

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE TITULACION POR TESIS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**MAPA DE ZONIFICACIÓN POR GRADO DE DESEMPEÑO (PG)
PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS DE ACUERDO A LA
CLASIFICACIÓN SUPERPAVE**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADA POR:

Bach. ORELLANO ROJAS YEISON DANIEL

Bach. PILCO CÁCERES CARLOS ISMAEL

Asesor: M. Sc. Ing. HUAMÁN GUERRERO NÉSTOR W.

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mis padres y abuelo que estuvieron siempre conmigo, apoyándome en todo momento y sin condiciones.

Carlos Ismael Pilco Cáceres

Dedico esta tesis a mis padres María Elena Rojas Colque y Carlos Daniel Orellano Chávez, ya que sus sacrificios, esfuerzos y dedicación ha sido posible que juntos logremos este sueño.

Yeison Daniel Orellano Rojas

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer al ing. Néstor W. Huamán Guerrero, por ayudarnos y guiarnos en todo momento, de igual forma al ing. Samuel Tamara Rodríguez y el ing. Jaime Sueldo Mesones, quienes contribuyeron a la correcta realización metodológica de nuestra investigación, además del ing. Alfonso Eduardo Escobar Zamalloa por la confianza, apoyo y amistad brindada a lo largo de toda la investigación. Asimismo, a nuestra Alma Mater y docentes, los cuales nos ayudaron y formaron durante nuestra etapa estudiantil.

Yeison Orellano y Carlos Pilco

2.3.4.2. Propiedades químicas.....	40
2.3.5. Clasificación por Grado de Desempeño (PG)	41
2.3.6. Sistema SUPERPAVE	41
2.3.7. Ensayos de laboratorio SUPERPAVE para cementos asfálticos.....	42
2.3.7.1. Reómetro de corte dinámico (DSR).....	42
2.3.7.2. Viscosímetro rotacional (VR).....	43
2.3.7.3. Reómetro de viga a flexión (BBR)	45
2.3.7.4. Ensayo de tracción directa (DTT).....	47
2.3.7.5. Ensayo en estufa de película delgada (TFOT)	49
2.3.7.6. Ensayo de película delgada en horno rotatorio (TFROT).....	50
2.3.7.7. Cámara de envejecimiento a presión (PAV)	50
2.3.8. Especificaciones SUPERPAVE para cementos asfálticos	51
2.3.9. Grado de Desempeño (PG).....	53
2.3.10.Efectos de la velocidad de carga.....	56
2.3.11.Efecto de la Temperatura del aire	56
2.3.12.Datos climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA)	57
2.3.13.Validación de los datos obtenidos por el Proyecto MERRA 2.....	58
2.3.14.Modelos matemáticos.....	61
2.3.15.Modelos matemáticos para la predicción de la temperatura del pavimento.61	
2.3.15.1. SHRP Original	62
2.3.15.2. SHRP Canadiense	63
2.3.15.3. LTPP – 1996.....	63
2.3.15.4. LTPP 1998 – 2000.	64
2.3.15.5. LTPP 2004.....	64
2.3.16.Corrección del Grado de Desempeño (PG) por velocidad y nivel de trafico	65
2.3.17.Equivalencia del Grado de Penetración (PEN) con el Grado de Desempeño (PG).....	65
2.4. Definición de términos básicos.....	67
CAPITULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	69
3.1. Hipótesis.....	69
3.1.1. Hipótesis general.....	69

3.1.2. Hipótesis Específicas.....	69
3.2. Identificación de Variables.....	69
3.2.1. Definición conceptual de variables	69
3.2.2. Operacionalización de variables	70
CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	71
4.1. Tipo y método de investigación.....	71
4.1.1. Tipo de investigación	71
4.1.2. Método de investigación.....	71
4.2. Población de estudio	71
4.3. Diseño muestral	71
4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	72
4.5. Procedimientos para la recolección de datos.....	72
4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	72
CAPITULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	73
5.1. Desarrollo de la investigación	73
5.1.1. Selección de los datos meteorológicos.....	73
5.1.2. Datos geográficos de los distritos de las regiones de Cusco y Puno.....	75
5.1.3. Recolección de datos meteorológicos	78
5.1.4. Máxima y mínima temperatura del aire	78
5.1.5. Máxima y mínima temperatura del aire con una confiabilidad al 98% y 50%.	87
5.2. Aplicación y análisis de los modelos matemáticos SHRP y LTPP.	95
5.2.1. Modelo SHRP	95
5.2.1.1. SHRP Original - 1994.	95
5.2.1.2. SHRP Canadiense	96
5.2.2. Modelo LTPP.....	102
5.2.2.1. LTPP - 1996	103
5.2.2.2. LTPP bind 1998 – 2000.	109
5.2.2.3. LTPP Bind - 2004.....	110

5.3. Obtención del grado de desempeño (PG) y del mapa de Grado de Desempeño (PG)	116
5.3.1. Determinación y análisis del grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 50%	117
5.3.2. Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 50%	120
5.3.3. Determinación y análisis del grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 98%	121
5.3.4. Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 98%	124
5.3.5. Determinación y análisis del grado de desempeño (PG) de la región Puno para una confiabilidad del 50%	125
5.3.6. Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Puno para una confiabilidad del 50%	128
5.3.7. Determinación y análisis del grado de desempeño (PG) de la región Puno para una confiabilidad del 98%	129
5.3.8. Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Puno para una confiabilidad del 98%	132
5.4. Corrección del Grado de Desempeño por trafico y velocidad	133
5.4.1. Región Puno	133
5.4.2. Región Cusco	136
5.5. Contrastación de Hipótesis	139
5.5.1. Hipótesis Especifica 1	139
5.5.2. Hipótesis Especifica 2	139
5.5.3. Hipótesis Especifica 3	140
CONCLUSIONES	142
RECOMENDACIONES	144
REFERENCIAS	145
ANEXO	148
Anexo 1: Matriz de consistencia	148
Anexo 2: Operacionalización de variables	150
Anexo 3. Data climatológica del software MERRA-02	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Temperatura y cantidad de carbono para la obtención de productos terminados de la refinación del petróleo.....	35
Tabla N° 2: Valores de perdida unitaria por infiltración.....	38
Tabla N° 3: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG.....	54
Tabla N° 4: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG (continuación)	55
Tabla N° 5: Datos geográficos y climáticos de las localidades basados en los datos del Sistema Meteorológico Nacional	59
Tabla N° 6: Datos de las temperaturas máximas y mínimas registras y el MERRA 2 en la localidad de Catamarca.....	59
Tabla N° 7: Datos de las temperaturas máximas y mínimas registras y el MERRA 2 en la localidad de La Rioja.....	60
Tabla N° 8: Datos de las temperaturas máximas y mínimas registras y el MERRA 2 en la localidad de Chamental.	60
Tabla N° 9: Parámetros estadísticos para la validación para el ajuste entre las temperaturas máximas y mínimas de las localidades analizadas.....	61
Tabla N° 10: Grados de corrección por velocidad y nivel de tráfico.....	65
Tabla N° 11: Clasificación por velocidad.....	65
Tabla N° 12: Relación del Grado de Penetración (PEN) con el Grado de Desempeño (PG)	66
Tabla N° 13: Operacionalización de variables	70
Tabla N° 14: Datos geográficos de los distritos de la región de Cusco	75
Tabla N° 15. Datos geográficos de los distritos de la región de Puno	76
Tabla N° 16: Temperaturas máximas y mínimas del distrito de Acomayo región Cusco (2001-2020).....	79
Tabla N° 17: Temperatura promedio máxima y mínima del distrito Acomayo (2001-2020)	80
Tabla N° 18: Temperaturas máximas y mínimas del aire de los distritos de la región Cuzco	81
Tabla N° 19: Temperaturas máximas y mínimas del aire de los distritos de la región Puno.	84

Tabla N° 20: Temperatura máxima y mínima del aire con una confiabilidad del 98% y 50%, de los distritos de la región Cuzco	89
Tabla N° 21: Temperatura máxima y mínima del aire con una confiabilidad del 98% y 50%, de los distritos de la región Puno	92
Tabla N° 22: Latitud, temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad del distrito de Acomayo.	95
Tabla N° 23: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo SHRP-1994 y el SHRP Canadiense de los distritos de la región Cusco.....	96
Tabla N° 24: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo SHRP-1994 y el SHRP Canadiense de los distritos de la región Puno.	99
Tabla N° 25: Latitud, desviación Estándar, temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad del distrito de Acomayo.	102
Tabla N° 26: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo LTPP - 1996, de los distritos de la región Cuzco.	103
Tabla N° 27: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo LTPP-1996 de los distritos de la región Puno.	106
Tabla N° 28: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo LTPP - 2004 y LTPP 1998 - 2000, de los distritos de la región Cuzco.....	110
Tabla N° 29: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo LTPP - 2004 y LTPP 1998 - 2000, de los distritos de la región Puno.....	113
Tabla N° 30: Grado de Desempeño (PG) de los distritos de la región Cusco con una confiabilidad del 50%.....	117
Tabla N° 31: Grado de Desempeño (PG) de los distritos de la región Cusco con una confiabilidad del 98%.....	121
Tabla N° 32: Grado de Desempeño (PG) de los distritos de la región Puno con una confiabilidad del 50%.....	125
Tabla N° 33: Grado de Desempeño (PG) de los distritos de la región Puno con una confiabilidad del 98%.....	129
Tabla N° 34: ESAL de diseño de proyecto para la región de Puno	135
Tabla N° 35: Datos geométricos del proyecto en la región Puno	135
Tabla N° 36: Identificación de las estaciones de control, con sus respectivos tramos.	136
Tabla N° 37: Resumen de Ejes equivalente por tamos	138
Tabla N° 38: Datos de velocidad del tramo Alfamayo-Quillabamba	138
Tabla N° 39: Matriz de Consistencia	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Muestra de cemento asfáltico en recipiente cilíndrico.....	22
Figura N° 2: Ensayo de penetración.....	23
Figura N° 3: Medición del valor de penetración.....	23
Figura N° 4: Viscosímetro capilar Canon Manning y del Instituto del Asfalto	24
Figura N° 5: Esquema de proceso de refinación del crudo de petróleo y la obtención de diversos productos.....	36
Figura N° 6: Lago de La Brea en Trinidad y Tobago	37
Figura N° 7: Lago Guanoco en Venezuela.....	37
Figura N° 8: Extendedora de concreto asfáltico.....	39
Figura N° 9: Composición química del asfalto.....	41
Figura N° 10: Reómetro de corte dinámico.....	42
Figura N° 11: Módulo complejo dinámico y ángulo de fase.....	43
Figura N° 12: Elementos del viscosímetro rotacional.....	44
Figura N° 13: Grafico viscosidad vs temperatura.....	45
Figura N° 14: Partes del reómetro de viga a flexión.....	46
Figura N° 15: Molde de la viga.....	46
Figura N° 16: Deformación hasta la rotura.....	48
Figura N° 17: Muestras en la estufa precalentada a 163 °C	49
Figura N° 18: Horno Rotatorio de película delgada.....	50
Figura N° 19: Cementos asfálticos A y B a diferentes temperaturas	52
Figura N° 20: Efecto de la temperatura en el cemento asfáltico.....	56
Figura N° 21: Efecto de la temperatura en la deformación de la mezcla asfáltica	57
Figura N° 22: Mapa de ubicación de las refinerías proveedoras de cemento asfáltico en Perú.....	66
Figura N° 23. Mapa distrital de la región Cuzco	73
Figura N° 24. Mapa distrital de la región de Puno.....	74
Figura N° 25: Distribución de probabilidad para el promedio de los 7 días con máximas temperaturas en el pavimento	88
Figura N° 26: Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 50%	120

Figura N° 27: Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Cusco con una confiabilidad del 98%	124
Figura N° 28: Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Puno con una confiabilidad del 50%	128
Figura N° 29: Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Puno con una confiabilidad del 98%	132
Figura N° 30: Ubicación del proyecto Mejoramiento de la carretera.	133
Figura N° 31: Mapa de Zonificación por grado de desempeño (PG) de los distritos de Nuñoa y Macusani.	134
Fuente: Elaboración Propia.....	134
Figura N° 32: Ubicación de las estaciones	136
Figura N° 33: Mapa de Zonificación por grado de desempeño (PG) de los distritos de Ocobamba y Huayopata.....	137

RESUMEN

En la presente investigación titulada “Mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG) para cementos asfálticos según la clasificación SUPERPAVE”, se desarrolló el estudio para establecer un mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico, según lo especificado por la metodología SUPERPAVE, para las regiones de Cuzco y Puno, considerando como los factores climáticos afectan directamente las condiciones de los pavimentos en el país. Para lograr ello, se realizó un análisis climatológico de los distritos de las regiones de Cuzco y Puno, basándonos en los datos climatológicos diarios de temperatura máxima y mínima en un periodo de 20 años proporcionados por el proyecto MERRA-2 (NASA) en los distritos de las regiones de estudio, procediendo con el cálculo de los valores del Grado de Desempeño (PG), utilizando los modelos matemáticos como el SHRP (Superior Highway Research Program) y LTPP (Long-Term Pavement Performance) con factores de confiabilidad del 50% y 98% para ambos modelos, se analizará cuál modelo es el óptimo para las regiones de Cuzco y Puno, y dando como resultado un Grado de Desempeño (PG) para cada distrito de ambas regiones de estudio, y se asignó un color para los diferentes valores del Grado de Desempeño (PG), esto se plasmó en un mapa donde se identificó por colores cada distrito con su Grado de Desempeño (PG). Por último, se realizó la corrección por tráfico y velocidad del Grado de Desempeño (PG) para una carretera específica en las regiones de Cuzco y Puno respectivamente.

Palabras Claves: Grado de Desempeño (PG), mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG), metodología SUPERPAVE, cemento asfáltico.

ABSTRACT

In the present investigation entitled "Zoning map by Performance Grade (PG) for asphalt cements according to the SUPERPAVE classification", the study was developed to establish a zoning map by Performance Grade (PG) for the selection of the type of asphalt cement., as specified by the SUPERPAVE methodology, for the Cuzco and Puno regions, considering how climatic factors directly affect the pavement conditions in the country. To achieve this, a climatological analysis of the districts of the Cuzco and Puno regions was carried out, based on the daily climatological data of maximum and minimum temperature in a period of 20 years provided by the MERRA-2 project (NASA) in the districts. of the study regions, proceeding with the calculation of the Grade of Performance (PG) values, using mathematical models such as SHRP (Superior Highway Research Program) and LTPP (Long-Term Pavement Performance) with reliability factors of 50% and 98% for both models, it will be analyzed which model is the optimal for the regions of Cuzco and Puno, and resulting in a Performance Degree (PG) for each district of both study regions, and a color was assigned for the different Performance Grade (PG) values, this was reflected on a map where each district was identified by colors with its Performance Grade (PG). Finally, the performance grade (PG) correction for traffic and speed was made for a specific highway in the regions of Cuzco and Puno, respectively.

Key Words: Performance Grade (PG), zoning map (PG), SUPERPAVE methodology, asphalt cement.

INTRODUCCION

Actualmente en el Perú, la clasificación del cemento asfáltico se determina por el grado de penetración y viscosidad, esta clasificación da una aproximación del comportamiento del cemento asfáltico en función de su consistencia, más no sus propiedades reológicas. Las propiedades reológicas del cemento asfáltico son cruciales para comprender sus propiedades mecánicas ya que describen y caracterizan las propiedades viscoelásticas del asfalto en función de la temperatura y el tiempo de carga.

Al clasificar el cemento asfáltico por grado de penetración y viscosidad, un factor desconocido es saber cómo afecta la temperatura al cemento asfáltico. Por esta razón, los pavimentos de asfalto en la mayor parte del Perú experimentarán deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento por contracción térmica. Esto sucede a menudo porque de acuerdo con la clasificación de Thornthwaite, tenemos 38 tipos de climas y, los pavimentos experimentarán altos gradientes térmicos durante su vida útil.

Ante esta situación, es necesario implementar un sistema para determinar plenamente los requisitos mínimos del cemento asfáltico en cuanto a sus propiedades reológicas y exposición a la temperatura durante su vida útil. Así nació la idea de implementar la especificación SUPERPAVE, que clasifica al cemento asfáltico por su grado de desempeño (PG), dentro de un rango de temperaturas donde el pavimento tendrá suficientes propiedades físicas para asegurar un buen comportamiento frente a las formas de falla relacionadas con la calidad del cemento asfáltico. Por tanto, es importante determinar las temperaturas extremas que soportará el pavimento asfáltico en función de su ubicación geográfica.

A continuación, se presentan una breve descripción de cada capítulo desarrollado en esta investigación:

CAPÍTULO I: Se desarrolla el planteamiento del problema, en la cual se describe la realidad problemática, se presenta el problema general y específicos, además de la delimitación, importancia y justificación de la investigación

CAPÍTULO II: Se desarrolla los antecedentes de la investigación, se presentarán las investigaciones nacionales e internacionales relacionadas con nuestro tema de

investigación, las bases teóricas de las variables de estudio, y se muestran las definiciones de términos básicos.

CAPÍTULO III: Se presenta la hipótesis general e hipótesis específicas y se desarrollan las variables involucradas en la investigación.

CAPÍTULO IV: Se desarrolló la metodología de la investigación incluidos tipos y métodos de la investigación, la población de estudio y el diseño muestral de la investigación, el diseño muestral, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, además las técnicas de procesamiento y análisis de datos.

CAPÍTULO V: Se presenta el desarrollo de la investigación presentando los datos meteorológicos obtenidos con el proyecto MERRA-2 dando como resultados las temperaturas máximas y mínimas de un periodo de 20 años, así como los resultados y análisis de la aplicación de los modelos matemáticos SHRP y LTPP para una confiabilidad del 50% y 98%, obteniendo los grados de desempeño (PG) de los distritos de las regiones de Puno y Cuzco, para posteriormente analizar y establecer los mapas de zonificación por grado de desempeño (PG) para las regiones de estudio.

Por último, se desarrolla las conclusiones analizando los resultados obtenidos, así como las recomendaciones, las referencias bibliográficas y el anexo con la data obtenida del proyecto MERRA-2 con las temperaturas máximas y mínimas registradas en el día durante un periodo de 20 años.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema general y específico

El diseño inadecuado del paquete de estructural de asfalto conduce a accidentes de tráfico, daño al parque del automotor y mayores costos de mantenimiento y reparación de los pavimentos. Además, lo grave es que, debido a la falta de presupuesto, la pista y las carreteras están en malas condiciones durante mucho tiempo y esto afecta directamente a los vehículos que circulan por dichas vías. además, la red vial y el tráfico en todo el territorio del Perú se encuentran cada vez más saturada, las condiciones para el transito son cada vez más perjudiciales.

El SENAMHI (2020) refiere que, según la clasificación climática de Warren Thornthwaite el Perú tiene 38 tipos de clima, debido a la interacción de diferentes factores climáticos que lo afectan y su ubicación geográfica en el trópico, está provisto de una geografía complicada a los Andes. En el clima más amplio, tenemos un clima costero seco y templado, con zonas de sierra lluviosas y frías y zonas de selva lluviosas y cálidas. En las regiones de Puno y Cuzco presentan condiciones climáticas extremas, existe una alta gradiente de temperaturas, debido a su ubicación geográfica que presenta grades cambios de altura sobre el nivel del mar, además de tener zonas de sierra y selva.

Los hechos han demostrado que la durabilidad del pavimento asfáltico se ve directamente afectada por el clima de la zona. Además, también se deben considerar otros parámetros, como la magnitud y frecuencia de la carga del tráfico, las características de los materiales que lo constituyen, las características la sub - rasante, la humedad, el proceso constructivo, etc. (Huamán, 2016).

Las limitaciones de los métodos empíricos para reducir los problemas de mantenimiento llevan a la necesidad de desarrollar métodos más razonables. Estados Unidos, utilizo anteriormente sistemas similares al nuestro para seleccionar el tipo de cemento asfaltico, y financió una investigación realizada a través del Programa Estratégico de Investigación en Carreteras SHRP, que se llevó a cabo entre 1987 y 1993 a un costo de aproximadamente de \$ 150.000.000, su propósito principal es establecer un nuevo sistema para ayudar a predecir mejor el desempeño de los pavimentos a lo largo de su vida útil.

El motivo de este nuevo sistema es crear un Grado de Desempeño (PG) que permita la selección de ligantes asfálticos para asegurar un rendimiento suficiente para evitar deformaciones o grietas por gradientes de temperatura o fatiga en condiciones de trabajo, simulando un envejecimiento a corto y largo plazo. Un método que hoy no es común en el Perú (Alcalá & Delgado, 2020). Esta metodología analiza la vida útil del pavimento desde su elaboración en la planta de refinería, cuando este puesto en obra más conocido como el año 0 y durante su etapa final de vida útil.

Por las razones anteriores, es necesario actualizar el método de selección del tipo cemento asfáltico y utilizar un nuevo método que se viene utilizando desde hace muchos años por los resultados favorables que aportan a un mejor diseño y una mejor durabilidad de la mezcla asfáltica, como es el uso del mapa de zonificación por grados de desempeño (PG) para la selección del cemento asfáltico más adecuado en las regiones de Cuzco y Puno que nos permitirá seleccionar en cualquier punto de ambas regiones el cemento asfáltico que cumpla los requerimientos exigidos, para que existan mejores parámetros para responder a la situación actual donde el pavimento desarrollara su vida útil.⁷

1.1.1. Problema general

¿Es posible establecer un mapa de zonificación por grado de desempeño (PG), con la base de datos climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA), para seleccionar el tipo de cemento asfáltico de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cusco y Puno?

