907–1915.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01745.x>
- Guisan, A., Edwards Jr, T. C. y Hastie, T. (2002). Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*, 157(2–3), 89-100. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00204-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00204-1)
- Guisan, A. y Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993-1009.  
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., Weiss, S. B. y Weiss, A. D. (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 143(1), 107-122.  
<https://doi.org/10.1023/A:1009841519580>
- Guisan, A. y Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2–3), 147-186.  
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. del P. (2010). *Metodología de la investigación* (5.<sup>a</sup> ed.). México D.F.: Mc Graw Hill.
- Huisman, J., Olf, H. y Fresco, L. f. m. (1993). A hierarchical set of models for species response analysis. *Journal of Vegetation Science*, 4(1), 37–46.  
<https://doi.org/10.2307/3235732>
- Jansen, F. (2012). Hierarchical species responses curves in package eHOF. Recuperado de <http://cran.r-project.org/web/packages/eHOF/vignettes/eHOF.pdf>
- Jansen, F. y Oksanen, J. (2013). How to model species responses along ecological gradients – Huisman–Olf–Fresco models revisited. *Journal of Vegetation Science*, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1111/jvs.12050>
- Jiang, D., Wang, N., Yang, X. y Wang, J. (2003). Study on the interaction between NDVI profile and the growing status of crops. *Chinese Geographical Science*, 13(1), 62-65. <https://doi.org/10.1007/s11769-003-0086-4>

- Keizer, J. J. (2000). Vascular plant family composition of the Eastern Cordillera of Colombia. Recuperado de <http://dare.uva.nl/record/90364>
- Kessler, M., Kluge, J., Hemp, A. y Ohlemüller, R. (2011). A global comparative analysis of elevational species richness patterns of ferns. *Global Ecology and Biogeography*, 20(6), 868–880. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00653.x>
- Kluge, J. y Kessler, M. (2006). Fern endemism and its correlates: contribution from an elevational transect in Costa Rica. *Diversity and Distributions*, 12(5), 535–545. <https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2006.00231.x>
- Krömer, T., Kessler, M. y Herzog, S. K. (2006). Distribution and Flowering Ecology of Bromeliads along Two Climatically Contrasting Elevational Transects in the Bolivian Andes1. *Biotropica*, 38(2), 183–195. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00124.x>
- Lam, N. S.-N. y Quattrochi, D. A. (1992). On the Issues of Scale, Resolution, and Fractal Analysis in the Mapping Sciences\*. *The Professional Geographer*, 44(1), 88–98. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1992.00088.x>
- Leps, J. y Smilauer, P. (2003). *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO*. New York: Cambridge University Press.
- Levin, N., Shmida, A., Levanoni, O., Tamari, H. y Kark, S. (2007). Predicting mountain plant richness and rarity from space using satellite-derived vegetation indices. *Diversity and Distributions*, 13(6), 692–703. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00372.x>
- Matteucci, S. D. y Colma, A. (1982). *Metodología para el estudio de la vegetación*. Washington D.C.: OEA. Secretaría General.
- Meentemeyer, R. K., Moody, A. y Franklin, J. (2001). Landscape-scale patterns of shrub-species abundance in California chaparral – The role of topographically mediated resource gradients. *Plant Ecology*, 156(1), 19-41. <https://doi.org/10.1023/A:1011944805738>