1.1.2. Problemas específicos

1. ¿Cuáles son los grados de desempeño (PG) al aplicar los modelos matemáticos LTPP y SHRP para la elaboración del mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE de las regiones de Cuzco y Puno?
2. ¿Cómo realizar la delimitación del área de influencia de los grados de desempeño (PG) para graficar un mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE de las regiones de Cuzco y Puno?

3. ¿En qué medida las correcciones por tráfico y velocidad modifican el grado de desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico en las carreteras de las regiones de Cuzco y Puno?

1.2. Objetivo general y específico

1.2.1. Objetivo general

Establecer un mapa de zonificación por grados de desempeño (PG), con la base de datos climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA), para seleccionar el tipo de cemento asfáltico de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno, año 2021.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Calcular los grados de desempeño (PG) aplicando los modelos matemáticos SHRP y LTPP para la elaboración del mapa de zonificación por grados de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno.
2. Delimitar el área de influencia de los grados de desempeño (PG) para graficar un mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno.
3. Aplicar las correcciones por tráfico y velocidad del grado de desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico en las carreteras de las regiones de Puno y Cuzco.

1.3. Delimitación de la investigación: temporal, espacial y temática

Esta investigación presenta limitaciones referidas a tesis o trabajos de investigación nacionales debido a que la tecnología SUPERPAVE para la selección de cementos asfálticos para la elaboración de la carpeta asfáltica no es muy usada en el Perú debido a que aún se siguen clasificando mediante ensayos de penetración y viscosidad, no se encontró material referente al tema.

Esta investigación está limitada a los datos climatológicos aportados por el proyecto MERRA-2 (NASA), debido a que las estaciones meteorológicas del SENAMHI y la ANA proporcionan datos climatológicos incompletos y no cumplen con las especificaciones de la tecnología SUPERPAVE, que como requisito mínimo exige

la data de las temperaturas máximas y mínimas durante el día registras en un periodo mínimo de 20 años.

Esta investigación está condicionada por la pandemia producida por el COVID-19, que nos limita a permanecer en casa para la realización de la investigación

1.4. Importancia y justificación del estudio

1.4.1. Importancia del estudio

La importancia del estudio radica en reducir los deterioros que sufren los pavimentos asfálticos en las regiones de Cuzco y Puno. Los gradientes térmicos generados por las bajas temperaturas y altas temperaturas en Cuzco y Puno requieren el uso del cemento asfáltico correcto, por lo que, en climas de baja temperatura, la carpeta asfáltica no se rigidice y empiecen a formarse fisuras por contracción térmica, concluyendo en la destrucción total del pavimento y a altas temperaturas, en el pavimento asfáltico no se generen deformaciones permanentes y puedan soportar las cargas de tráfico existentes.

1.4.2. Justificación del estudio

La justificación de esta investigación radica en que aún en el Perú se usan métodos obsoletos y arcaicos para la determinación del tipo de cemento asfáltico como son los ensayos de penetración y viscosidad, que están demostrados que no identifican las propiedades necesarias para que el pavimento desarrolle su vida útil de manera óptima, a diferencia de otros países que han optado por el sistema SUPERPAVE que determina el tipo de cemento asfáltico para los distintos gradientes térmicos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio de investigación

El cemento asfáltico, proveniente de la destilación del petróleo, ha sido constantemente sometido a numerosos análisis para poder determinar su comportamiento. Han existido diversos métodos de diseño de mezclas, como los métodos Marshall y el Método Hveem. Los 2 métodos fueron muy utilizados para el diseño de mezclas asfálticas, tanto en carreteras como en aeropuertos, sobre todo el método Marshall, así lo refiere Minaya y Huamán (2003), en el cual mencionan que el método Marshall se usó cerca al 75% de los Departamentos de Transporte de los Estados Unidos y por las FFAA para el diseño aeropuertos.

Este método fue creado por Bruce Marshall en el año de 1939 y luego fue modificado por el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU. Este método se basaba en la elección de una cantidad adecuada de cemento asfáltico en la mezcla y la relación de vacíos de agregados. Se seleccionaba una cierta cantidad de cemento asfáltico y granular, se procedía al mezclado y era compactado mediante golpes, los cuales variaban de acuerdo al tráfico solicitado. Esta muestra compactada era puesta en la prensa Marshall, donde se media la carga y la deformación en la cual la muestra se rompiera. Pero básicamente era un análisis volumétrico de la mezcla, un análisis donde lo que se hallaba eran parámetros de estabilidad y fluencia. Acerca de esto, Minaya y Huamán (2003) mencionan que el método Marshall si es adecuado para analizar la densidad y el contenido de vacíos, sin embargo, señalan que una de las desventajas del método es la compactación, ya que esta no simula las cargas de tráfico y, sobre todo, lo más desfavorable del método Marshall es la incapacidad de evaluar el comportamiento del asfalto a climas extremos.

Luego, entre los años de 1987 y 1993 se inició el SHRP (Strategic Highway Research Program) fue un ambicioso programa de investigación con un presupuesto de 50 millones de dólares y liderado por la FHA (Federal Highway Administration) en donde se buscaba obtener nuevos parámetros de caracterización del cemento asfáltico y agregado. El resultado de este programa fue el diseño de mezclas SUPERPAVE, cuyas bases fundamentales según SHRP (1994), eran cumplir los siguientes objetivos:

- a) Cemento asfáltico mayor durabilidad

- b) Suficientes vacíos en el agregado mineral y en la mezcla asfáltica en su conjunto.
- c) Una mezcla asfáltica suficientemente trabajable.
- d) Características satisfactorias en el desempeño de la mezcla asfáltica durante su vida útil.

Antes de la creación del método SUPERPAVE, la clasificación de cemento asfáltico se basada en dos ensayos, el ensayo de penetración y el ensayo de viscosidad.

El ensayo de penetración es un método de clasificación empírica del cemento asfáltico. Según Corredor (2004), este ensayo permite determinar la dureza o consistencia del cemento asfáltico. Este ensayo mide la distancia en la que una aguja con medidas de longitud y peso normalizadas, penetra una muestra de cemento asfáltico en determinado tiempo y temperatura. El procedimiento consiste en colocar una muestra de cemento asfáltico en un recipiente con medidas normalizadas hasta alcanzar una temperatura de 25°C, luego se deja caer una aguja (con un peso en conjunto de pesa, aguja y vástago de 100 gramos) en la muestra durante 5 segundos. La unidad de medida del valor de la penetración es en decimas de milímetro (0.1 mm). Un cemento asfáltico blando va a presentar un mayor valor de penetración, mientras que un cemento asfáltico más rígido va a tener un menor valor de penetración. Este ensayo esta normalizado por la ASTM D-946



Figura N° 1: Muestra de cemento asfáltico en recipiente cilíndrico.

Fuente: Universidad de Frontera (2015)



Figura N° 2: Ensayo de penetración.

Fuente: Universidad de la Frontera (2015)

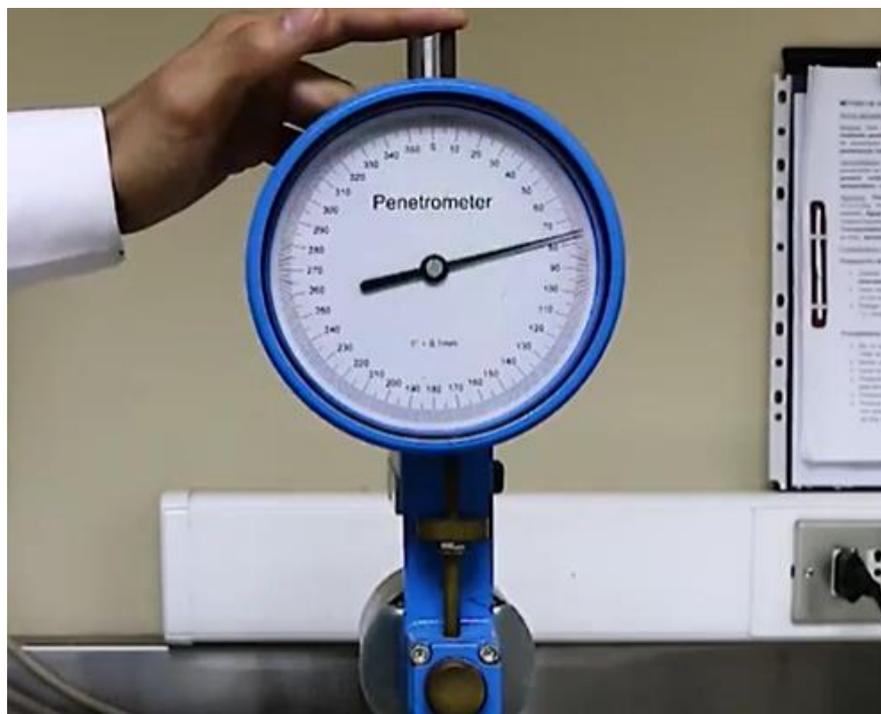


Figura N° 3: Medición del valor de penetración.

Fuente: Universidad de la Frontera (2015)

Para el ensayo de viscosidad absoluta nos permite ver que tan fluida es el cemento asfáltico, este realiza para 2 temperaturas importantes del cemento asfáltico, los cuales son de 60°C y 135°C. De acuerdo con Corredor (2004), la temperatura de 60°C es la máxima temperatura a la cual estará expuesto el pavimento asfáltico durante su tiempo de servicio y la temperatura del 135°C es la temperatura de mezclado del cemento asfáltico con los materiales granulares. El ensayo de viscosidad absoluta esta normalizado por el ASTM D3381, para el caso la medición de la viscosidad a 60°C, este se realiza en un viscosímetro de tubo capilar, en donde se calcula la velocidad de flujo del cemento asfáltico. Se puede encontrar dos tipos de tubos:

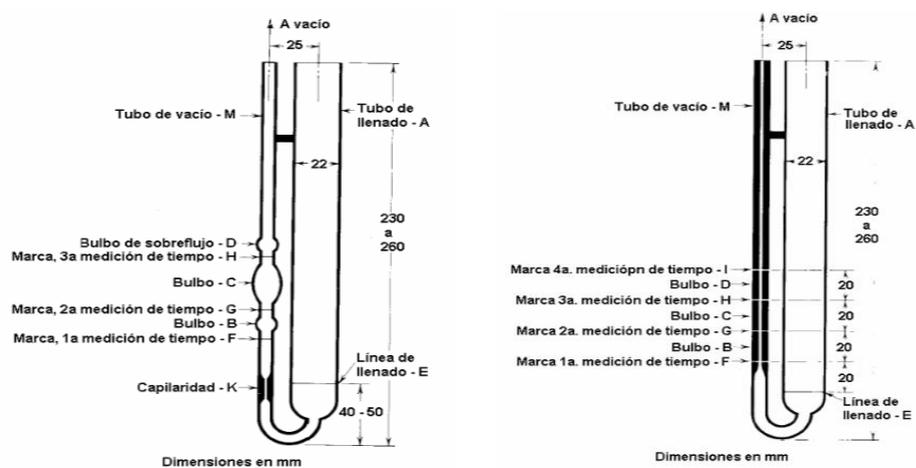


Figura N° 4: Viscosímetro capilar Canon Manning y del Instituto del Asfalto

Fuente: Corredor (2004)

2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1. Investigaciones internacionales

Miranda (2015) expreso en su trabajo de graduación titulada:

“Determinación del tipo de cemento asfáltico según el Grado de Desempeño para el diseño de la carpeta de rodadura, de acuerdo a la clasificación climática del país de Guatemala” de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El objetivo general de su investigación fue:

- Definir los tipos de cemento asfáltico, según la clasificación por grado de desempeño, de acuerdo a la zonificación climática asociada con la temperatura del pavimento, que serían apropiados utilizar en cada región del

país, tanto en la producción de la mezcla como para labores de conservación vial.

Los objetivos específicos de su investigación fueron:

- Realizar un mapa del país donde se especifique la zonificación y el grado de desempeño requerido para el cemento asfáltico, según las temperaturas máximas y mínimas de pavimento.
- Utilizando el grado de desempeño y las consideraciones de las temperaturas mínimas e intermedias del pavimento, determinar el cemento asfáltico según clasificación.
- Determinar ecuaciones para calcular la temperatura del pavimento en función de la temperatura ambiente, brillo solar, entre otros, que mejor se ajusten a las condiciones del país.
- Proporcionar un trabajo de investigación donde se establezcan los parámetros de grado de desempeño de cemento asfáltico para las diferentes regiones de Guatemala.

Las conclusiones a las que se llegaron con su investigación, resultan en que el modelo matemático LTPP es menos conservador que el modelo matemático SHRP, existe una mayor precisión con el modelo matemático SHRP ya que se aproxima más a la máxima temperatura del pavimento. Luego, de acuerdo a su investigación, basados en un análisis del clima de Guatemala, se pueden usar 2 tipos de cementos asfálticos, los cuales son: PG 58 – 34 y PG 64 – 34. El investigador señala un aspecto importante en su estudio, el cual fue la ausencia de climas menores a 5°C, el cual impide recomendar una clasificación para temperaturas bajas.

La tesis presentada se relaciona con nuestra tesis, ya que se realiza una recopilación de las temperaturas de Guatemala para poder predecir la temperatura máxima del pavimento aplicando los modelos matemáticos del SHRP y LTPP. Resalta además la importancia de seleccionar un modelo adecuado para la zona de estudio. Es importante diferenciar un modelo adecuado que represente con mayor precisión las temperaturas a las que va estar sometido el pavimento asfáltico.

Lutfi (2008) expresó en su maestría titulada:

“Aplicación del sistema SUPERPAVE para ligantes basados en condiciones locales” por la Universidad Nacional An-Najah.

El objetivo general de la investigación fue:

Ayudar a la introducción de los principios de la metodología SUPERPAVE para la elección de los ligantes asfálticos que deberían usarse en Cisjordania.

Las conclusiones a las que se llegaron fueron que, en la mayoría de las regiones de Cisjordania, el Grado de Desempeño (PG) con mayor influencia fue el PG 64-10 con excepción de la región de Jericó, donde se llegó a un PG 70-10, siendo esta región la más crítica debido a que presenta el clima más cálido. Se menciona además que no se encontraron los datos necesarios como menciona el método SUPERPAVE, respecto a la recolección de datos meteorológicos. En algunos casos se encontraron datos de estaciones meteorológicas de 10 años y en otros casos de 7 años.

Gahsaw (2018) expresó en su maestría titulada:

“Mapa de temperatura de Ethiopia para la clasificación por Grado de Desempeño para ligantes” en la Universidad Addis Ababa.

El objetivo general de la investigación fue:

Establecer el proceso de selección del ligante asfáltico, teniendo en consideración la variación climática de Ethiopia para reducir las fallas relacionadas con la temperatura.

Los objetivos específicos fueron:

- Establecer un mapa de temperaturas PG en base a datos climáticos
- Realizar una evaluación de los ligantes asfálticos disponibles, usando la tecnología SUPERPAVE.

Las conclusiones a las que se llegó con la investigación fueron:

El mapa de Grado de Desempeño de Ethiopia fueron divididas en 5 áreas. La mayoría de las áreas etíopes están representadas por el Grado de Desempeño (PG) de PG 58-YY y PG 64-YY para cargas de tráfico estándar.

- De acuerdo con la Corporación de Obras Viales de Ethiopia, recomiendan usar un ligante asfáltico clasificado como PEN 40/50 por su buena rigidez y rendimiento, pero cuando se realizó la evaluación a este ligante asfáltico de acuerdo a los criterios AASHTO M-320, se halló que el Grado de Desempeño del ligante asfáltico y el ensayo MSCR, no cumplió con los criterios mínimos y se clasificó como un PG 64-YY. De acuerdo a los ensayos MSCR, que mide la deformación no recuperable del cemento asfáltico, indica que el ligante PEN 40/50 debe usarse en la parte sureste y regiones suroeste de Ethiopia.
- Para las futuras carreteras en la región de Afar, especialmente en la zona oriental (PG 76-10), requieren una buena calidad del crudo de petróleo e inclusive un cemento asfáltico modificado.

Arteaga (2017) expuso en su tesis de pregrado titulada:

“Comparación de zonificaciones SUPERPAVE para Chile y cuantificación de la influencia del cambio climático en la selección del ligante asfáltico” de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Los objetivos de la investigación fueron:

- Realizar una zonificación SUPERPAVE de Chile, utilizando el modelo LTPP, el cual es implementado en el programa computacional LTPPBind 2.1
- Realizar una zonificación SUPERPAVE de Chile, utilizando un modelo basado en daño, el cual es implementado en el programa computacional LTPP 3.1
- Realizar una comparación entre los diferentes métodos de zonificación y unificar criterios para lograr una única zonificación SUPERPAVE de Chile.
- Determinar las zonas de Chile más afectadas por el cambio climático, en el ámbito de la elección del ligante asfáltico, mediante clasificación SUPERPAVE para 3 modelos de cálculo de Grado de Desempeño (SHRP, LTPP 2.1 y el basado en daño LTPP 3.1), todo lo anterior utilizando los escenarios futuros RCP 2.6 y RCP 8.5 (más optimista y más pesimista con

respecto a la disminución de emisión de gases invernadero, respectivamente).

Las conclusiones a las que se llegó fueron:

- Se lograron obtener zonificaciones SUPERPAVE para el territorio chileno utilizando dos nuevos modelos (LTPP 2.1 y LTPP 3.1) con un total de 94 estaciones, aplicando un método basado en la clasificación climática de Köppen y curvas de nivel.
- Las zonificaciones SUPERPAVE fueron realizadas, utilizando principalmente 3 ligantes asfálticos (PG 64-22, PG 58-22, PG 52-34).
- De acuerdo a los resultados, el modelo LTPP 2.1 para el cálculo del grado de baja temperatura, resulta menos conservador que el modelo original SHRP, ya que asigna grados de desempeño mayores para una misma estación.
- El modelo basado en daño (LTPP 3.1), recomienda ligantes asfálticos en el supuesto de que la falla de ahuellamiento ocurre por un daño acumulado en el tiempo, el cual es provocado por las temperaturas máximas diarias de los 6 meses más calurosos del año.
- Los ligantes seleccionados, utilizando las fórmulas LTPP 2.1, no son del todo aplicables a los grados de desempeño obtenidos por Segovia (2015) con el método SHRP, lo anterior debido a que en 9 estaciones los ligantes no cumplirían algunos de los 3 requisitos (temperatura intermedia, alta y baja temperatura).
- El calentamiento global en el que el planeta se ve inmerso por la emisión desproporcionada de gases de efecto invernadero, produce un aumento de las temperaturas de los pavimentos asfálticos, lo cual afecta el diseño del pavimento asfáltico.
- La gran diferencia que provoca el cambio climático en los mapas de zonificación, es la inclusión de un nuevo ligante asfáltico, el cual es el PG 70-16, ya que al aumentar la temperatura del aire también ocurre lo mismo con la del pavimento, ante esto la metodología requiere un ligante que posea un mejor desempeño para las altas temperaturas.

- El modelo más afectado por el cambio climático resulta ser el basado en daño LTPP 3.1, ya que para el escenario futuro RCP 8.5, presenta un aumento en los grados PG para un 39% de las estaciones.
- Considerando los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, las zonas naturales de Chile más afectadas por el cambio climático serían el Norte Chico y Norte Grande, respectivamente.

Bonilla (2013) expresó en su proyecto de graduación titulado:

“Determinación del tipo de cemento asfáltico según el Grado de Desempeño, de acuerdo con la clasificación climática y las cargas de tráfico del país” de la Universidad de Costa Rica.

La investigación tiene como objetivo general:

- Determinar los tipos de cemento asfálticos requeridos, según la clasificación por Grado de Desempeño, que serían recomendables usar en nuestro país en la producción de mezclas asfáltica en caliente, según la clasificación climática asociada con la temperatura del pavimento y las demandas de cargas de tráfico.

Presenta los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar y analizar la información relacionada a la temperatura del aire, características del tránsito (carga, cantidad y distribución), pendiente del terreno, desarrollos urbanos, zonas de población, entre otros, con el fin de poder crear una base de datos que permitan la generación de mapas que identifiquen el tipo de asfalto según el Grado de Desempeño.
- Aplicar ecuaciones para determinar la temperatura del pavimento en función de la temperatura ambiente, espesor del pavimento, localización geográfica, entre otros, a diferentes niveles de confianza.
- Definir una metodología basada en la relación de la temperatura (aire o pavimento) con la altitud, que permita la generación de mapas de temperatura del pavimento del país utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG).
- Generar mapas de zonificación del país que identifique el tipo de cemento asfáltico según el Grado de Desempeño requerido para las temperaturas

máximas, intermedias y mínimas del pavimento en diferentes niveles de confiabilidad.

- Proponer una metodología para valorar las características de las principales rutas nacionales primarias y secundarias, con respecto a las cargas, cantidad y distribución de tránsito, velocidad promedio de operación y su pendiente.
- Generar un mapa de zonificación que identifique el Grado de Desempeño requerido para el cemento asfáltico, considerando las rutas nacionales primarias y secundarias, involucrando las temperaturas del pavimento y las solicitaciones de cargas de tránsito.
- Investigar si en Costa Rica se puede suplir distintos tipos de cemento asfáltico a escala industrial, según los Grados de Desempeño establecidos según la clasificación climáticas y cargas del pavimento.
- Establecer si el cemento asfáltico que se vende en Costa Rica es apto para las condiciones de temperatura y cargas de tránsito de las rutas nacionales primarias y secundarias de la Red Vial Nacional pavimentada y si el mismo puede ser modificado en las instalaciones de producción de mezcla asfáltica en caliente.
- Indagar sobre la oferta actual de los ensayos de laboratorio para clasificar el cemento asfáltico a utilizar en nuestro país, así como su viabilidad para ser modificada, variando el tipo de clasificación de grado de viscosidad a Grado de Desempeño.
- Investigar sobre la oferta actual de los ensayos de laboratorio para clasificar el cemento asfáltico por Grado de Desempeño, considerando los organismos de ensayo del Sector Vial de nuestro país.
- Investigar si la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) puede suplir más de un tipo de cemento asfáltico, para lo cual se debe investigar sobre la capacidad de almacenamiento de varios tipos de cemento asfáltico, así como la capacidad de mantenerlos a la temperatura requerida.
- Investigar la posibilidad de modificar el cemento asfáltico con la incorporación de polímeros tipos SBR y SBS en los tanques de

almacenamiento con que cuentan las plantas de producción de mezcla asfáltica en caliente.

Las conclusiones que se obtuvieron se pueden resumir en que el mapa creado se establece en base a 3 zonas: Pacífico, Caribe y central, se establece un PG de 64-28 para zonas de bajo volumen de tránsito, un PG 70-28 para volúmenes medio de tránsito y para condiciones de alto volumen de tráfico, se estableció un PG 76-28. Se menciona también que el modelo LTPP es menos conservador que el modelo SHRP.

Aenlle (2020). en su artículo de investigación titulado:

“Determinación y zonificación del Grado de Desempeño de los asfaltos para Cuba según la metodología SUPERPAVE” publicado por la Universidad del Norte, se realizó un mapa de zonificación por Grado de Desempeño para Cuba, basados en los modelos matemáticos del SHRP y LTPP. Se realiza una breve reseña de los métodos empíricos de clasificación del cemento asfálticos como son los ensayos de penetración y viscosidad. Basados en la incertidumbre que generan estos ensayos, nace la metodología SUPERPAVE como una nueva clasificación del cemento asfáltico. Se realiza una breve explicación del proceso de la elección de la temperatura máxima y mínima del ambiente para luego explicar los modelos matemáticos del SHRP 1, SHRP 2 (el último fue una actualización de la fórmula para datos de Canadá) y LTPP. Luego se aplican los modelos matemáticos, los cuales posteriormente se grafican para ver cual modelo presenta una mayor dispersión a diferentes confiabilidades. Luego se procedió a elaborar el mapa de zonificación, clasificando las estaciones de acuerdo a su Grado de Desempeño. De las conclusiones obtenidas en la investigación, se determinó que con una confiabilidad del 98%, el modelo matemático LTPP brinda una mayor seguridad y se obtiene valores de Grado de Desempeño más homogéneos.

2.2.2. Investigaciones nacionales

Alcalá y Delgado (2020). Expreso en su tesis de pregrado:

“Mapa de Grado de Desempeño (PG) para ligantes asfálticos según la clasificación SUPERPAVE, aplicado en las regiones de Lima, Ancash e Ica”

de la Universidad Ricardo Palma. El nivel de su investigación fue descriptivo. La población de su investigación fueron los datos climatológicos de las distintas regiones y departamentos del territorio peruano en los últimos 20 años. La técnica de recolección de datos fue la recolección histórica de los datos climatológicos de las zonas de Lima, Ancash e Ica, cuyo instrumento fue la ficha de datos en donde se recopilaban las temperaturas de los departamentos durante un periodo de 20 años.

El objetivo general de su investigación fue:

- Elaborar el Mapa de Grado de Desempeño (PG) con la base de datos de la ANA aplicando los modelos matemáticos del SHRP y LTPP para ligantes asfálticos según clasificación SUPERPAVE en las regiones de Lima, Ancash e Ica.

Los objetivos específicos de su investigación fueron:

- Identificar los componentes para calcular el Grado de Desempeño (PG) según clasificación SUPERPAVE en las regiones Lima, Ancash e Ica.
- Establecer las diferencias entre los valores de los modelos matemáticos existentes del Grado de Desempeño (PG) aplicados en las regiones Lima, Ancash e Ica.
- Aplicar las correcciones al Grado de Desempeño (PG) en función al tráfico y la velocidad en carreteras específicas de las regiones Lima, Ancash e Ica.

Las conclusiones que se obtuvieron con su investigación fue el logro de elaborar el Mapa por Grado de Desempeño (PG) según la clasificación SUPERPAVE, mediante la recopilación de datos meteorológicos de las estaciones de la ANA. Mencionan además que se logró encontrar una base de 37 estaciones meteorológicas, en donde se encontraron con datos incompletos, los cuales fueron completados con instrumentos estadísticos. Luego se menciona las diferencias entre los modelos matemáticos del SHRP y LTPP, señalando la evolución que ha habido desde el primer modelo SHRP en 1994, hasta el modelo LTPP en el 2004. Por último, se modificó el Grado de Desempeño (PG) ya que el tráfico en la zona era lento.

La presente tesis se tiene relación con nuestra investigación ya que expresa de una manera detallada el proceso de recolección de datos climatológicos, así como el proceso de aplicación de los modelos.

Ortiz (2020). expreso en su tesis de pregrado titulada:

“Análisis del clima para la predicción de Grados de Desempeño empleando el método SUPERPAVE en la carretera – tramo Chincha Alta – Huancavelica” de la Universidad San Martín de Porres. El nivel de su investigación fue descriptivo. La población de su investigación fueron todas las estaciones meteorológicas que se encuentren en la carretera PE-26 tramo Huancavelica-Chincha alta. Su método de muestreo fue No probabilístico, ya que la elección no dependió del investigador. Los instrumentos que uso fueron tablas de datos, los cuales fueron obtenidos de la base de datos del SENAHMI, NASA y fuentes alternas.

El objetivo general de su investigación fue:

- Realizar el análisis del clima para la predicción de grados de desempeño en la carretera PE - 26 del tramo Chincha Alta – Huancavelica, año 2020.

Los objetivos específicos de su investigación fueron:

- Analizar las temperaturas máximas para la predicción de grados de desempeño en la carretera PE – 26 del tramo Chincha Alta – Huancavelica, año 2020.
- Analizar las temperaturas mínimas para la predicción de grados de desempeño en la carretera PE – 26 del tramo Chincha Alta – Huancavelica, año 2020.
- Analizar los datos de SENAMHI para la predicción de grados de desempeño en la carretera PE – 26 del tramo Chincha Alta – Huancavelica, año 2020.

Las conclusiones que se obtuvieron con su investigación fueron principalmente relacionadas con los mapas de Grado de Desempeño realizado por el Ministerio de Transporte y al Universidad de Sao Paulo. El investigador realizó una comparación del mapa y los datos obtenidos por él. Se puede mencionar la corrección que se debe realizar al distrito de Huachos, puntualmente en la estación meteorológica de Huachos ya que varía de PG 52-

10 a un PG 58-16, lo que resulta en un aumento del Grado de Desempeño, de igual forma en Chíncha Baja en la estación Fonagro donde los resultados varían de un PG 58 – 10 a un PG 64 – 10, de la misma forma en los distritos de Pilpichaca.

La presente investigación tiene relación con nuestra tesis, ya que se calculan los Grados de Desempeño, aplicando los modelos matemáticos de SHRP y LTPP. Aparte se resalta el aporte del investigador a relacionar con los mapas elaborados por el Ministerio de Transportes y la Universidad de Sao Paulo.

2.3. Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio

2.3.1. Cemento asfáltico de petróleo (CAP)

De acuerdo con el Instituto del Asfalto (1982), el cemento asfáltico es un material de color negro, aglomerante, que cambia de consistencia de acuerdo a las condiciones ambientales a las que está expuesto. Cuando el cemento asfáltico está sometido a altas temperaturas, este se ablanda y se comporta como un fluido, envolviendo a todos los agregados durante la producción de la mezcla asfáltica. Además, el cemento asfáltico es un material impermeabilizante que ayuda a que el agua no afecte a los materiales granulares conformantes del paquete estructural y asimismo protege a la carpeta de rodadura de álcalis, ácido y sales.

Así también lo refiere, Sánchez D. (1987), el cual indica que el asfalto es un material oscuro con propiedades aglutinantes y formado principalmente de hidrocarburos. Es un material usado para obras ingenieriles por su alta capacidad cementante, es altamente adhesivo, con una gran durabilidad y es un material impermeabilizante.

2.3.2. Obtención del cemento asfáltico.

El cemento asfáltico se puede obtener de 2 formas: la primera es por medio de la refinación del crudo de petróleo y la segunda es obtener el cemento asfáltico de manera natural.

2.3.2.1. Obtención del cemento asfáltico por destilación del crudo de petróleo.

De acuerdo con Corredor (2004), para poder obtener el cemento asfáltico, se realiza al procesamiento del crudo de petróleo en una planta de refinación para poder separar diversas fracciones y el residuo que queda por la refinación es el cemento asfáltico. De igual forma The International Council on Clean Transportation (2011), menciona que la refinación del crudo de petróleo son un conjunto de procesos que permiten obtener diversos productos tales como el gas licuado de petróleo (GLP), combustible diésel, querosene, aceites lubricantes, residuo asfáltico, entre otros, ello mediante la separaciones del crudo de petróleo en diferentes fracciones, los cuales presentan un punto de ebullición y cantidad de carbonos únicos, luego mediante procedimientos químicos y físicos se logra obtener el producto terminado. En la siguiente tabla se muestra las temperaturas y cantidad de carbono para obtener cada producto terminado.

Tabla N° 1: Temperatura y cantidad de carbono para la obtención de productos terminados de la refinación del petróleo.

Producto	Cantidad de Carbono	Temperatura (°F)
Gas licuado de petróleo	C1 - C4	Menores a 60
Gasolina, Petroquímicos	C5 - C9	60 – 175
Combustibles para aviones	C10 – C16	175 – 350
Kerosene	C10 – C16	350 – 500
Aceite lubricante	C20 - C50	500 – 850
Cemento asfáltico	Mayores a C70	Mayores a 1050

Fuente: Mathpro (2011)

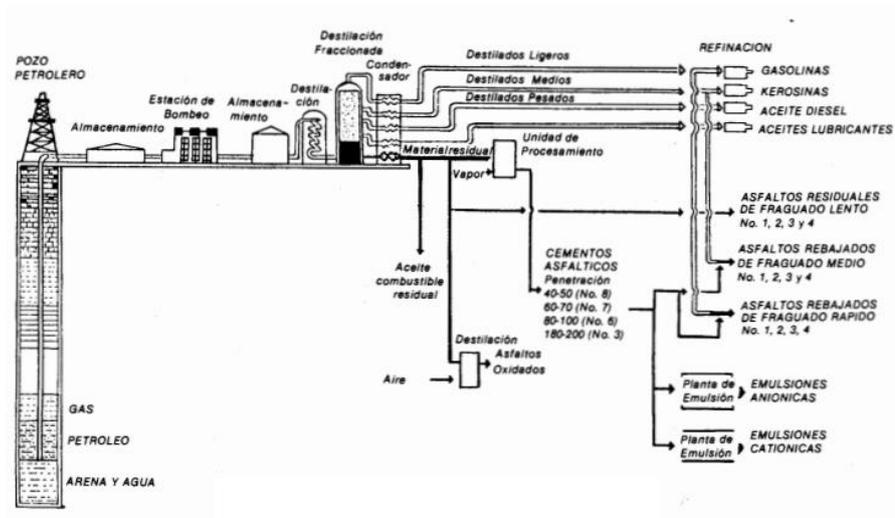


Figura N° 5: Esquema de proceso de refinación del crudo de petróleo y la obtención de diversos productos.

Fuente: Sánchez (2015)

2.3.2.2. Obtención del cemento asfáltico natural

Según Sánchez (1987), los cementos asfálticos pueden encontrarse de manera natural ya sea por:

Manantiales: Se encuentran en zonas aledañas donde fluye petróleo o cemento asfáltico, los cuales se tienen salidas por las fisuras de las rocas.

Lagos: Son similares a los manantiales, pero presentan un mayor caudal de cemento asfáltico, los cuales están ubicados en depresiones profundas. Un ejemplo de ello, es el Lago de la Brea, ubicado en Trinidad y Tobago, presenta una superficie de 0.47 km² y una profundidad de 80 metros. De igual en Venezuela se encuentra el lago de asfalto más grande del mundo ubicado en el estado de Sucre, el cual tiene una superficie de 420 hectáreas y una profundidad entre 1.5 y 3 metros.



Figura N° 6: Lago de La Brea en Trinidad y Tobago

Fuente: Wikipedia (2020).

Exudaciones: Estas se presentan en rocas porosas que están saturadas de cemento asfáltico, las cuales salen a brote cuando existen el clima cálido o cuando está sometido a presiones



Figura N° 7: Lago Guanoco en Venezuela.

Fuente: Chacín (2015)

2.3.3. Función y usos del cemento asfáltico

El cemento asfáltico como material conformante del paquete estructura del pavimento, tiene como función principal de la impermeabilizar la superficie, ello ha llevado a que se utilice en diferentes obras de ingeniería, entre las que podemos encontrar:

2.3.3.1. Cemento asfáltico en obras de pavimentación

El uso de cemento asfáltico en pavimentación está referido a los diferentes tipos de mezclas asfálticas que podemos colocar. Podemos mencionar el cemento asfáltico en mezclas asfálticas en caliente o las mezclas asfálticas en frío.

2.3.3.2. Cemento asfáltico en canales y presas

De acuerdo con Orozco Santoyo (2008), realiza un trabajo de investigación sobre el concreto asfáltico y su capacidad de ser usado como material impermeabilizante en canales y cortinas de presas que contengan agua o residuos mineros. Se realiza una cuantificación de la infiltración de agua en los distritos de Riego Río Colorado donde se construyeron estanques de prueba para canales con y sin revestimiento. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla N° 2: Valores de pérdida unitaria por infiltración

Tipo de material predominante	Perdida unitaria R (m/m/día)
Suelos muy impermeables:	
- Arcillas de alta plasticidad	0.02 0.05
- Arcillas compactadas de baja plasticidad	
Suelos impermeables:	
- Arcillas limosas de baja plasticidad	0.05 a 0.1
- Limos arcillosos de baja plasticidad	
Suelos Semi permeables	
- Limos arcillosos con intercalaciones de arenas limpias	0.10 a 0.20
Suelos permeables:	
- Arenas arcillosas, de sueltas a semi compactas	0.20 a 0.50
- Arenas limosas con intercalaciones de limos arcillosos	
Suelos muy permeables:	
- Arenas limosas, de muy sueltas a semi - compactas	0.50 a 0.80
- Arenas limpias mal graduadas	
Concretos:	
- Hidráulico	0.05 a 0.10
- Asfáltico	0.00001 a 0.000001

Fuente: Orozco (2008).

Para los estanques de prueba, como se puede apreciar en la tabla, el revestimiento con concreto asfáltico es muy bajo, aproximadamente de 0.00001 a 0.000001 m/m/día. Para la aplicación del concreto asfáltico como revestimiento, se realizó el revestimiento en el canal Independencia, la cual tuvo como finalidad que el concreto asfáltico logre la máxima impermeabilidad, durabilidad, estabilidad del talud, flexibilidad, resistencia a la erosión y economía.



Figura N° 8: Extendedora de concreto asfáltico.

Fuente: Motores y carreteras (2015)

2.3.4. Propiedades del cemento asfáltico

De acuerdo con Corredor (2004), podemos dividir las propiedades del cemento asfáltico en propiedades físicas y propiedades químicas del cemento asfáltico.

2.3.4.1. Propiedades físicas

Según Corredor (2004), existen 6 propiedades físicas del cemento asfáltico que son requeridas para fines ingenieriles, las cuales son:

- Consistencia: La consistencia se define como el grado de plasticidad o dureza del asfalto cuando está sometido a diferentes temperaturas. Esta propiedad es fundamental cuando se habla de cementos asfálticos, ya que, al ser un material termoplástico, es decir, es susceptible a variar de acuerdo a la variación de

temperaturas. Un cemento asfáltico sometido a temperaturas altas, va a comportarse como un fluido, por lo tanto, su consistencia será baja, mientras que, en temperaturas más frías, se comportará como un material más viscoso rígido susceptible a la fisuración.

- Durabilidad: La durabilidad es la capacidad que tiene el cemento asfáltico de conservar sus propiedades originales durante el proceso de creación de la mezcla asfáltica. Los procesos son el mezclado, transporte, colocación, compactación y puesta en servicio. Se puede tener una idea de esta propiedad con los ensayos, aunque es difícil tener datos exactos, ya que no solo depende del cemento asfáltico, sino también de los agregados y la condición ambiental de la zona.
- Adherencia: La adherencia es la capacidad que tiene el cemento asfáltico de envolverse y pegarse a los agregados cuando es calentado y mantenerse unidos durante el procesamiento de enfriamiento y efectos del tránsito.
- Cohesión: La cohesión es la propiedad que permite mantener unidos firmemente todos los agregados
- Pureza: La pureza en el cemento asfáltico se refiere a la cantidad de agua presente en el cemento asfáltico. Generalmente en el proceso de refinación del petróleo, el cemento asfáltico no presenta agua en su composición, pero esto puede variar e incrementar el contenido de agua cuando no se tiene un cuidado adecuado en el transporte.
- Gravedad específica: La gravedad específica es la relación de la masa del cemento asfáltico a una determinada temperatura con una masa de agua a una misma temperatura.

2.3.4.2. Propiedades químicas

Como menciona (Corredor, 2004) el cemento asfáltico se compone principalmente de tres tipos de agentes químicos: asfaltenos, resinas y aceites (aromáticos y saturados). El asfalteno contiene todos los

metales contenidos en el petróleo crudo: níquel, vanadio y hierro. Químicamente, los asfaltenos están compuestos de moléculas de carbono e hidrógeno (entre 80 y 87%), el porcentaje restante está formado por heteroátomos (azufre, nitrógeno y oxígeno). La proporción de asfalto puede variar según factores condiciones ambientales, como alta temperatura, luz solar, oxígeno, etc. Afectando así la vida útil del asfalto. (Miranda, 2015).



Figura N° 9: Composición química del asfalto

Fuente: Rogelio (2008)

2.3.5. Clasificación por Grado de Desempeño (PG)

El método SUPERPAVE presenta una nueva clasificación para cementos asfálticos, el cual toma en consideración factores como la temperatura que tendrá el pavimento, la velocidad, la carga, entre otros e incluye pruebas exhaustivas y procedimientos, nuevos sistemas de análisis y diseño de mezclas asfálticas, nuevos equipos y una serie de especificaciones en función del grado de desempeño del cemento asfáltico.

2.3.6. Sistema SUPERPAVE

El sistema de especificación SUPERPAVE por Grado de Desempeño (PG) para cementos asfálticos está diseñado para desempeñar dos objetivos primordiales: Mida las propiedades físicas del cemento asfáltico, estas

propiedades pueden estar relacionadas con los parámetros de rendimiento de campo para tres fallas críticas: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico. De acuerdo con la temperatura y los efectos del envejecimiento del cemento asfáltico durante el proceso de construcción y su vida útil, se caracterizan las características físicas del cemento asfáltico para aumentar la resistencia a la fatiga y la deformación permanente, teniendo en cuenta las diferentes condiciones que presenta el envejecimiento.

2.3.7. Ensayos de laboratorio SUPERPAVE para cementos asfálticos

2.3.7.1. Reómetro de corte dinámico (DSR)

Según McGennis (1994) el reómetro de corte dinámico es un instrumento es utilizado para determinar las propiedades visco-elásticas del cemento asfáltico. Mide los parámetros reológicos del asfalto, los cuales son el módulo complejo en corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). Para ello, se somete al cemento asfáltico a tensiones de corte oscilante. La muestra es colocada sobre 2 platos, uno estático y otro dinámico.

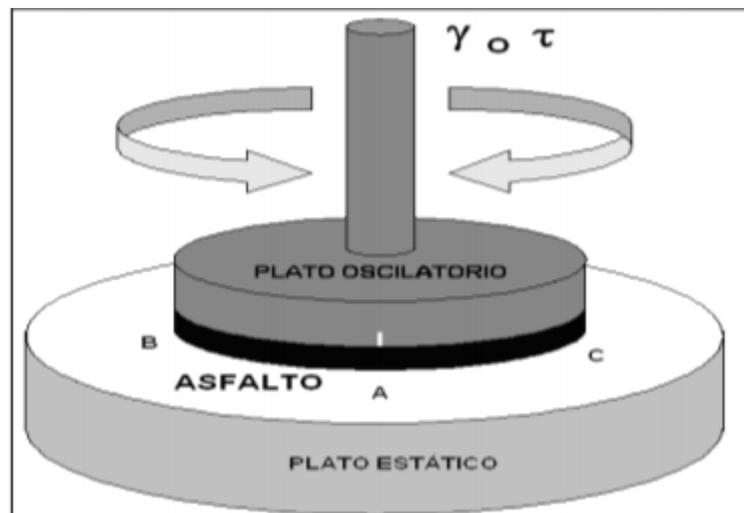


Figura N° 10: Reómetro de corte dinámico.

Fuente: Scielo (2015).

El reómetro aplica un patrón senoidal de tensiones sobre la muestra de cemento asfáltico, midiendo su deformación. Para muestras totalmente elásticas, no hay un retraso entre la tensión de corte y la

deformación de la muestra. Para muestras viscosas, la deformación está completamente desfasada de la tensión y su ángulo de fase es igual a 90° .

El cemento asfáltico al ser un materia viscoelástico, presenta un ángulo de entre 0° y 90° , dependiendo de la temperatura. Cuando se somete a altas temperaturas, el ángulo de fase se acerca a 90° y a bajas temperaturas, el ángulo de fase se acerca a 0° .