- Miller, J., Franklin, J. y Aspinall, R. (2007). Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. *Ecological Modelling*, 202(3–4), 225-242. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.12.012>
- Moisen, G. G., Freeman, E. A., Blackard, J. A., Frescino, T. S., Zimmermann, N. E. y Edwards Jr., T. C. (2006). Predicting tree species presence and basal area in Utah: A comparison of stochastic gradient boosting, generalized additive models, and tree-based methods. *Ecological Modelling*, 199(2), 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.021>
- Monty, A. y Mahy, G. (2009). Clinal Differentiation during Invasion: *Senecio inaequidens* (Asteraceae) along Altitudinal Gradients in Europe. *Oecologia*, 159(2), 305-315.
- Morawitz, D. F., Blewett, T. M., Cohen, A. y Alberti, M. (2006). Using NDVI to Assess Vegetative Land Cover Change in Central Puget Sound. *Environmental Monitoring and Assessment*, 114(1-3), 85-106. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-1679-z>
- Muenchow, J., Bräuning, A., Rodríguez, E. F. y von Wehrden, H. (2013). Predictive Mapping of Species Richness and Plant Species' Distributions of a Peruvian Fog Oasis Along an Altitudinal Gradient. *Biotropica*, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1111/btp.12049>
- Oka, S. y Ogawa, H. (1984). The distribution of lomas vegetation and its climatic environments along the pacific coast of Peru. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 19, 113-125.
- Oksanen, J. y Minchin, P. R. (2002). Continuum theory revisited: what shape are species responses along ecological gradients? *Ecological Modelling*, 157(2–3), 119-129. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00190-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00190-4)
- Ordóñez, J. y Faustino, J. (1982). Evaluación del potencial hídrico en lomas costeras del Perú (lomas de Lachay – Iguanil). *Zonas Áridas*, (6), 55-76.

- Peper, J., Jansen, F., Pietzsch, D. y Manthey, M. (2011). Patterns of plant species turnover along grazing gradients. *Journal of Vegetation Science*, 22(3), 457–466. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01260.x>
- Perez, C. A. y Frangi, J. L. (2000). Grassland Biomass Dynamics along an Altitudinal Gradient in the Pampa. *Journal of Range Management*, 53(5), 518. <https://doi.org/10.2307/4003653>
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. New York: OUP Oxford.
- Piscoya, L. (1995). *Investigación científica y educacional* (2.<sup>a</sup> ed.). Lima: Amaru.
- Raimondi, A. (1874). *El Perú. Tomo I*. Lima: Impr. del estado. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=uo9fAAAACAAJ>
- Rosenberg, M. S. y Anderson, C. D. (2011). PASSaGE: Pattern Analysis, Spatial Statistics and Geographic Exegesis. Version 2. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(3), 229-232. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00081.x>
- Rouse Jr, J., Haas, R., Schell, J. y Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*, 351, 309.
- Schemenauer, R. y Cereceda, P. (1993). Meteorological conditions at a coastal fog collection site in Perú. *Atmósfera*, 6(3), 175-178.
- Shimwell, D. (1972). *The description and classification of vegetation* (University of Washington). Seattle.
- Sociedad Española de Ciencias Forestales. (2005). *Diccionario forestal*. Mundi Prensa. Recuperado de [www.secforestales.org/pdf/publicac/dicfor.pdf](http://www.secforestales.org/pdf/publicac/dicfor.pdf)
- Strahler, A. (1974). *Geografía física*. Barcelona: Omega.
- Supo, J. (2012). *Seminarios de investigación científica. Sinopsis de vídeo libro*. Bioestadístico EIRL. Recuperado de <http://seminariosdeinvestigacion.com/sinopsis>