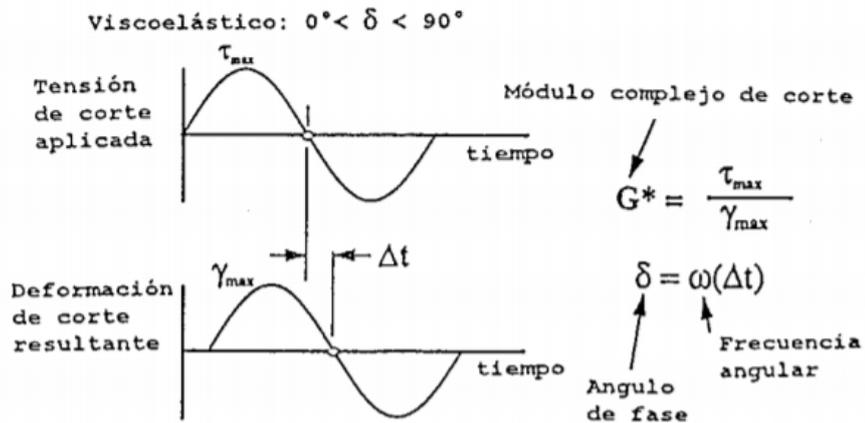


Figura N° 11: Módulo complejo dinámico y ángulo de fase.

Fuente: SUPERPAVE (2010).

Como se aprecia en la figura, al aplicar ciclos de carga a la muestra, se van a generar tensiones y deformaciones, para determinar el módulo complejo dinámico y ángulo de fase, tomamos las tensiones y deformaciones máximas. En ensayo esta normado por ASTM D7175-15.

2.3.7.2. Viscosímetro rotacional (VR)

Según dinámico (1994) mide la rigidez del cemento asfáltico a una temperatura de 135°C , esta temperatura es donde el cemento asfáltico se comporta como un fluido. Está formado por un cilindro coaxial, el cual mide la viscosidad por medio de un torque requerido para rotar un eje sumergido en cemento asfáltico caliente.

La especificación para el cemento asfáltico menciona que se requiere una viscosidad menor a 3 pa.s.

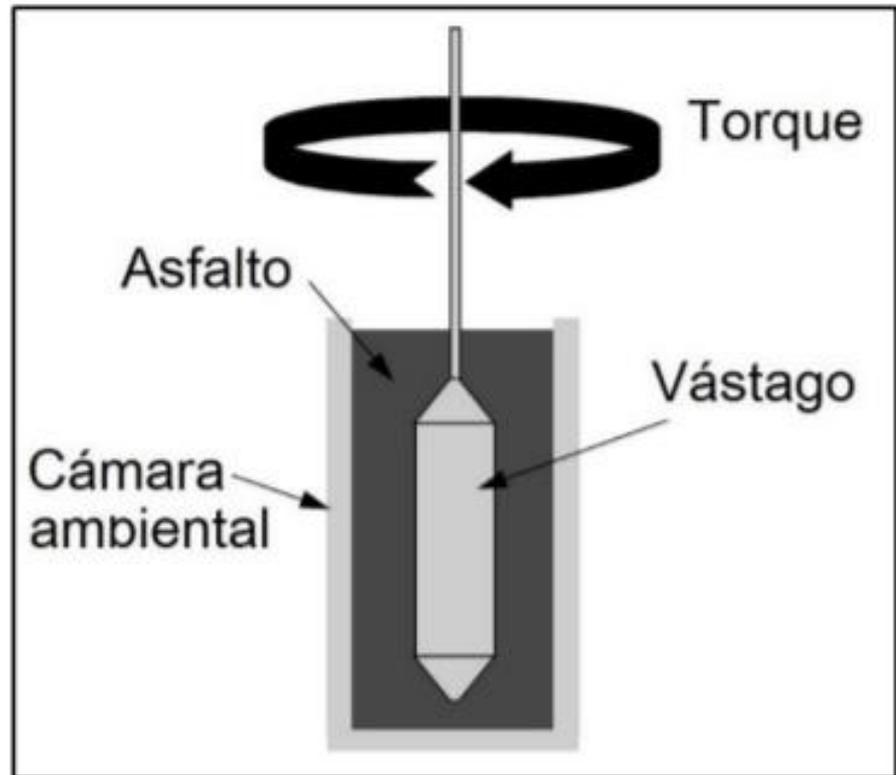


Figura N° 12: Elementos del viscosímetro rotacional

Fuente: SUPERPAVE (2010)

Según Zambrano (2017) el viscosímetro rotacional puede medir las propiedades de consistencia del cemento asfáltico, además se puede obtener un gráfico de temperatura vs viscosidad para luego hacer una estimación de la temperatura de mezclado y compactación. El ensayo esta normado por ASTM D4402M -15.

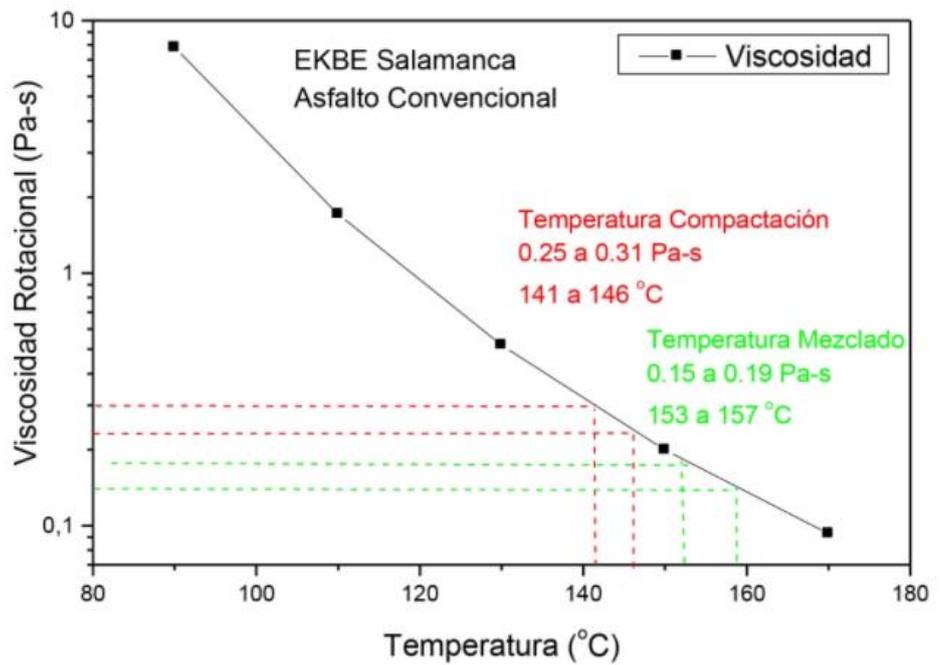


Figura N° 13: Grafico viscosidad vs temperatura.

Fuente: Zambrano (2017).

2.3.7.3. Reómetro de viga a flexión (BBR)

De acuerdo a Según Bulnes (2017), el reómetro de viga a flexión permite medir la rigidez en fluencia cuando es cemento asfáltico es sometido a una carga constante y a bajas temperaturas. Es aplicable solo a muestras con valores de rigidez en flexión entre 20 Mpa y 1Gpa y puede usarse con una muestra nuevo o envejecida.

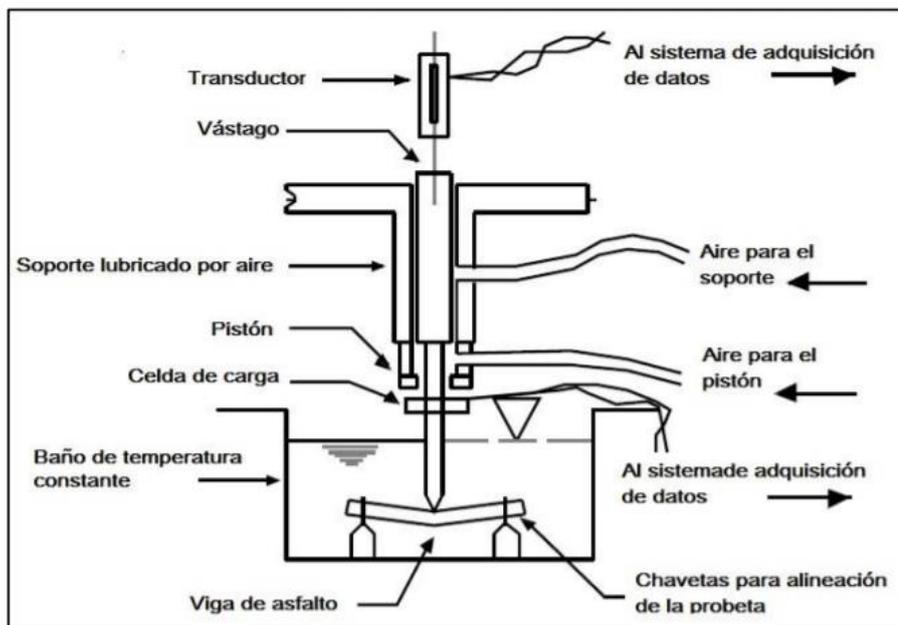


Figura N° 14: Partes del reómetro de viga a flexión.

Fuente: Bulnes (2017).



Figura N° 15: Molde de la viga.

Fuente: Bulnes (2017).

Para el cálculo de la rigidez por fluencia en flexión, debemos determinar la relación entre el máximo esfuerzo de tensión y la deformación máxima de la viga. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M(t) = (Q \times L^3) / (4 \times b \times h^3 \times \delta)$$

Donde:

$M(t)$ = Rigidez por fluencia en flexión

Q = Carga constante (N)

L = Distancia entre los apoyos (mm)

h = Espesor de la viga (mm)

δ = Deflexión de la viga (mm)

Para el cálculo de la deformación por fluencia, usamos la siguiente expresión:

$$D(t) = e / \sigma$$

Donde:

e = Deformación máxima de la viga (mm/mm)

σ = Máxima tensión en la viga (MPa)

Este ensayo esta normado por ASTM D6648-08.

2.3.7.4. Ensayo de tracción directa (DTT)

Los cementos asfálticos que se estiran en gran medida antes de fallar se denominan materiales dúctiles y cuando el cemento asfáltico no presenta una gran deformación cuando se estira se denominan materiales rígidos. Anteriormente se había analizado el comportamiento del cemento asfáltico a bajas temperaturas, los cuales mostraron una relación entre la rigidez de la muestra y la capacidad de deformarse de esta. En la gran mayoría, los cementos asfálticos más rígidos son frágiles y los menos rígidos son los más dúctiles. Esto fue desarrollado por la SHRP, el cual derivó en el ensayo de BBR, donde se mide la rigidez de la muestra. Según Bulnes C. (2017), el ensayo de BBR no permite caracterizar al cemento asfáltico cuando se alarga

hasta la rotura. Por ello, SHRP diseño un ensayo que permita medir la deformación del cemento asfáltico a bajas temperaturas. A esto se le denomina el ensayo de tracción directa.

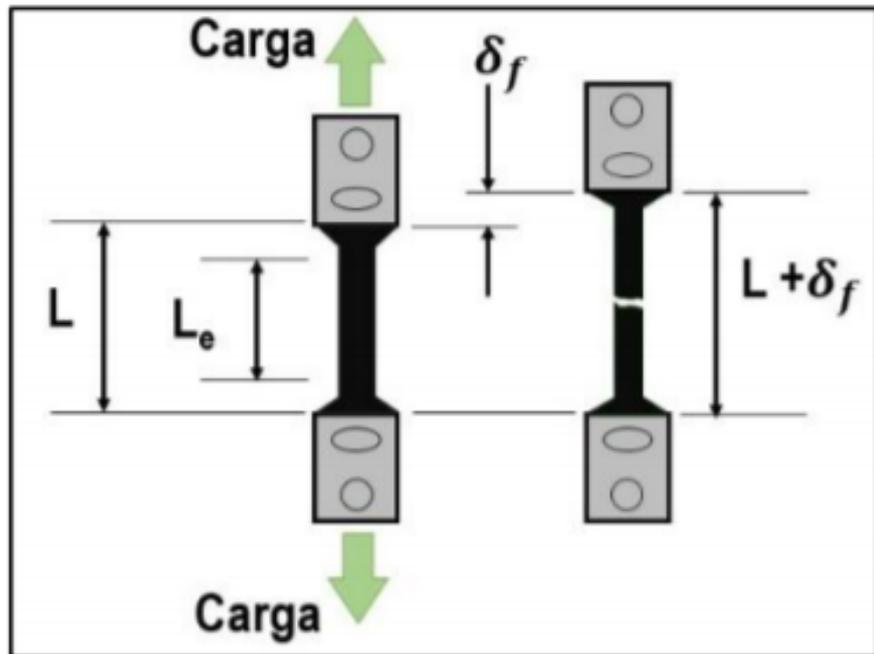


Figura N° 16: Deformación hasta la rotura

Fuente: Bulnes (2017)

La tensión de rotura es obtenida como:

$$\sigma_r = P_r / A$$

Donde:

σ_r = Tensión de falla (MPa)

P_r = Carga de rotura (N)

A = Área inicial de la sección transversal (m²)

La deformación de rotura es obtenida como:

$$\epsilon_r = \delta_r / L$$

Donde:

ϵ_r = Deformación de rotura (mm/mm)

δ_r = Elongación de rotura (mm/mm)

L = Longitud efectiva (mm)

2.3.7.5. Ensayo en estufa de película delgada (TFOT)

El ensayo TFOT permite determinar las temperaturas a las cuales el cemento asfáltico estará sometido durante el proceso de mezclado en la planta de asfalto. El cemento asfáltico se envejece tanto a corto plazo como a largo plazo, lo cual el presente ensayo ayuda a simular el deterioro a corto plazo, este es cuando se encuentra en el proceso de mezclado, transporte y colocación de la mezcla asfáltica. (Corredor, 2004).

El ensayo consiste en colocar una muestra de 50 gr en un plato circular de 13.97 cm de diámetro, de tal manera que el espesor de la muestra sea de 3 mm. Luego se coloca el plato con la muestra al equipo, el cual va a girar y debe estar a una temperatura constante de 163 °C durante 5 horas, el cual representa la temperatura de mezclado de la mezcla asfáltica con los agregados. Luego se retira la muestra envejecida y se somete la muestra a los ensayos correspondientes. Este ensayo está normalizado por ASTM D-1754.

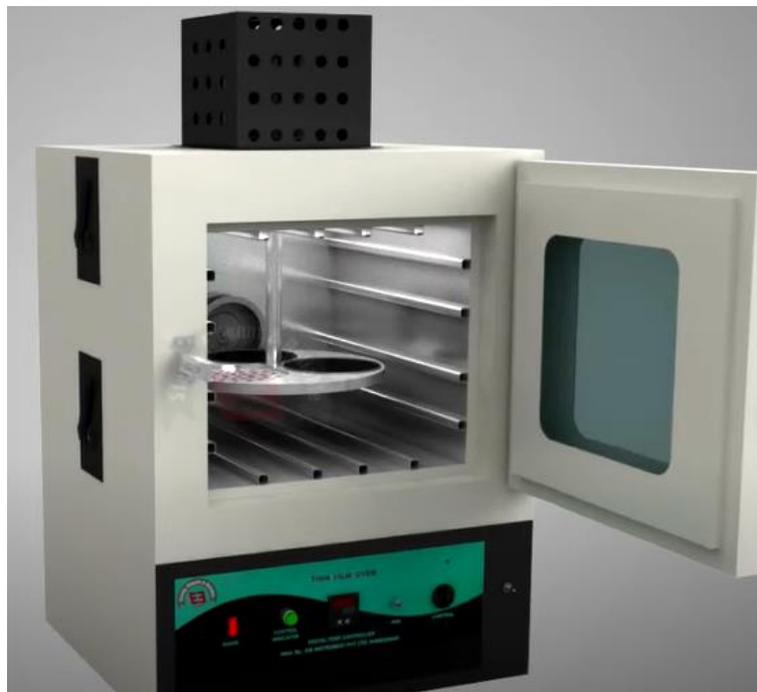


Figura N° 17: Muestras en la estufa precalentada a 163 °C.

Fuente: Instruments PVT (2014).

2.3.7.6. Ensayo de película delgada en horno rotatorio (TFROT)

Se acuerdo con Corredor (2004), el ensayo de película delgada en horno rotatorio es un ensayo modificado del ensayo TFOT, en el cual se colocan frascos de vidrio que contienen muestra de determinado cemento asfáltico. Estos frascos son colocados de manera horizontal en el horno, los cuales son sometidos de rotación y giros. La temperatura del horno es de 163°C, la rotación ayuda a que todo el frasco tenga la temperatura constante. Después de cada rotación, se adiciona una cantidad de aire a la muestra para que retire el vapor acumulado dentro de él. La ventaja de ensayo TFROT al ensayo TFOT son una mayor cantidad de muestras que pueden usar usadas y el tiempo de envejecimiento es menor para el caso del TFROT. Este ensayo esta normalizado por ASTM D-2872.



Figura N° 18: Horno Rotatorio de película delgada

Fuente: Gilson Company (2013)

2.3.7.7. Cámara de envejecimiento a presión (PAV)

El ensayo de cámara de envejecimiento a presión simula el envejecimiento del cemento asfáltico para un periodo de servicio entre 7 o 10 años. Para el ensayo, la muestra debe estar ya envejecida a corto plazo en el ensayo RTFO. El ensayo consiste inicialmente en precalentar el horno a la temperatura de ensayo, luego se coloca el

porta muestras se coloca en el horno precalentado y se tapa. El envejecimiento se realiza a diferentes temperaturas de acuerdo a las condiciones a las que estará sometido el pavimento asfáltico. Cuando la temperatura dentro del horno ya se encuentra a una diferencia de 2°C de la temperatura deseada, se procede a aplicar la presión. Luego de 20 horas, se retira las muestras, las cuales son llevadas al horno a 160°C durante 30 minutos, para eliminar el aire atrapado y se dejan reposar para los ensayos correspondientes.

2.3.8. Especificaciones SUPERPAVE para cementos asfálticos

Según Corredor G (2004), las especificaciones SUPERPAVE parten del principio de que todos los cementos asfálticos presenta propiedades iguales cuando son sometidos a diferentes ensayos independientemente del Grado de Desempeño (PG) seleccionado para el cemento asfáltico, pero que la temperatura a la cual debe ser obtenida cambia de grado a grado del cemento asfáltico dependiendo de la temperatura a la cual estará sometido. Según la especificación SUPERPAVE, el comportamiento de la mezcla asfáltica debe basarse en 3 parámetros importantes, los cuales son:

a) Ahuellamiento o deformación permanente:

De acuerdo con Huamán N. (2015), el ahuellamiento se produce por la falta de la mezcla asfáltica de poder soportar cargas. Esto es medido por el ensayo de reómetro de corte dinámico, el cual nos da 2 valores importantes para poder relacionarlo con el ahuellamiento, uno es el módulo dinámico (G^*) y el ángulo de fase (δ). Tener un módulo dinámico alto significa que la mezcla presenta una gran rigidez, dando la capacidad a la mezcla asfáltica de no deformarse, asimismo, un menor ángulo de fase, la mezcla asfáltica será la elástica y por lo tanto tendrá más capacidad de deformación sin que se plastifique.

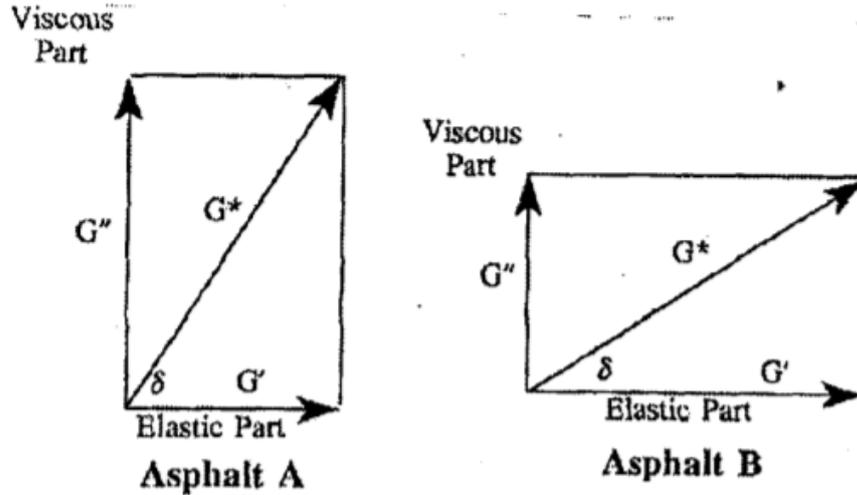


Figura N° 19: Cementos asfálticos A y B a diferentes temperaturas.

Fuente: Corredor (2004).

Se presenta en la imagen 2 tipos de cemento asfálticos, los cuales han sido sometidos al ensayo del reómetro de corte dinámica, dando su correspondiente grafica de parámetros reológicos. El grafico este compuesto por un eje que es la parte elástica (G') y otro por una parte viscosa (G''). Cuando el cemento asfáltico es sometido a bajas temperaturas, este se comporta como un sólido elástico y a altas temperaturas se comporta como un fluido viscoso, la resultante de ambos partes resulta en el módulo dinámico (G^*). En el cemento asfáltico A, presenta una mayor rigidez que el asfalto B, mientras que el cemento asfáltico B presenta una mayor elasticidad que el cemento asfáltico B.

La especificación SUPERPAVE establece una relación ($G^*/\text{sen}(\delta)$), el valor de un cemento asfáltico original es como mínimo 1 KPa y la el asfalto envejecido por el ensayo TFROT es como mínimo 2.20 KPa.

b) Fisuración por fatiga:

La especificación SUPERPAVE añade un “coeficiente por fatiga”, el cual vienen dada por la expresión ($G^* \times \text{sen}(\delta)$) establece un máximo de 5000 KPa para mezclas asfálticas envejecidas tanto por el ensayo TFROT como el PAV.

c) Fisuración por contracción térmica:

La fisuración por contracción térmica es por los cambios repentinos de temperatura, conocidos como gradiente térmico. Cuando el pavimento asfáltico está sometido a altas y bajas temperaturas de forma repentina, el cemento asfáltico se contrae y se expande. Estas deformaciones generan en la carpeta de rodadura se creen fuerzas de tensión las cuales generan las fisuras por contracción.

2.3.9. Grado de Desempeño (PG)

El Grado de Desempeño (PG) para cementos asfálticos es una clasificación que consta de la siguiente nomenclatura:

$$PG = XX - YY$$

En donde el valor de XX es un valor que indica la máxima temperatura del pavimento y el valor de YY es el valor de la mínima temperatura que estará sometido el pavimento.

Tabla N° 3: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG

	PG 46			PG 52						PG 58					PG 64						
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Temperatura de diseño máxima del pavimento promedio de 7 días, °C ^a	<46			<52						<58					<64						
Temperatura de diseño mínima del pavimento, °C ^a	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Asfalto original																					
Punto de inflamación, T 48, °C, mínimo	230																				
Viscosidad, T 316: ^b máximo 3 Pa s, temp de prueba, °C	135																				
Esfuerzo Cortante Dinámico, T 315: °C G*/senS, ^d mínimo 1.00 kPa temp de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58					64						
Película delgada en horno rotativo (T 240)																					
Cambio de masa, ^e máximo, %	1.00																				
Esfuerzo cortante dinámico, T 315: G*/senS, ^d mínimo 2.20 kPa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58					64						
Residuo en cámara de presión (R 28)																					
Temperatura de curado PAV, °C ^f	90			90						100					100						
Esfuerzo cortante dinámico G* senS, ^d máximo 5000 kPa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Resistencia al deslizamiento, T 313 : ^g S, máximo 300 MPa valor-m, mínimo 0,300 temp de prueba @ 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión Directa, T 314: ^g Def unitaria de la falla, mínimo 1,0% temp de prueba @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

Tabla N° 4: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por PG (continuación)

	PG 70						PG 76					PG 82				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Temperatura de diseño máxima del pavimento promedio de 7 días, °C ^a	<70						<76					<82				
Temperatura de diseño mínima del pavimento, °C ^a	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34
Asfalto original																
Punto de inflamación, T 48, °C, mínimo							230									
Viscosidad, T 316: ^b máximo 3 Pa·s, temp de prueba, °C							135									
Esfuerzo Cortante Dinámico, T 315: ^c G*/senS, ^d mínimo 1.00 kPa temp de prueba @ 10 rad/s, °C	70						76					82				
Película delgada en horno rotativo (T 240)																
Cambio de masa, ^e máximo, %							1.00									
Esfuerzo cortante dinámico, T 315: G*/senS, ^d mínimo 2.20 kPa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	70						76					82				
Residuo en cámara de presión (R 28)																
Temperatura de curado PAV, °C ^f	100 (110)						100(110)					100 (110)				
Esfuerzo cortante dinámico G* senS, ^d máximo 5000 kPa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Resistencia al deslizamiento, T 313 : ^g S, máximo 300 MPa valor-m, mínimo 0,300 temp de prueba @ 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Tensión Directa, T 314: ^g Def unitaria de la falla, mínimo 1,0% temp de prueba @ 1.0 mm/min, °C	0		-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.3.10. Efectos de la velocidad de carga

De acuerdo con McGennis, Anderson, Kennedy & Solalmanian (1994), para la selección del cemento asfáltico en base al clima, este se supone que estará sometido a cargas rápidas. Cuando se realiza el ensayo del reómetro de corte dinámico, la velocidad de carga es de 10 rad/seg, el cual corresponde a una velocidad de tráfico de 90 km/h, pero esta velocidad no siempre va a estar sometida el pavimento asfáltico.

2.3.11. Efecto de la Temperatura del aire

La temperatura del medio ambiente donde se encontrará el pavimento representa un parámetro fundamental para evitar las fallas prematuras en el pavimento, ya que una propiedad importante del cemento asfáltico es la susceptibilidad térmica.

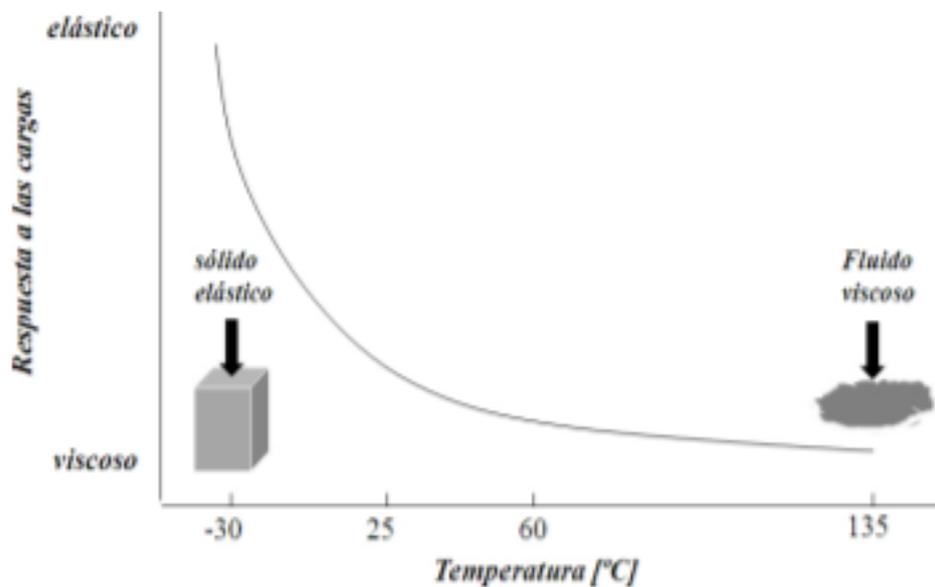


Figura N° 20: Efecto de la temperatura en el cemento asfáltico.

Fuente: Mora (2016)

De acuerdo con Huang (2004), menciona que está demostrado que las mezclas asfálticas que son expuestas a altas temperatura, estas presentaran una deformación acelerada. Ello se muestra en la siguiente figura.

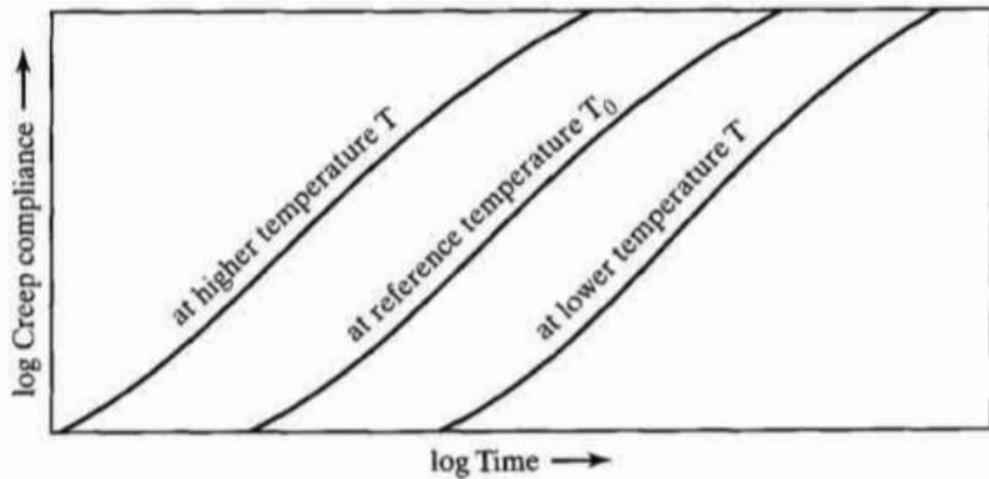


Figura N° 21: Efecto de la temperatura en la deformación de la mezcla asfáltica.

Fuente: Huang (2004).

En la figura se muestra una mezcla asfáltica la cual es sometida a altas y bajas temperaturas. La deformación más pronta ocurre cuando la mezcla asfáltica está sometida a temperaturas altas, mientras que a temperaturas bajas también se presentan una deformación, pero es más lenta en comparación con las altas temperaturas.

2.3.12. Datos climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA).

El proyecto MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) es la última reanálisis de los datos atmosféricos. Este procesamiento de las observaciones meteorológicas ayuda a obtener un amplio abanico de variables fácilmente. Esta reanálisis está ayudando en mayor medida a la obtención de climas, energía y agricultura.

Inicialmente, con ayuda de los satélites producidos por NASA (GMAO) se desarrolló el GEOS-1 (Goddard Earth Observing System), en el cual se recopilaba información climática, pero tuvo una versión donde se mejoraron algunos aspectos, el resultado de esta revisión fue el proyecto MERRA, el cual abarcó el periodo de 1979 al 2016, el cual tuvo 2 objetivos principales.

Sin embargo, el proyecto MERRA-1 presentaba algunas deficiencias relacionadas al sesgo de los datos, a desequilibrios en ciertos datos

hidrológicos y de la superficie terrestre, además de tener una mala representación de la estratosfera superior. Otro apartado limitante del proyecto fue la imposibilidad de incorporación de nuevas fuentes de datos satelitales más allá de NOAA-18 (National Oceanic and Atmospheric Administration), el cual era un conjunto de satélites meteorológicos lanzados a órbita en 2005 para la recolección de datos climatológicos y atmosféricos, ya que este satélite iba a dejar de orbitar en el año 2016, con lo cual el proyecto iba a sufrir una degradación significativa en sus fuentes.

El MERRA-2, se propuso como una mejora oportuna del MERRA-1 para tener un análisis climático continuo en tiempo real. Esta mejora ayudó a solucionar algunos problemas del MERRA-1, aprovechando el modelado y asimilación de datos de GMAO, además de proyectarse a largo plazo.

En los siguientes gráficos se muestran el conteo de observaciones asimiladas por el MERRA-1 y MERRA-2. Las observaciones asimiladas por el MERRA-2 crece en aproximadamente 2 millones por ciclo de 6 horas en 2002 a casi 5 millones en 2015, mientras que MERRA-1 asimila 1.5 millones de observaciones por ciclo de 6 horas desde el 2002 hacia adelante.

La aplicación web que permite obtener los resultados de las variables que analiza y procesa el proyecto MERRA-2, son plasmados en el Proyecto POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources). Este aplicativo recopila la información meteorológica de las investigaciones de la NASA para temas relacionados con la energía renovable, eficiencia energética de las construcciones y necesidades agrícolas.

2.3.13. Validación de los datos obtenidos por el Proyecto MERRA 2

De acuerdo con Bocco, Bravo, Turraca, Sagayo y Rosales (2019) en su investigación titulada “Evaluación de los datos obtenidos del producto MERRA 2 (NASA) con estaciones meteorológicas de las provincias de Catamarca y La Rioja (Argentina) para estimar las temperaturas en zonas nogaleras”, se desarrolla el tema de la importancia de diversos factores climáticos como la temperatura, humedad ambiente, la incidencia de la luz solar, los nutrientes, el suelo, etc., son fundamentales para el correcto desarrollo de las plantas y por lo tanto, de la productividad. El objetivo de la

investigación fue desarrollar una comparación entre los datos brindados por el proyecto MERRA 2 y los datos proporcionados por registro del Servicio Meteorológico Nacional en el periodo comprendido entre enero del 2015 y enero del 2019. En especial, se centran en el estudio del Nogal, el cual es un árbol muy susceptible a las heladas, ya que la temperatura adecuada para que produzca el fruto de la nuez es entre 21°C y 28°C.

Para ello, primero se identificaron las 3 localidades donde se cultivan los nogales que son Catamarca, La Rioja y Chamental. En la tabla 1, se presentan los datos recopilados del Sistema Meteorológico Nacional desde enero del 2015 a enero del 2019.

Tabla N° 5: Datos geográficos y climáticos de las localidades basados en los datos del Sistema Meteorológico Nacional

Localidad	Altitud (msnm)	Latitud	Longitud	Temp. mínima anual (°C)	Temp. media anual (°C)	Temp. máxima anual (°C)
Catamarca	464	-28° 36'	-65° 46'	14.4	20.9	27.7
La Rioja	429	-29° 23'	-66° 49'	13.8	20.2	27.3
Chamental	461	-30° 22'	-66° 17'	13.4	19.8	26.1

Fuente: Bocco et al. (2019)

Para la validación de los datos proporcionados por el MERRA 2, se utilizaron el coeficiente de determinación R² y la raíz del error cuadrático medio (RECM).

Tabla N° 6: Datos de las temperaturas máximas y mínimas registradas y el MERRA 2 en la localidad de Catamarca.

Año		Temp. mínima (°C)		Temp. máxima (°C)	
		Valor máx.	Valor mín.	Valormáx.	Valor mín.
2015	Registrada	-1.1 (jun.)	28.4 (ene.)	11.0 (ago.)	40.8 (dic.)
	MERRA-2	0.2 (jun)	22.2 (ene.)	10.3 (ago.)	37.2 (oct.)
2016	Registrada	-1.2 (jun.)	28.6 (feb.)	8.5 (jun.)	43.6 (dic.)
	MERRA-2	-1.2 (sep.)	22.9 (feb.)	7.3 (jun.)	39.9 (dic.)
2017	Registrada	-5.3 (jul.)	28.0 (ene.)	8.8 (jul.)	45.2 (nov.)
	MERRA-2	-3.5 (jul.)	23.5 (dic.)	10.2 (jun.)	41.1 (ene.)
2018	Registrada	-5.1 (jul.)	28.8 (dic.)	8.6 (jun.)	41.4 (dic.)
	MERRA-2	-2.3 (jun.)	23.8 (dic.)	8.8 (jun.)	38.7 (sep.)
2019	Registrada	-2.7 (jun.)	29.3 (ene.)	10.8 (jun.)	43.0 (ene.)

MERRA-2	-0.4 (jul.)	23.2 (ene)	8.9 (may.)	38.0 (oct.)
---------	-------------	------------	------------	-------------

Fuente: Bocco et al. (2019)

Tabla N° 7: Datos de las temperaturas máximas y mínimas registradas y el MERRA 2 en la localidad de La Rioja

Año		Temp. mínima (°C)		Temp. máxima (°C)	
		Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.
2015	Registrada	-1.0 (jun.)	27.8 (ene.)	9.9 (ago.)	42.8 (ene.)
	MERRA-2	1.0 (jun)	24.8 (ene.)	11.2 (ago.)	38.0 (dic.)
2016	Registrada	-1.0 (jun.)	28.0 (ene.)	8.8 (jun.)	45.5 (dic.)
	MERRA-2	1.0 (sep.)	25.7 (feb.)	8.8 (jun.)	41.8 (dic.)
2017	Registrada	-5.2 (jul.)	29.5 (ene.)	10.8 (jul.)	45.0 (ene.)
	MERRA-2	-0.5 (jul.)	26.6 (ene.)	8.4 (jul.)	42.1 (ene.)
2018	Registrada	-3.0 (jun.)	27.0 (dic.)	7.7 (jun.)	42.4 (dic.)
	MERRA-2	-0.8 (jun.)	25.6 (ene.)	10.6 (jun.)	40.2 (dic.)
2019	Registrada	-1.7 (jun.)	28.4 (ene.)	9.8 (jun.)	42.6 (ene.)
	MERRA-2	0.8 (jul.)	26.1 (ene)	11.6 (may)	38.5 (feb.)

Fuente: Bocco et al. (2019)

Tabla N° 8: Datos de las temperaturas máximas y mínimas registradas y el MERRA 2 en la localidad de Chamental.

Año		Temp. mínima (°C)		Temp. máxima (°C)	
		Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.
2015	Registrada	-2.5 (jul.)	27.0 (ene.)	10.8 (ago.)	41.6 (ene.)
	MERRA-2	0.1 (jul.)	24.8 (dic.)	12.4 (jun.)	38.2 (ene.)
2016	Registrada	-2.4 (sep.)	26.5 (ene.)	8.5 (jun.)	43.4 (dic.)
	MERRA-2	0.1 (jun.)	24.7 (feb.)	7.2 (jun.)	41.3 (dic.)
2017	Registrada	-8.3 (jul.)	28.0 (ene.)	10.5 (jul.)	44.0 (ene.)
	MERRA-2	-2.7 (jul.)	25.3 (ene.)	9.2 (jul.)	43.3 (ene.)
2018	Registrada	-4.0 (jul.)	26.0 (dic.)	6.4 (jul.)	41.2 (dic.)
	MERRA-2	-2.9 (jun.)	25.0 (dic.)	8.2 (jul.)	39.9 (ene.)
2019	Registrada	-2.1 (ago.)	27.9 (ene.)	10.0 (jun.)	42.0 (ene.)
	MERRA-2	-1.9 (jul.)	26.1 (ene)	10.9 (jul.)	39.5 (feb.)

Fuente: Bocco et al. (2019).

Luego, en la siguiente tabla, nos muestra los resultados de la comparación entre la temperatura máxima y mínima evaluados con los parámetros R2 y RECM.

Tabla N° 9: Parámetros estadísticos para la validación para el ajuste entre las temperaturas máximas y mínimas de las localidades analizadas.

Localidad	Temp. máximas		Temp. mínimas	
	R ²	RECM (°C)	R ²	RECM (°C)
Catamarca	0.84	3.47	0.76	4.23
La Rioja	0.89	2.53	0.85	2.73
Chamical	0.90	2.33	0.89	2.32

Fuente: Bocco et al. (2019).

Como se aprecia, los coeficientes de determinación presentan una adecuada relación con los datos medidos por el SMN, siendo mejor en las altas temperaturas. De igual forma, el coeficiente RECM muestra que un máximo error que puede haber es de 3°C, siendo el menor es Chamical y el mayor en Catamarca.

La conclusión a la que se llegó es que la temperatura diaria obtenido por el MERRA 2 permite estimar de manera confiable, la temperatura superficial para las áreas nogaleras.

2.3.14. Modelos matemáticos

De acuerdo con Cervantes (2015), la modelización matemática es un proceso racional por el cual se puede establecer modelos matemáticos para expresar fenómenos reales. Es tratar de comprender los fenómenos que ocurren la realidad. Para poder realizar una modelización, se requiera etapas, las cuales son:

- Estudio de la situación real
- Elaboración de un modelo matemático
- Solución del modelo
- Validar el modelo

2.3.15. Modelos matemáticos para la predicción de la temperatura del pavimento.

De acuerdo con SHRP (1994) para la obtención de la temperatura del pavimento, se puede realizar de forma directa o a través de la temperatura del aire. Para el cálculo de la temperatura del pavimento en base a la temperatura del aire, es la siguiente:

- Convertir la máxima temperatura del aire promedio de 7 días a la máxima temperatura del pavimento en la superficie.
- Calcular la temperatura máxima del pavimento de 7 días a la profundidad de diseño.
- Obtener la temperatura mínima del aire y convertirlo en la temperatura de la superficie del pavimento.
- Obtener la temperatura mínima del pavimento a la profundidad de diseño.

2.3.15.1. SHRP Original

McGennis et al. (1994) refiere que la temperatura máxima y mínima de la superficie del pavimento se calcula en función de la temperatura del aire y un coeficiente (lat), que es una función de la ubicación geográfica (latitud). El primer modelo desarrollado por SHRP se utilizó para calcular la temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20 mm y se propuso la siguiente ecuación (Ezcalante, Fernandez, & Saez, 2011):

$$T_{MAX} = 0.945 \times (T_{MAXAIR} - 0.00618lat^2 + 0.2289lat + 42.2) - 17.78$$

Donde:

T_{MAX} = Temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20 mm.

T_{MAXAIR} = Temperatura máxima del aire (°C).

lat = Latitud de la zona de estudio (°).

Para el cálculo de la temperatura mínima del pavimento, el SHRP original sugirió considerar la temperatura de la superficie del pavimento sea igual a la temperatura mínima aire, esta es una recomendación bastante mesurada, porque la temperatura del pavimento es más alta que la temperatura del aire (Ezcalante et al., 2011).

$$T_{MIN} = T_{MINAIR}$$

Donde:

T_{MIN} = Temperatura mínima del pavimento (°C)

T_{MINAIR} = Temperatura mínima del aire (°C)

2.3.15.2. SHRP Canadiense

Motta et al. (1996) refiere que los científicos del C-SHRP (SHRP Canadiense) recomiendan usar la siguiente ecuación (Escalante et al., 2011). La cual aumenta el valor de la temperatura mínima marcando una diferencia entre la temperatura del aire y la del pavimento, ya que anteriormente se consideró valores iguales de temperatura

$$T_{MIN} = 0.859 \times T_{MINAIR} + 1.7$$

2.3.15.3. LTPP – 1996

Consecutivamente, dentro del rango de continuidad del estudio SHRP, se llevó a cabo el programa de monitoreo de temperatura del aire y del pavimento por más de dos años mediante el estudio de desempeño de 30 tramos de pavimentos, denominado LTPP (Long Term Pavement Performance), indicando que el cálculo anterior los estándares de temperatura máxima y mínima deben ser verificados. Se ha comprobado que la temperatura mínima de la superficie del pavimento es aproximadamente 13°C superior a la temperatura mínima del aire, lo que indica que el modelo propuesto por el SHRP original y el modelo desarrollado por C-SHRP son muy conservadores. Por otro lado, la ecuación del SHRP original cuando la temperatura del aire es inferior a 35°C, estima correctamente la temperatura máxima de la superficie del pavimento y cuando la temperatura del aire era superior a 35°C, proporciona un resultado de 6°C más alto que la temperatura medida en el pavimento (Ezcalante et al., 2011).