- Tam, J., Vera, G. y Oliveros, R. (2008). Tipos, métodos y estrategias de investigación científica. *Pensamiento y acción*, (5), 145-154.
- Ter Braak, C. J. F. (1985). Correspondence Analysis of Incidence and Abundance Data: Properties in Terms of a Unimodal Response Model. *Biometrics*, 41(4), 859. <https://doi.org/10.2307/2530959>
- Ter Braak, C. J. F. (1986). Canonical Correspondence Analysis: A New Eigenvector Technique for Multivariate Direct Gradient Analysis. *Ecology*, 67(5), 1167-1179. <https://doi.org/10.2307/1938672>
- Ter Braak, C. J. F. y Prentice, I. C. (1988). A Theory of Gradient Analysis. En A. H. F. M. Begon E. D. Ford and A. Macfadyen (Ed.), *Advances in Ecological Research* (Vol. Volume 18, pp. 271-317). Academic Press. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S006525040860183X>
- Tian, Z., Zhuang, L., Lu, S., Li, W.-H., Wang, Z.-K. y Liu, Y. (2013). Characteristics of vegetation and the vertical distribution patterns on the northern slope of the usun mountains, Xinjiang. *Pakistan Journal of Botanic*, 45(4), 1123-1134.
- Torres, J. (1981). *Productividad primaria y cuantificación de los factores ecológicos que la determinan, en las lomas costaneras del centro del Perú*. (Tesis para optar el título de biólogo). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Torres, J. y Arias, C. (1989). Dinámica de la Vegetación de las Lomas del Sur del Perú: Estacionalidad y productividad primaria caso: Lomas de Atiquipa. *Zonas Áridas*, (6), 55-76.
- Tovar, M. (2008). *Métodos y técnicas de investigación en gerencia social (Material del curso - Maestría en Gerencia Social, modalidad virtual)*. PUCP.
- Uğurlu, E. y Oldeland, J. (2012). Species response curves of oak species along climatic gradients in Turkey. *International Journal of Biometeorology*, 56(1), 85-93. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0399-9>

- Van Der Maarel, E. (1979). Transformation of cover-abundance values in phytosociology and its effect on community similarity. *Vegetatio*, (39), 97-114.
- Van Der Maarel, E. van der. (2005). Vegetation ecology - an overview. En *Vegetation ecology* (pp. 1-51). Oxford.
- Vayssières, M. P., Plant, R. E. y Allen-Diaz, B. H. (2000). Classification trees: An alternative non-parametric approach for predicting species distributions. *Journal of Vegetation Science*, 11(5), 679-694. <https://doi.org/10.2307/3236575>
- Walsh Perú S.A. (2001). *Evaluación biológica de la zona de Atocongo. Año 2000* (No. IND 1078) (p. 46). Lima.
- Walsh Perú S.A. (2001). *Monitoreo biológico de la zona de Atocongo. Época húmeda, octubre 2001* (No. IND 1084) (p. p.i.). Lima: Cementos Lima S.A.
- Walsh Perú S.A. (2001). *Monitoreo biológico de la zona de Atocongo. Época seca, abril 2001* (No. IND 1084) (p. 46). Lima: Cementos Lima S.A.
- Wang, Z., Luo, T., Li, R., Tang, Y. y Du, M. (2013). Causes for the unimodal pattern of biomass and productivity in alpine grasslands along a large altitudinal gradient in semi-arid regions. *Journal of Vegetation Science*, 24(1), 189–201. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01442.x>
- Wang, Z., Tang, Z. y Fang, J. (2007). Altitudinal patterns of seed plant richness in the Gaoligong Mountains, south-east Tibet, China. *Diversity and Distributions*, 13(6), 845–854. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00335.x>
- Weberbauer, A. (1945). *El mundo vegetal de los andes peruanos. Estudios fitogeográficos*. Lima: Dirección de Agricultura, Estación Experimental Agrícola de La Molina.
- Wellens, J. (1997). Rangeland vegetation dynamics and moisture availability in Tunisia: an investigation using satellite and meteorological data. *Journal of*

*Biogeography*, 24(6), 845–855. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1997.00159.x>

Whittaker, R. H. (1951). A criticism of the plant association and climatic climax concepts. *North West Science*, (25), 17-31.

Yee, T. W. y Mitchell, N. D. (1991). Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science*, 2(5), 587-602. <https://doi.org/10.2307/3236170>

Zhou, G., Guan, L., Wei, X., Zhang, D., Zhang, Q., Yan, J. y Wen, D. (2007). Litterfall Production along Successional and Altitudinal Gradients of Subtropical Monsoon Evergreen Broadleaved Forests in Guangdong, China. *Plant Ecology*, 188(1), 77-89.

Zorogastúa, P., Quiróz, R. y Garatuza, J. (2012). Dinámica de los bofedales en el altiplano peruano-boliviano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 8(2), 63-75.

Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A. y Smith, G. M. (2009). *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. New York: Springer.