Considerando la complicación del problema, en 1996 se propusieron las siguientes ecuaciones, que toman en cuenta la latitud, temperatura y profundidad (H) has la superficie del pavimento, expresadas en centímetros (Mohseni, 1996):

$$T_{MAX} = 54.32 + [0.77585T_{MAXAIR}] - [0.002468lat^2] - [15.137\log(H+25)]$$

$$T_{MIN} = -1.56 + [0.71819T_{MINAIR}] - [0.003966lat^2] + [6264\log(H+25)]$$

Donde:

H = Profundidad del pavimento (2 cm)

2.3.15.4. LTPP 1998 – 2000.

LTPP (1998) y Bosscher (2000) refieren que consecutivamente, entre los años 1991 y 1995, basándose en datos recopilados en 30 pistas de prueba en los Estados Unidos, LTPP lanzó el programa de monitoreo SMP (Seasonal Monitoring Program). El análisis de los resultados de este procedimiento se concluye en LTPP Bind, que propone la siguiente ecuación para calcular la temperatura mínima del pavimento (Ezcalante et al., 2011).

$$T_{MIN} = -1.56 + 0.72T_{MINAIR} - 0.004lat^2 + 6.26 \log(H+25) - z(4.4 + 0.52 \times Desv.)^{1/2}$$

Donde:

Z = Confiabilidad requerida

Desv. = Desviación Estándar

2.3.15.5. LTPP 2004.

Mohseni & Carpenter (2004) refieren que LTPP Bind continúa desarrollando investigaciones sobre el cálculo de la temperatura máxima de la superficie de la carretera, por lo que propusieron un algoritmo mejorado para calcular el grado de desempeño (PG) de altas temperaturas mediante la integración de modelos climáticos (ICM) en 2004. Basado en datos de alrededor de 8.000 estaciones meteorológicas, y datos por hora de temperatura, velocidad del viento y radiación solar. Se calcula la temperatura máxima diaria en función de la temperatura por hora en el ICM y, en función de estas temperaturas y la latitud de cada estación meteorológica, se utiliza la siguiente ecuación para calcular la temperatura máxima del pavimento a una profundidad de 20 mm:

$$T_{MAX} = 32.7 + 0.837T_{MAXAIR} - 0.0029lat^2 + z(desv.^2 + \delta^2)^{0.5}$$

Donde:

δ = Error estándar del modelo (2.1 °C)

2.3.16. Corrección del Grado de Desempeño (PG) por velocidad y nivel de tráfico.

El Grado de Desempeño obtenido de los modelos debe corregirse debido a la velocidad y el nivel de tráfico (una menor velocidad y mayor nivel de tráfico van a generar mayores deformaciones en el pavimento asfáltico). A continuación, se presenta un cuadro con los Grados que debe corregirse el Grado de Desempeño (PG) obtenido por los modelos matemáticos.

Tabla N° 10: Grados de corrección por velocidad y nivel de tráfico.

ESAL de diseño (Millones)	Grados de Desempeño Corregido		
	Ratios de la carga de tráfico		
	Permanente	Bajo	Estándar
<0.3	-	-	-
0.3 a <3	2	1	-
3 a <10	2	1	-
10 a <30	2	1	-
≥ 30	2	1	1

Fuente: SUPERPAVE y el Diseño de Mezclas Asfálticas.

El ESAL de diseño corresponde al tráfico estimado para un periodo de 20 años y cada Grado de Desempeño Corregido corresponde a 6 Grados de Desempeño.

Tabla N° 11: Clasificación por velocidad

Clasificación por velocidad	Valor
Permanente	Menor a 20km/h
Bajo	Entre 20km/h y 70 km/h
Estándar	Mayor a 70km/h

Fuente: SUPERPAVE y el Diseño de Mezclas asfálticas.

2.3.17. Equivalencia del Grado de Penetración (PEN) con el Grado de Desempeño (PG).

De acuerdo con Petroperú, en el Perú, existen 7 refinerías, dentro de las cuales 3 son proveedores de cemento asfálticos, los cuales son las refinerías de Talara, Conchan y Mollendo.

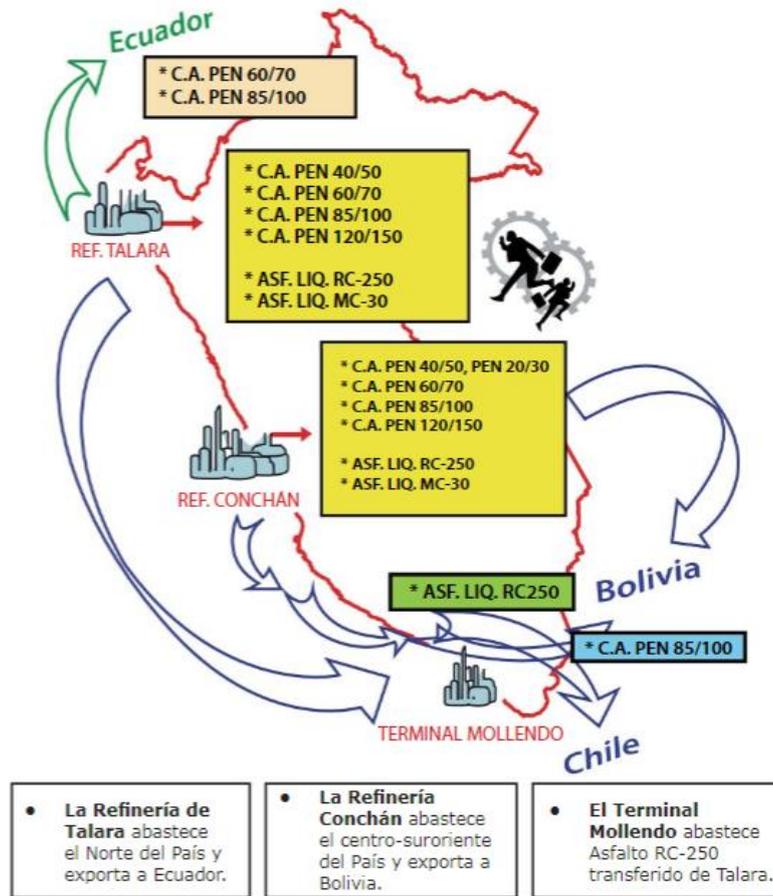


Figura N° 22: Mapa de ubicación de las refinerías proveedoras de cemento asfáltico en Perú.

Fuente: Petro Perú (2020).

Las refinerías ofrecen el cemento asfáltico en base al Grado de Penetración (PEN) y no en base al Grado de Desempeño (PG). Se han propuesto algunas relaciones entre ambos, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N° 12: Relación del Grado de Penetración (PEN) con el Grado de Desempeño (PG)

Grado de Penetración referencial	PEN 40/50	PEN 60/70	PEN 85/100	PEN 120/150
Grado de desempeño (PG)	76 - 22	64 - 22	58 - 28	58 - 28
Grado de desempeño (PG) verdadero	76 - 28	68 - 28	63 - 28	52 - 31

Fuente: Petro Perú (2020)

2.4. Definición de términos básicos

- Mezclas asfálticas

Según Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2018) refiere que la mezcla asfáltica es una mezcla procesada, la cual está compuesta con agregados grueso y fino, mezclado con material bituminoso y si fuese el caso, se adiciona aditivos para mejorar su comportamiento.

- Climatología

De acuerdo con Andrade M. y Muñoz C. (2012), la climatología es la ciencia que se encarga del estudio de los estados atmosféricos que suceden en un determinado lugar, los cuales están basadas en datos meteorológicos.

- Estaciones meteorológicas

Según Andrade M. y Muñoz C. (2012), las estaciones meteorológicas pueden dividirse en estaciones pluviométricas, termo-pluviométrica y estaciones completas, donde se miden las precipitaciones, temperaturas, presión atmosférica, velocidad del viento entre otras variables.

- Sistema SUPERPAVE

(Superior Performance Pavements), un nuevo método de diseño para mezclas asfálticas en caliente y un guía de predicción del comportamiento de pavimentos asfálticos, que contiene nuevas especificaciones para el asfalto y el agregado.

- Grado de desempeño (PG)

Rango de temperatura, máxima y mínima, dentro de estos rangos de temperatura, el cemento asfáltico se desarrolla su vida útil satisfactoriamente, representado por el sistema nombrado SUPERPAVE

- Mapa de zonificación

Es una proyección que nos permite identificar de manera visual, las áreas de influencia del parámetro que pretendemos analizar. Puede ser delimitada según los climas, según los recursos naturales, según el peligro sísmico, según el grado de desempeño entre otros.

- Modelos matemáticos

Un modelo matemático es una representación de una relación entre 2 o más variables las cuales describen un fenómeno. Ellos ayudan a poder evaluar, analizar y concluir los fenómenos naturales, físicos entre otros.

- Susceptibilidad térmica

La susceptibilidad térmica es la propiedad que presentan algunos materiales, los cuales cambian de consistencia frente a diferentes temperaturas.

- Transito

El Ministerio de transportes y comunicaciones (2013) refiere que el tráfico es la cantidad de vehículos que circulan por una determinada vía.

- Velocidad de diseño

La velocidad de diseño es la máxima velocidad por la cual los vehículos van a transitar de manera segura y confortable sobre la carretera. Se debe garantizar la consistencia en tramos homogéneos de las carreteras los cuales van a depender de la topografía del terreno.

CAPITULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

Se puede establecer el mapa de zonificación por Grado de desempeño (PG) con la base de datos climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA), para la selección del tipo de cemento asfáltico de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno.

3.1.2. Hipótesis Específicas

1. Mediante la aplicación de los modelos matemáticos SHRP y LTPP se obtiene los grados de desempeño (PG) para la elaboración del mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno.
2. Mediante un análisis en el software ArcMap se delimita el área de influencia de los grados de desempeño (PG), para la elaboración del mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE de las regiones de Cuzco y Puno.
3. Las correcciones basadas en el tráfico y la velocidad modifican el Grado de Desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico en las carreteras de las regiones de Cuzco y Puno.

3.2. Identificación de Variables

3.2.1. Definición conceptual de variables

- Variable Independiente:
X: Mapa de zonificación por grados de desempeño (PG).
- Variable Dependiente:
Y: Tipo de cemento asfáltico de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE.

3.2.2. Operacionalización de variables

Tabla N° 13: Operacionalización de variables

Variable dependiente	Descripción conceptual	Descripción operacional	Dimensiones	indicadores	índices	Instrumentos	Herramienta
Mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG)	Es un mapa basado en el clima con los grados de ligantes a ser usados por el diseñador.	El mapa de zonificación se realizará en base a la clasificación por	Zonificación de los grados de desempeño (PG)	Climatología	Temperatura	MERRA-2 (NASA)	Software ArcGIS
		Grado de Desempeño (PG) que se le dé a cada estación		Parámetro de diseño de pavimento flexible	Trafico	Expediente técnico	
		meteorológica, distribuyendo de acuerdo a su área de influencia.		Parámetro de diseño geométrico	Velocidad	Expediente técnico	
Variable independiente	Descripción conceptual	Descripción operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Instrumentos	Herramienta
Clasificación SUPERPAVE para cementos asfálticos	La especificación por Grado de Desempeño (PG) clasifica el asfalto en una serie de grados que designan el rango de temperaturas máxima y mínima de buen desempeño del asfalto para resistir los modos de falla típicos de un pavimento.	Los Grados de Desempeño (PG) son obtenidos en base a modelos matemáticos, los cuales están en base a diferentes parámetros.	Modelos matemáticos para la predicción de los Grados de Desempeño (PG)	SHRP	Temperatura	Hojas de cálculo	SHRP-A-648
				LTPP	Temperatura	Hojas de cálculo	LTPP Seasonal Asphalt Concrete

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y método de investigación

4.1.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es descriptivo, porque describe el proceso a detalle del método utilizado para seleccionar el tipo de cemento asfáltico de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE. Hernández (2014) refiere que con las investigaciones descriptivas se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno bajo análisis.

4.1.2. Método de investigación

El método de la investigación es deductivo, porque mediante el análisis de los modelos matemáticos (SHRP, LTTP) se busca aplicarlos en una determinada zona para establecer un mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) y posterior selección de un tipo de cemento asfáltico según la clasificación SUPERPAVE. (Bernal, 2010) refiere que este método analiza primero hipótesis, teoremas, leyes, principios, etc. que tienen aplicabilidad universal y validez probada para aplicarlos a soluciones o hechos específicos.

4.2. Población de estudio.

La población de estudio de la investigación está constituida por la data del proyecto MERRA-2 (NASA) de temperaturas máximas y mínimas registradas en los últimos 20 años de los distritos del Perú.

4.3. Diseño muestral.

El diseño muestral de la investigación es no probabilístico, muestreo por conveniencia, debido a que recopilaremos información de las temperaturas máximas y mínimas registradas en los últimos 20 años proporcionada por el proyecto MERRA-2 (NASA) en los distritos de las regiones de Cusco y Puno.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Las técnicas de recolección de datos de la investigación se basan en la recopilación de la data histórica de temperaturas máximas y mínimas registradas de los últimos 20 años del proyecto MERRA-2 (NASA) de los distritos de las regiones de Cuzco y Puno. El instrumento de recolección de datos fue la ficha creada en Excel donde se registraban los datos históricos de las temperaturas máximas y mínimas de los distritos de las regiones Cusco y Puno.

4.5. Procedimientos para la recolección de datos.

El procedimiento para la recolección de datos de la investigación se realiza mediante un registro de datos de forma manual de las temperaturas de los últimos 20 años del proyecto MERRA-2 (NASA) de los distritos de las regiones de Cusco y Puno, de tal forma que la data este organizada para la selección de la información necesaria para la obtención de las temperaturas solicitadas por los modelos matemáticos del SHRP y LTPP para la obtención de los grados de desempeños (PG) de las regiones de Puno y Cuzco y procesar los datos de PG para la obtención del mapa de zonificación por grado de desempeño de las regiones de Cusco y Puno.

4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Las técnicas de procesamiento y análisis de datos de la investigación están basadas en el cálculo de los grados de desempeño (PG), mediante los modelos matemáticos SHRP, LTPP, luego se procede al análisis de datos para la elaboración del mapa de zonificación por grados de desempeño (PG) de las regiones de Cuzco y Puno.

CAPITULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Desarrollo de la investigación

5.1.1. Selección de los datos meteorológicos

Para la selección de los datos meteorológicos, nos basamos en la información meteorológica proporcionada por el proyecto MERRA-2 (NASA), para nuestra investigación se tomaron como referencia las ubicaciones de los distritos de las regiones de Cuzco y Puno. En las siguientes imágenes se muestran el mapa de los distritos de las regiones de Cuzco y Puno, para el caso de Cuzco, se cuenta con 112 distritos, y en el caso de Puno, se cuenta con 110 distritos.

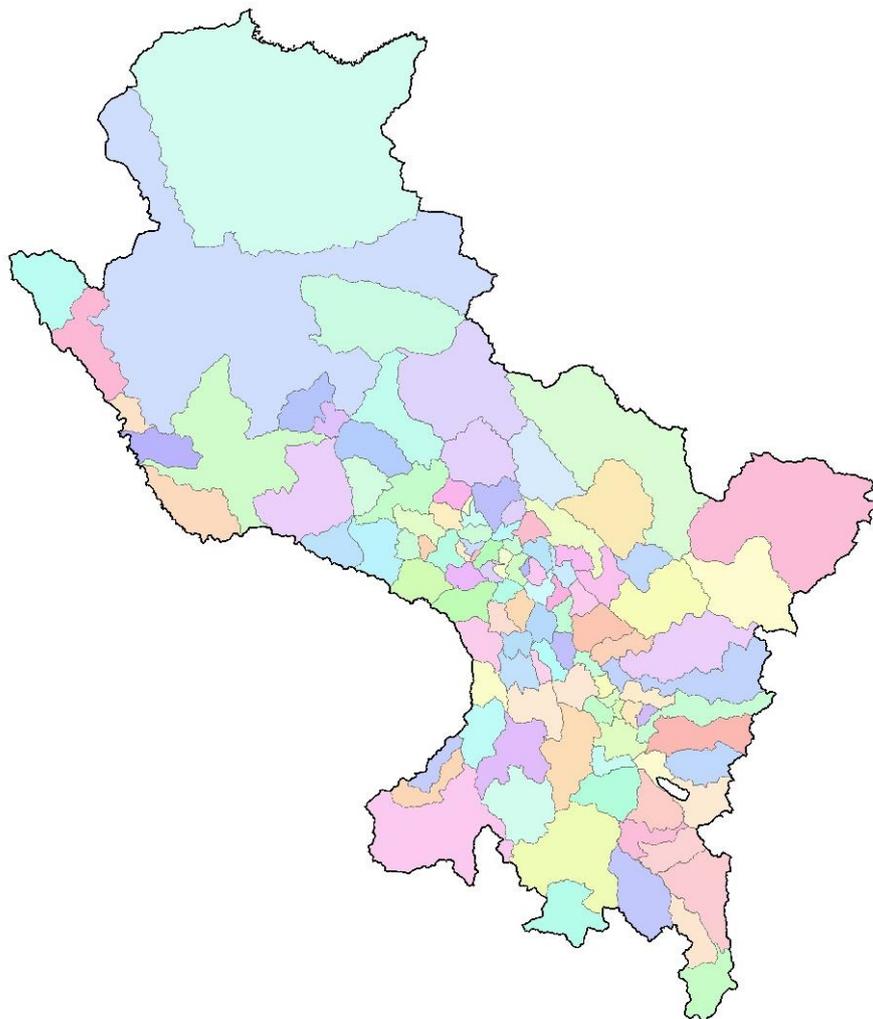


Figura N° 23. Mapa distrital de la región Cuzco

Fuente: Elaboración Propia usando el software ArcMap 10.4.1.

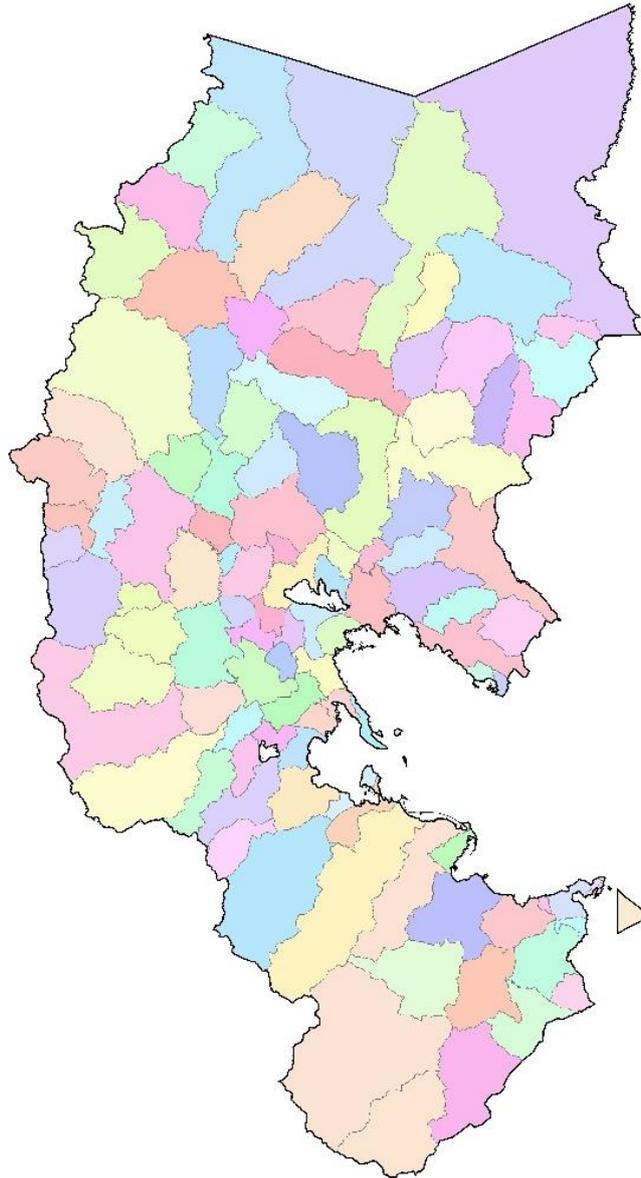


Figura N° 24. Mapa distrital de la región de Puno

Fuente: Elaboración Propia usando el software ArcMap 10.4.1.

Para cada distrito de las regiones de Puno y Cuzco se consideraron, las temperaturas máximas y mínimas registrados en cada día para un periodo 20 años (2001 – 2020) de los registros climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA), como recomendación de SUPERPAVE para poder efectuar los promedios de las temperaturas máximas y determinar el máximo valor, así como el mínimo valor de las temperaturas por cada año.

5.1.2. Datos geográficos de los distritos de las regiones de Cusco y Puno

Tabla N° 14: Datos geográficos de los distritos de la región de Cusco

Distritos de la Región Cusco					
Distritos	Lat. (°)	Long. (°)	Distritos	Lat. (°)	Long. (°)
Accha	-13.9789	-71.8576	Marcapata	-13.6325	-70.8841
Acomayo	-13.8983	-71.6693	Megantoni	-11.7796	-72.8325
Acopia	-14.0489	-71.5032	Mollepata	-13.4702	-72.6009
Acos	-13.9361	-71.7292	Mosoc Llacta	-14.1015	-71.4817
Alto Pichigua	-14.7451	-71.2176	Ocobamba	-12.9625	-72.3483
Ancahuasi	-13.4669	-72.3175	Ocongate	-13.7024	-71.2624
Andahuaylillas	-13.6696	-71.6964	Ocoruro	-15.0830	-71.1271
Anta	-13.4926	-72.1590	Ollantaytambo	-13.2156	-72.2746
Cachimayo	-13.4711	-72.0555	Omacha	-14.1312	-71.7910
Caicay	-13.5854	-71.6607	Oropesa	-13.5814	-71.7863
Calca	-13.2747	-71.9601	Paccaritambo	-13.7752	-71.9391
Camanti	-13.2970	-70.7313	Pallpata	-14.8902	-71.0986
Capacmarca	-14.0455	-71.9933	Pampamarca	-14.1405	-71.4498
Ccapi	-13.8623	-72.0177	Paruro	-13.7303	-71.8585
Ccarhuayo	-13.5311	-71.3438	Paucartambo	-13.3063	-71.4608
Ccatcca	-13.6225	-71.4923	Pichari	-12.3664	-73.7986
Ccorca	-13.5939	-72.0833	Pichigua	-14.6690	-71.3865
Challabamba	-13.1413	-71.7692	Pillpinto	-13.9908	-71.7625
Chamaca	-14.2954	-71.8624	Pisac	-13.3965	-71.8038
Checacupe	-14.0179	-70.9398	Pitumarca	-13.8937	-71.1439
Checca	-14.5000	-71.4817	Pomacanchi	-14.0646	-71.6245
Chinchaypujio	-13.6168	-72.2775	Poroy	-13.5025	-72.0426
Chincheru	-13.4126	-72.0369	Pucyura	-13.4933	-72.0919
Colcha	-13.8612	-71.8649	Quehue	-14.3763	-71.5150
Colquemarca	-14.2454	-72.0242	Quellouno	-12.5125	-72.4732
Colquepata	-13.4029	-71.6453	Quiñota	-14.3739	-72.2003
Combapata	-14.0908	-71.3386	Quiquijana	-13.8052	-71.5394
Condorama	-15.3162	-71.0748	Rondocan	-13.7838	-71.7650
Coporaque	-14.7475	-71.6387	San Jerónimo	-13.5682	-71.8763
Coya	-13.4108	-71.9194	San Pablo	-14.1522	-71.0900
Cusco	-13.4897	-71.9813	San Pedro	-14.1688	-71.3329
Cusipata	-13.8894	-71.4423	San Salvador	-13.4879	-71.7743
Echarate	-12.4744	-73.1537	San Sebastián	-13.5225	-71.9149
Espinar	-14.9378	-71.3365	Sangarará	-13.9537	-71.5679
Huancarani	-13.5125	-71.6122	Santa Ana	-12.8911	-72.7480
Huanoquite	-13.6996	-72.0791	Santa Teresa	-13.2713	-72.7070
Huaro	-13.7652	-71.6779	Santiago	-13.5746	-71.9813
Huarocondo	-13.3769	-72.2732	Santo Tomas	-14.6690	-72.2288
Huayllabamba	-13.3458	-72.0476	Saylla	-13.5561	-71.8335
Huayopata	-13.0518	-72.4714	Sicuani	-14.2645	-71.1034
Inkawasi	-13.3284	-73.1781	Suyckutambo	-14.9878	-71.6601

Kimbiri	-12.6196	-73.6487	Taray	-13.4647	-71.8820
Kosñipata	-13.0057	-71.3866	Tinta	-14.1564	-71.4004
Kunturkanki	-14.5762	-71.2818	Tupac Amaru	-14.1568	-71.5245
Lamay	-13.3230	-71.8777	Urcos	-13.6910	-71.5951
Langui	-14.3787	-71.3008	Urubamba	-13.2456	-72.1276
Lares	-13.0928	-72.0205	Velille	-14.5524	-71.8505
Layo	-14.5428	-71.0938	Vilcabamba	-13.1053	-73.0407
Limatambo	-13.4802	-72.4410	Villa Kintiarina	-12.9108	-73.4744
Livitaca	-14.3466	-71.6464	Villa Virgen	-13.0607	-73.3245
Llusco	-14.5167	-72.2503	Wanchaq	-13.5332	-71.9470
Lucre	-13.6582	-71.7678	Yanaoca	-14.2811	-71.4460
Machupicchu	-13.2142	-72.4982	Yanatile	-12.7966	-72.1127
Marangani	-14.3929	-71.1057	Yaurisque	-13.6482	-71.9134
Maranura	-12.9536	-72.6356	Yucay	-13.2992	-72.0748
Maras	-13.3382	-72.1567	Zurite	-13.4669	-72.2475

Fuente: Google Earth (2021).

En la tabla N°14 se muestran los datos geográficos de longitud y latitud de los 112 distritos de la región Cuzco. Para la obtención de las longitudes y latitudes se recurrió al software Google Earth, en el cual procedimos colocando el cursor en el centro de los distritos de la región Cuzco, estos datos nos sirvieron para la aplicación de los modelos matemáticos expuestos en la presente investigación.

Tabla N° 15. Datos geográficos de los distritos de la región de Puno

Distritos de la Región Puno					
Distritos	Lat. (°)	Long. (°)	Distritos	Lat. (°)	Long. (°)
San Pedro De Putina Punco	-13.5740	-69.1836	San Antonio	-16.0867	-70.3170
Ayapata	-13.5650	-70.1443	Anapia	-16.3300	-68.8727
Alto Inambari	-14.0498	-69.3412	Copani	-16.3666	-69.0625
Limbani	-13.7732	-69.6149	Palca	-15.2997	-70.6015
Phara	-14.0677	-69.5762	Cabanilla	-15.5805	-70.3968
San Juan Del Oro	-14.1896	-69.1003	Lampa	-15.3568	-70.4064
Achaya	-15.2478	-70.1712	Paratia	-15.4734	-70.7109
Arapa	-15.0903	-70.0780	Santa Lucía	-15.6614	-70.7133
Azángaro	-14.8791	-70.1375	Chucuito	-15.9173	-69.9039
Chupa	-15.0992	-69.9591	Platería	-16.0162	-69.8984
Huancané	-15.1825	-69.8133	Puno	-15.9096	-70.0619
Huatasani	-15.0189	-69.8014	Tiquillaca	-15.9363	-70.2675
Nicasio	-15.2235	-70.2898	Vilque	-15.7745	-70.2637
Pedro Vilca Apaza	-15.0278	-69.9085	Acora	-16.2866	-69.9177

San Juan De Salinas	-15.0040	-70.1226	Pichacani	-16.2515	-70.1535
Santiago De Pupuja	-15.0843	-70.2535	Capazo	-17.0989	-69.7090
Pisacoma	-16.9008	-69.4271	Santa Rosa	-16.8830	-69.8464
Amantani	-15.6672	-69.7114	Antauta	-14.3473	-70.3882
Atuncolla	-15.6850	-70.1590	Asillo	-14.7452	-70.3487
Cabana	-15.6355	-70.2694	Macari	-14.7006	-70.9257
Calapuja	-15.3187	-70.2231	Nuñoa	-14.3348	-70.6788
Caminaca	-15.3044	-70.0870	Orurillo	-14.6947	-70.4885
Capachica	-15.6546	-69.8259	Santa Rosa	-14.5489	-70.7919
Caracoto	-15.5708	-70.0829	Pilcuyo	-16.1039	-69.5165
Coata	-15.5327	-69.9191	Crucero	-14.3443	-69.8855
Huata	-15.6241	-69.9953	Muñani	-14.7042	-69.9629
Juliaca	-15.4615	-70.2136	Potoni	-14.4276	-70.0789
Paucarcolla	-15.7250	-70.0638	Putina	-14.7458	-69.8022
Pusi	-15.4425	-69.9733	San Antón	-14.5287	-70.2514
Samán	-15.3014	-70.0275	San José	-14.6977	-70.1851
San Miguel	-15.4020	-70.1232	Ollaraya	-16.2229	-68.9922
Taraco	-15.3044	-69.9472	Tinicachi	-16.1982	-68.9722
Ollachea	-13.7405	-70.5310	Unicachi	-16.2204	-68.9712
San Gabán	-13.5353	-70.4150	Conima	-15.4448	-69.4096
Ayaviri	-14.9594	-70.6062	Huayrapata	-15.2812	-69.2907
José Domingo Choquehuanca	-15.0219	-70.3189	Moho	-15.3377	-69.4572
Llalli	-14.9880	-70.9227	Tilali	-15.4894	-69.3323
Ocuviri	-15.1855	-70.8442	Ananea	-14.6923	-69.4870
Pucará	-15.0879	-70.4468	Cuyocuyo	-14.5287	-69.5613
Tirapata	-14.9267	-70.3814	Patambuco	-14.3354	-69.6416
Umachiri	-14.8904	-70.7561	Quiaca	-14.4930	-69.3680
Vilavila	-15.1783	-70.6443	Sandia	-14.8791	-69.4424
Cupi	-14.8761	-70.8942	Sina	-14.5347	-69.2461
Conduriri	-16.5565	-69.6065	Yanahuaya	-14.3562	-69.1211
Cuturapi	-16.2923	-69.1825	Ajoyani	-14.1867	-70.2246
Desaguadero	-16.6227	-69.0726	Coasa	-13.7673	-69.8290
Huacullani	-16.5989	-69.3938	Ituata	-13.8357	-70.1354
Ilave	-16.2652	-69.6822	Usicayos	-14.1658	-69.9301
Juli	-16.3252	-69.4937	Cojata	-15.0076	-69.4067
Kelluyo	-16.7440	-69.2320	Inchupalla	-15.0016	-69.6446
Pomata	-16.3637	-69.2781	Quilcapuncu	-14.8499	-69.6387
Yunguyo	-16.2852	-69.0925	Rosaspata	-15.2069	-69.4899
Zepita	-16.5037	-69.1677	Vilquechico	-15.1533	-69.6387
Cabanillas	-15.8792	-70.6006	Corani	-13.9398	-70.6916
Mañazo	-15.8963	-70.4141	Macusani	-14.0588	-70.4655

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla N°15 se muestran los datos geográficos de longitud y latitud de los 110 distritos de la región Puno. Para la obtención de las longitudes y latitudes se recurrió al software Google Earth, en el cual procedimos colocando el cursor en el centro de los distritos de la región Cusco, estos datos nos sirvieron para la aplicación de los modelos matemáticos expuestos en la presente investigación.

5.1.3. Recolección de datos meteorológicos

Luego de obtener la data geográfica (latitud y Longitud) de cada distrito, se recopiló la información proporcionada por el proyecto Modern-Era Retrospective análisis for Research and Applications (MERRA). Este sistema ayudó a obtener diferentes parámetros como, temperaturas máximas y mínimas a dos metros de altura la presión atmosférica, data requerida para la aplicación de los modelos matemáticos SHRP y LTPP, para posteriormente determinar el grado de desempeño de cada distrito de las regiones de Cusco y Puno.

Se procedió a la recopilación de datos, los cuales, de acuerdo a la metodología SUPERPAVE, se toma un registro de las temperaturas máximas y temperaturas mínimas registradas en cada día de los últimos 20 años (365 datos por año y 366 para los años bisiestos), para lo cual tomamos los años correspondientes al 2001-2020. Luego se procedió a calcular la máxima y mínima temperatura del aire, para ello la metodología SUPERPAVE indica los siguientes procedimientos:

5.1.4. Máxima y mínima temperatura del aire.

Para obtener la máxima temperatura del aire en el año, se determinó el promedio de la máxima temperatura registrada en 7 días consecutivos para los 365 días del año (366 para los años bisiestos), en un periodo de 20 años (2001 – 2020). Luego con los 359 datos (360 para los años bisiestos) de los promedios de la máxima temperatura obtenidos en un año, se determinó el valor máximo, ese valor fue asumido como la máxima temperatura del aire en un año, así precedimos a determinar para los años restantes, en la tabla N° 10

se muestra el procedimiento efectuado para la data de temperaturas del distrito de Acomayo de la región Cusco.

Tabla N° 16: Temperaturas máximas y mínimas del distrito de Acomayo región Cusco (2001-2020).

Día	2001			...	2020		
	T _{max} (°C)	T _p (°C)	T _{min} (°C)	...	T _{max} (°C)	T _p (°C)	T _{min} (°C)
1	15.69	14.85	3.97	...	12.00	14.19	2.11
2	16.44	14.55	2.20	...	12.00	14.85	4.12
3	15.35	14.45	3.31	...	16.56	15.26	4.08
4	11.81	14.16	1.56	...	11.94	15.03	1.98
5	15.76	14.58	3.15	...	16.52	15.30	2.37
6	16.03	14.44	2.62	...	16.70	14.88	2.31
7	12.90	14.37	3.21	...	13.60	14.61	2.99
:	:	:	:	:	:	:	:
359	17.26	17.75	2.90	...	16.59	14.38	1.33
360	18.01	-	2.84	...	15.23	13.58	1.30
361	17.69	-	4.58	...	15.14	-	1.38
362	17.78	-	4.36	...	12.44	-	1.50
363	17.25	-	3.58	...	14.15	-	1.30
364	18.47	-	4.65	...	15.48	-	2.65
365	17.76	-	4.48	...	11.65	-	2.23
366	-	-	-	...	10.98	-	1.03

Fuente: Elaboración Propia.

Consulte el Anexo de la presente tesis para obtener los datos completos de las temperaturas máximas y mínimas registradas en el día para cada distrito de estudio de la región de Cuzco y Puno para un periodo del 2001 – 2020.

$$T_{p1}2001 = (T_{max1}+T_{max2}+T_{max3}+T_{max4}+T_{max5}+T_{max6}+T_{max7}) / 7$$

$$T_{p2}2001 = (T_{max2}+T_{max3}+T_{max4}+T_{max5}+T_{max6}+T_{max7}+T_{max8}) / 7$$

$$T_{p3}2001 = (T_{max3}+T_{max4}+T_{max5}+T_{max6}+T_{max7}+T_{max8}+T_{max9}) / 7$$

:

$$T_{p359}2001 = (T_{max359}+T_{max360}+T_{max361}+T_{max362}+T_{max363}+T_{max364}+T_{max365}) / 7$$

Donde:

$T_{max1,2,3,4,5,6,7...359,360,361,362,364,365,366}$ = Temperatura máxima registrada en cada día.

$T_{p1,2,3...359,360}_{2001-2020}$ = Promedios de la temperatura máxima registrada en 7 días consecutivos en el periodo del 2001 - 2020.

Luego se determinó el valor máximo de los promedios de la Temperatura máxima registrada en 7 días consecutivos (359 datos por año y 360 datos para los años bisiestos), obteniéndose 20 datos para el periodo 2001 - 2020.

$$TpMAX_{2001-2020} = MAX (T_{p1}, T_{p2}, T_{p3} \dots T_{p359}, T_{p360})_{2001-2020}$$

Para el caso de la Temperatura mínima según la metodología Superpave se determina el mínimo valor de las temperaturas mínimas registradas en los 365 días del año, obteniéndose 20 datos para el periodo de 2001 – 2020.

$$TMIN_{2001-2020} = MIN (T_{min1}, T_{min2}, T_{min3} \dots T_{min365}, T_{min366})_{2001-2020}$$

Donde:

$TpMAX_{2001-2020}$ = Máximo valor de los promedios de la Temperatura máxima por año en el periodo 2001 – 2020.

$T_{min1,2,3...365,366}$ = Temperatura mínima registrada en el día.

$TpMAX_{2001-2020}$ = Mínimo valor de la Temperatura mínima por año en el periodo 2001 – 2020.

Tabla N° 17: Temperatura promedio máxima y mínima del distrito Acomayo (2001-2020)

Distrito Acomayo		
Año	TpMAX	TMIN
2001	18.68	-2.85
2002	19.04	-3.59
2003	20.66	-2.64
2004	18.90	-2.12
2005	19.42	-2.25
2006	18.79	-3.64
2007	19.76	-3.06
2008	19.48	-1.54
2009	20.30	-1.36
2010	19.63	-2.51
2011	19.60	-2.06
2012	20.13	-2.87
2013	18.96	-2.61
2014	20.71	-4.34
2015	21.31	-4.24
2016	20.63	-2.40

2017	20.74	-2.42
2018	19.40	-1.95
2019	19.91	-2.45
2020	21.33	-2.60

Fuente: Elaboración Propia.

Luego finalmente para determinar la temperatura del aire para un distrito se procedió a calcular el promedio y la desviación estándar de las temperaturas promedio máxima y las temperaturas mínimas de un periodo de 20 años.

$$T_{MAXAIR} = (TpMAX_{2001} + TpMAX_{2002} + TpMAX_{2003} \dots + TpMAX_{2020}) / 20$$

$$T_{MINAIR} = (TMIN_{2001} + TMIN_{2002} + TMIN_{2003} \dots + TMIN_{2020}) / 20$$

Donde:

T_{MAXAIR} = Temperatura máxima del aire

T_{MINAIR} = Temperatura mínima del aire

A continuación, presentamos las temperaturas máximas y mínimas obtenidas para los distritos de las regiones de Cuzco y Puno en un periodo de 20 años:

Tabla N° 18: Temperaturas máximas y mínimas del aire de los distritos de la región Cuzco

Distritos	Región Cuzco			
	T_{MAXAIR}	T_{MINAIR}	Des. Est. T_{MAX}	Des. Est. T_{MIN}
Megantoni	33.95	14.92	0.549	0.687
Echarate	30.01	12.28	0.521	0.585
Kosñipata	27.61	10.96	0.775	0.648
Quellouno	27.11	10.58	0.775	0.648
Kimbiri	25.20	7.30	0.672	0.602
Pichari	25.20	7.30	0.672	0.602
Villa Kintiarina	22.87	3.92	0.674	0.774
Huayopata	22.63	4.26	0.849	0.790
Inkawasi	22.63	4.26	0.849	0.790
Machupicchu	22.63	4.26	0.849	0.790
Maranura	22.63	4.26	0.849	0.790
Ocobamba	22.63	4.26	0.849	0.790
Ollantaytambo	22.63	4.26	0.849	0.790
Santa Ana	22.63	4.26	0.849	0.790
Challabamba	21.06	3.22	0.614	0.828
Lares	21.06	3.22	0.614	0.828
Urubamba	21.06	3.22	0.614	0.828
Yanatile	21.06	3.22	0.614	0.828

Vilcabamba	20.86	3.30	0.711	0.792
Villa Virgen	20.86	3.30	0.711	0.792
Camanti	19.98	5.15	0.495	0.914
Accha	19.87	-2.68	0.823	0.790
Acomayo	19.87	-2.68	0.823	0.790
Acos	19.87	-2.68	0.823	0.790
Capacmarca	19.87	-2.68	0.823	0.790
Ccapi	19.87	-2.68	0.823	0.790
Colcha	19.87	-2.68	0.823	0.790
Colquemarca	19.87	-2.68	0.823	0.790
Huaro	19.87	-2.68	0.823	0.790
Omacha	19.87	-2.68	0.823	0.790
Paccaritambo	19.87	-2.68	0.823	0.790
Pillpinto	19.87	-2.68	0.823	0.790
Pomacanchi	19.87	-2.68	0.823	0.790
Rondocan	19.87	-2.68	0.823	0.790
Sangarará	19.87	-2.68	0.823	0.790
Chamaca	19.25	-5.46	0.723	0.720
Coporaque	19.25	-5.46	0.723	0.720
Livitaca	19.25	-5.46	0.723	0.720
Velille	19.25	-5.46	0.723	0.720
Espinar	19.22	-6.78	0.595	0.490
Ocoruro	19.22	-6.78	0.595	0.490
Pallpata	19.22	-6.78	0.595	0.490
Condoroma	18.84	-6.69	0.490	0.431
Alto Pichigua	18.68	-5.93	0.668	0.737
Checca	18.68	-5.93	0.668	0.737
Kunturkanki	18.68	-5.93	0.668	0.737
Langui	18.68	-5.93	0.668	0.737
Layo	18.68	-5.93	0.668	0.737
Marangani	18.68	-5.93	0.668	0.737
Pichigua	18.68	-5.93	0.668	0.737
Quehue	18.68	-5.93	0.668	0.737
Sicuani	18.68	-5.93	0.668	0.737
Yanaoca	18.68	-5.93	0.668	0.737
Ancahuasi	18.60	-1.35	0.872	0.908
Chinchaypujio	18.60	-1.35	0.872	0.908
Huarocondo	18.60	-1.35	0.872	0.908
Limatambo	18.60	-1.35	0.872	0.908
Mollepata	18.60	-1.35	0.872	0.908
Santa Teresa	18.60	-1.35	0.872	0.908
Zurite	18.60	-1.35	0.872	0.908
Suyckutambo	17.99	-6.94	0.505	0.408
Andahuaylillas	17.91	-2.33	0.687	0.886
Anta	17.91	-2.33	0.687	0.886
Cachimayo	17.91	-2.33	0.687	0.886

Caicay	17.91	-2.33	0.687	0.886
Calca	17.91	-2.33	0.687	0.886
Ccorca	17.91	-2.33	0.687	0.886
Chincho	17.91	-2.33	0.687	0.886
Colquepata	17.91	-2.33	0.687	0.886
Coya	17.91	-2.33	0.687	0.886
Cusco	17.91	-2.33	0.687	0.886
Huancarani	17.91	-2.33	0.687	0.886
Huanoquite	17.91	-2.33	0.687	0.886
Huayllabamba	17.91	-2.33	0.687	0.886
Lamay	17.91	-2.33	0.687	0.886
Lucre	17.91	-2.33	0.687	0.886
Maras	17.91	-2.33	0.687	0.886
Oropesa	17.91	-2.33	0.687	0.886
Paruro	17.91	-2.33	0.687	0.886
Pisac	17.91	-2.33	0.687	0.886
Poroy	17.91	-2.33	0.687	0.886
Pucyura	17.91	-2.33	0.687	0.886
San Jerónimo	17.91	-2.33	0.687	0.886
San Salvador	17.91	-2.33	0.687	0.886
San Sebastián	17.91	-2.33	0.687	0.886
Santiago	17.91	-2.33	0.687	0.886
Saylla	17.91	-2.33	0.687	0.886
Taray	17.91	-2.33	0.687	0.886
Urcos	17.91	-2.33	0.687	0.886
Wanchaq	17.91	-2.33	0.687	0.886
Yaurisque	17.91	-2.33	0.687	0.886
Yucay	17.91	-2.33	0.687	0.886
Ccarhuayo	16.96	0.94	0.544	0.822
Ccatcca	16.96	0.94	0.544	0.822
Marcapata	16.96	0.94	0.544	0.822
Ocongate	16.96	0.94	0.544	0.822
Paucartambo	16.96	0.94	0.544	0.822
Llusco	16.59	-6.26	0.686	0.582
Quiñota	16.59	-6.26	0.686	0.582
Santo Tomas	16.59	-6.26	0.686	0.582
Acopia	15.64	-5.26	0.681	0.762
Checacupe	15.64	-5.26	0.681	0.762
Combapata	15.64	-5.26	0.681	0.762
Cusipata	15.64	-5.26	0.681	0.762
Mosoc Llacta	15.64	-5.26	0.681	0.762
Pampamarca	15.64	-5.26	0.681	0.762
Pitumarca	15.64	-5.26	0.681	0.762
Quiquijana	15.64	-5.26	0.681	0.762
San Pablo	15.64	-5.26	0.681	0.762
San Pedro	15.64	-5.26	0.681	0.762

Tinta	15.64	-5.26	0.681	0.762
Tupac Amaru	15.64	-5.26	0.681	0.762

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la Tabla N° 18 destacamos que en la región Cuzco, el distrito de Megatoni se encontró el mayor valor de la temperatura máxima del aire, registrando un valor de 33.95°C esto debido a que dicho distrito se encuentra en la zona de selva de la región Cuzco, lo cual evidencia las altas temperaturas registradas durante el día y el menor valor de la temperatura mínima del aire se encontró en los distritos de Espinar, Ocoruro y Pallpata registrando un valor de -6.79°C, estos distritos se encuentran en la zona de sierra baja de la región Cuzco limítrofe con la región Puno donde se evidencian bajas temperaturas, además de ello se presenta en la tabla las desviaciones estándar tanto para la data de las temperatura mínimas como las temperaturas máximas.

Tabla N° 19: Temperaturas máximas y mínimas del aire de los distritos de la región Puno.

Distritos	Región Puno			
	T _{MAXAIR}	T _{MINAIR}	Des. Est. T _{MAX}	Des. Est. T _{MIN}
San Pedro De Putina Punco	34.46	13.01	1.350	1.145
Ayapata	29.09	11.31	1.204	0.679
Alto Inambari	23.36	7.94	0.879	0.741
Limbari	23.36	7.94	0.879	0.741
Phara	23.36	7.94	0.879	0.741
San Juan Del Oro	23.36	7.94	0.879	0.741
Achaya	20.82	-6.15	0.797	0.761
Arapa	20.82	-6.15	0.797	0.761
Azángaro	20.82	-6.15	0.797	0.761
Chupa	20.82	-6.15	0.797	0.761
Huancané	20.82	-6.15	0.797	0.761
Huatasani	20.82	-6.15	0.797	0.761
Nicasio	20.82	-6.15	0.797	0.761
Pedro Vilca Apaza	20.82	-6.15	0.797	0.761
San Juan De Salinas	20.82	-6.15	0.797	0.761
Santiago De Pupuja	20.82	-6.15	0.797	0.761
Pisacoma	20.45	-6.54	0.449	0.336

Amantani	20.19	-4.08	0.574	0.482
Atuncolla	20.19	-4.08	0.574	0.482
Cabana	20.19	-4.08	0.574	0.482
Calapuja	20.19	-4.08	0.574	0.482
Caminaca	20.19	-4.08	0.574	0.482
Capachica	20.19	-4.08	0.574	0.482
Caracoto	20.19	-4.08	0.574	0.482
Coata	20.19	-4.08	0.574	0.482
Huata	20.19	-4.08	0.574	0.482
Juliaca	20.19	-4.08	0.574	0.482
Paucarcolla	20.19	-4.08	0.574	0.482
Pusi	20.19	-4.08	0.574	0.482
Samán	20.19	-4.08	0.574	0.482
San Miguel	20.19	-4.08	0.574	0.482
Taraco	20.19	-4.08	0.574	0.482
Ollachea	19.98	5.15	0.495	0.914
San Gabán	19.98	5.15	0.495	0.914
Ayaviri	19.66	-7.22	0.814	0.513
José Domingo Choquehuanca	19.66	-7.22	0.814	0.513
Llalli	19.66	-7.22	0.814	0.513
Ocuviri	19.66	-7.22	0.814	0.513
Pucará	19.66	-7.22	0.814	0.513
Tirapata	19.66	-7.22	0.814	0.513
Umachiri	19.66	-7.22	0.814	0.513
Vilavila	19.66	-7.22	0.814	0.513
Cupi	19.66	-7.22	0.814	0.513
Conduriri	19.18	-4.41	0.505	0.440
Cuturapi	19.18	-4.41	0.505	0.440
Desaguadero	19.18	-4.41	0.505	0.440
Huacullani	19.18	-4.41	0.505	0.440
Ilave	19.18	-4.41	0.505	0.440
Juli	19.18	-4.41	0.505	0.440
Kelluyo	19.18	-4.41	0.505	0.440
Pomata	19.18	-4.41	0.505	0.440
Yunguyo	19.18	-4.41	0.505	0.440
Zepita	19.18	-4.41	0.505	0.440
Cabanillas	19.04	-7.27	0.703	0.495
Mañazo	19.04	-7.27	0.703	0.495
San Antonio	19.04	-7.27	0.703	0.495
Anapia	18.95	-4.75	0.655	0.568
Copani	18.95	-4.75	0.655	0.568
Palca	18.95	-7.35	0.659	0.369
Cabanilla	18.95	-7.35	0.659	0.369
Lampa	18.95	-7.35	0.659	0.369
Paratia	18.95	-7.35	0.659	0.369

Santa Lucía	18.95	-7.35	0.659	0.369
Chucuito	18.75	-4.70	0.579	0.362
Platería	18.75	-4.70	0.579	0.362
Puno	18.75	-4.70	0.579	0.362
Tiquillaca	18.75	-4.70	0.579	0.362
Vilque	18.75	-4.70	0.579	0.362
Acora	18.56	-7.16	0.497	0.385
Pichacani	18.56	-7.16	0.497	0.385
Capazo	18.36	-6.65	0.435	0.407
Santa Rosa	18.36	-6.65	0.435	0.407
Antauta	18.36	-6.28	0.792	0.702
Asillo	18.36	-6.28	0.792	0.702
Macari	18.36	-6.28	0.792	0.702
Nuñoa	18.36	-6.28	0.792	0.702
Orurillo	18.36	-6.28	0.792	0.702
Santa Rosa	18.36	-6.28	0.792	0.702
Pilcuyo	17.19	0.31	0.428	0.731
Crucero	16.66	-6.31	0.860	0.573
Muñani	16.66	-6.31	0.860	0.573
Potoni	16.66	-6.31	0.860	0.573
Putina	16.66	-6.31	0.860	0.573
San Antón	16.66	-6.31	0.860	0.573
San José	16.66	-6.31	0.860	0.573
Ollaraya	16.63	-1.89	0.541	0.572
Tinicachi	16.63	-1.89	0.541	0.572
Unicachi	16.63	-1.89	0.541	0.572
Conima	16.59	-0.77	0.536	0.527
Huayrapata	16.59	-0.77	0.536	0.527
Moho	16.59	-0.77	0.536	0.527
Tilali	16.59	-0.77	0.536	0.527
Ananea	16.33	-2.15	0.606	0.500
Cuyocuyo	16.33	-2.15	0.606	0.500
Patambuco	16.33	-2.15	0.606	0.500
Quiaca	16.33	-2.15	0.606	0.500
Sandia	16.33	-2.15	0.606	0.500
Sina	16.33	-2.15	0.606	0.500
Yanahuaya	16.33	-2.15	0.606	0.500
Ajoyani	15.94	-1.29	0.625	0.505
Coasa	15.94	-1.29	0.625	0.505
Ituata	15.94	-1.29	0.625	0.505
Usicayos	15.94	-1.29	0.625	0.505
Cojata	15.59	-5.39	0.699	0.445
Inchupalla	15.59	-5.39	0.699	0.445
Quilcapuncu	15.59	-5.39	0.699	0.445
Rosaspata	15.59	-5.39	0.699	0.445
Vilquechico	15.59	-5.39	0.699	0.445

Corani	13.60	-4.83	0.521	0.859
Macusani	13.60	-4.83	0.521	0.859

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la Tabla N° 19 destacamos que en la región Puno, el distrito de San Pedro De Putina Punco se encontró el mayor valor de la temperatura máxima del aire, registrando un valor de 34.46°C, esto debido a que dicho distrito se encuentra en la zona de selva de la región Puno lo cual evidencia las altas temperaturas registradas durante el día y el menor valor de la temperatura mínima del aire se encontró en los distritos de Palca, Cabanilla, Lampa, Paratía y Santa Lucia, registrando un valor de -7.35°C, estos distritos se encuentran en la zona central de sierra de la región Puno, además de ello se presenta en la tabla las desviaciones estándar tanto para la data de las temperatura mínimas como las temperaturas máximas.

5.1.5. Máxima y mínima temperatura del aire con una confiabilidad al 98% y 50%.

La metodología SUPERPAVE conjuntamente realiza una distribución de las temperaturas del pavimento a partir de las temperaturas del aire. Esta distribución va asociada a un riesgo probable respecto a la elección de la temperatura. La confiabilidad que demos a la temperatura significara que esta no será superada durante tiempo determinado, sea por ejemplo un año. Por lo tanto, la elección de la temperatura del aire debe estar hecha para que obtener un mínimo riesgo en la elección del mismo. Esto va a depender de algunos factores, como la clasificación de la carretera, el presupuesto designado al proyecto, entre otros.

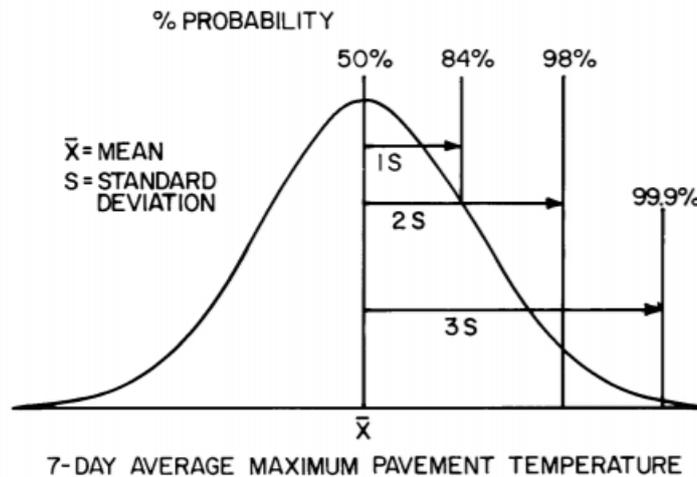


Figura N° 25: Distribución de probabilidad para el promedio de los 7 días con máximas temperaturas en el pavimento.

Fuente: Manual for New Construction and Overlays (2012).

Este valor de confiabilidad debe agregarse al valor promedio a las altas y bajas temperaturas, con el fin de que se analice y adecuado la mejor al proyecto. La temperatura de acuerdo a la confiabilidad y desviación estándar se presenta en la siguiente ecuación:

$$T_{MAXAIR98\%,50\%} = T_{MAXAIR} + \sigma \times Z_{98\%,50\%}$$

$$T_{MINAIR98\%,50\%} = T_{MINAIR} - \sigma \times Z_{98\%,50\%}$$

Donde:

$T_{MAXAIR98\%}$ = Temperatura máxima del aire a una confiabilidad del 98%

$T_{MAXAIR50\%}$ = Temperatura máxima del aire a una confiabilidad del 50%

$T_{MINAIR98\%}$ = Temperatura mínima del aire a una confiabilidad del 98%

$T_{MINAIR50\%}$ = Temperatura mínima del aire a una confiabilidad del 50%

σ = Desviación Estándar

$Z_{98\%}$ = Confiabilidad del 98% ($Z = 2.32$)

$Z_{50\%}$ = Confiabilidad del 98% ($Z = 0.6745$)

De la tabla N° 18 y N° 19 habiendo hallado la temperatura máxima, temperatura mínima, desviación estándar de las temperaturas máximas y desviación estándar de las temperaturas mínimas procedemos a realizar los cálculos para obtener las temperaturas máximas y mínimas al 98% y 50% para

los distritos de estudio de las regiones de Cuzco y Puno. Los resultados se aprecian en la siguiente tabla:

Tabla N° 20: Temperatura máxima y mínima del aire con una confiabilidad del 98% y 50%, de los distritos de la región Cuzco

Región Cuzco				
Distritos	Temperatura de aire 98%		Temperatura del aire 50%	
	T _{MAXAIR98%}	T _{MINAIR98%}	T _{MAXAIR50%}	T _{MINAIR50%}
Megantoni	35.23	13.33	34.32	14.46
Echarate	31.22	10.92	30.36	11.88
Kosñipata	29.41	9.46	28.13	10.53
Quellouno	28.91	9.08	27.63	10.14
Kimbiri	26.76	5.91	25.65	6.90
Pichari	26.76	5.91	25.65	6.90
Villa Kintiarina	24.43	2.13	23.32	3.40
Huayopata	24.60	2.43	23.20	3.72
Inkawasi	24.60	2.43	23.20	3.72
Machupicchu	24.60	2.43	23.20	3.72
Maranura	24.60	2.43	23.20	3.72
Ocobamba	24.60	2.43	23.20	3.72
Ollantaytambo	24.60	2.43	23.20	3.72
Santa Ana	24.60	2.43	23.20	3.72
Challabamba	22.49	1.30	21.48	2.66
Lares	22.49	1.30	21.48	2.66
Urubamba	22.49	1.30	21.48	2.66
Yanatile	22.49	1.30	21.48	2.66
Vilcabamba	22.51	1.46	21.34	2.77
Villa Virgen	22.51	1.46	21.34	2.77
Camanti	21.13	3.03	20.31	4.53
Accha	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Acomayo	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Acos	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Capacmarca	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Ccapi	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Colcha	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Colquemarca	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Huaro	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Omacha	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Paccaritambo	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Pillpinto	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Pomacanchi	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Rondocan	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Sangarará	21.78	-4.51	20.42	-3.21
Chamaca	20.93	-7.13	19.74	-5.95
Coporaque	20.93	-7.13	19.74	-5.95

Livitaca	20.93	-7.13	19.74	-5.95
Velille	20.93	-7.13	19.74	-5.95
Espinar	20.60	-7.92	19.63	-7.11
Ocoruro	20.60	-7.92	19.63	-7.11
Pallpata	20.60	-7.92	19.63	-7.11
Condorama	19.98	-7.69	19.17	-6.98
Alto Pichigua	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Checca	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Kunturkanki	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Langui	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Layo	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Marangani	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Pichigua	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Quehue	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Sicuani	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Yanaoca	20.23	-7.64	19.13	-6.43
Ancahuasi	20.62	-3.46	19.19	-1.96
Chinchaypujio	20.62	-3.46	19.19	-1.96
Huarocondo	20.62	-3.46	19.19	-1.96
Limatambo	20.62	-3.46	19.19	-1.96
Mollepata	20.62	-3.46	19.19	-1.96
Santa Teresa	20.62	-3.46	19.19	-1.96
Zurite	20.62	-3.46	19.19	-1.96
Suyckutambo	19.16	-7.89	18.33	-7.22
Andahuaylillas	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Anta	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Cachimayo	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Caicay	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Calca	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Ccorca	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Chincho	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Colquepata	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Coya	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Cusco	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Huancarani	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Huanoquite	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Huayllabamba	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Lamay	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Lucre	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Maras	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Oropesa	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Paruro	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Pisac	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Poroy	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Pucyura	19.51	-4.39	18.38	-2.93
San Jerónimo	19.51	-4.39	18.38	-2.93

San Salvador	19.51	-4.39	18.38	-2.93
San Sebastián	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Santiago	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Saylla	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Taray	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Urcos	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Wanchaq	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Yaurisque	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Yucay	19.51	-4.39	18.38	-2.93
Ccarhuayo	18.22	-0.97	17.32	0.38
Ccatcca	18.22	-0.97	17.32	0.38
Marcapata	18.22	-0.97	17.32	0.38
Ocongate	18.22	-0.97	17.32	0.38
Paucartambo	18.22	-0.97	17.32	0.38
Llusco	18.18	-7.61	17.05	-6.65
Quiñota	18.18	-7.61	17.05	-6.65
Santo Tomas	18.18	-7.61	17.05	-6.65
Acopia	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Checacupe	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Combapata	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Cusipata	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Mosoc Llacta	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Pampamarca	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Pitumarca	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Quiquijana	17.22	-7.03	16.10	-5.78
San Pablo	17.22	-7.03	16.10	-5.78
San Pedro	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Tinta	17.22	-7.03	16.10	-5.78
Tupac Amaru	17.22	-7.03	16.10	-5.78

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la Tabla N° 20 asumiendo un nivel de confiabilidad de 50% destacamos que en la región Cuzco, el distrito de Megatoni se encontró el mayor valor de la temperatura máxima del aire, registrando un valor de 35.23°C para una confiabilidad del 98% y un valor de 34.32°C para una confiabilidad del 50%, el menor valor de la temperatura mínima del aire se encontró en los distritos de Espinar, Ocoruro y Pallpata registrando un valor de -7.92°C para una confiabilidad del 98% y un valor de -7.11 para una confiabilidad del 50%, estos incrementos de temperaturas están asociados a la desviación estándar que presenta la data obtenida con el proyecto MERRA-2 (NASA).

Tabla N° 21: Temperatura máxima y mínima del aire con una confiabilidad del 98% y 50%, de los distritos de la región Puno

Distritos	Región Puno			
	Temperatura de aire 98%		Temperatura de aire 50%	
	T _{MAXAIR98%}	T _{MINAIR98%}	T _{MAXAIR50%}	T _{MINAIR50%}
San Pedro De Putina Punco	37.59	10.36	35.37	12.24
Ayapata	31.88	9.74	29.90	10.85
Alto Inambari	25.40	6.22	23.95	7.44
Limbani	25.40	6.22	23.95	7.44
Phara	25.40	6.22	23.95	7.44
San Juan Del Oro	25.40	6.22	23.95	7.44
Achaya	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Arapa	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Azángaro	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Chupa	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Huancané	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Huatasani	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Nicasio	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Pedro Vilca Apaza	22.67	-7.91	21.36	-6.66
San Juan De Salinas	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Santiago De Pupuja	22.67	-7.91	21.36	-6.66
Pisacoma	21.49	-7.32	20.75	-6.77
Amantani	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Atuncolla	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Cabana	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Calapuja	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Caminaca	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Capachica	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Caracoto	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Coata	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Huata	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Juliaca	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Paucarcolla	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Pusi	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Samán	21.53	-5.20	20.58	-4.41
San Miguel	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Taraco	21.53	-5.20	20.58	-4.41
Ollachea	21.13	3.03	20.31	4.53
San Gabán	21.13	3.03	20.31	4.53
Ayaviri	21.55	-8.41	20.21	-7.57

José Domingo	21.55	-8.41	20.21	-7.57
Choquehuanca				
Llalli	21.55	-8.41	20.21	-7.57
Ocuviri	21.55	-8.41	20.21	-7.57
Pucará	21.55	-8.41	20.21	-7.57
Tirapata	21.55	-8.41	20.21	-7.57
Umachiri	21.55	-8.41	20.21	-7.57
Vilavila	21.55	-8.41	20.21	-7.57
Cupi	21.55	-8.41	20.21	-7.57
Conduriri	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Cuturapi	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Desaguadero	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Huacullani	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Ilave	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Juli	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Kelluyo	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Pomata	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Yunguyo	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Zepita	20.35	-5.43	19.52	-4.71
Cabanillas	20.67	-8.41	19.51	-7.60
Mañazo	20.67	-8.41	19.51	-7.60
San Antonio	20.67	-8.41	19.51	-7.60
Anapia	20.47	-6.07	19.39	-5.14
Copani	20.47	-6.07	19.39	-5.14
Palca	20.48	-8.21	19.40	-7.60
Cabanilla	20.48	-8.21	19.40	-7.60
Lampa	20.48	-8.21	19.40	-7.60
Paratia	20.48	-8.21	19.40	-7.60
Santa Lucía	20.48	-8.21	19.40	-7.60
Chucuito	20.09	-5.54	19.14	-4.95
Platería	20.09	-5.54	19.14	-4.95
Puno	20.09	-5.54	19.14	-4.95
Tiquillaca	20.09	-5.54	19.14	-4.95
Vilque	20.09	-5.54	19.14	-4.95
Acora	19.71	-8.05	18.89	-7.42
Pichacani	19.71	-8.05	18.89	-7.42
Capazo	19.37	-7.60	18.65	-6.93
Santa Rosa	19.37	-7.60	18.65	-6.93
Antauta	20.19	-7.91	18.89	-6.76
Asillo	20.19	-7.91	18.89	-6.76
Macari	20.19	-7.91	18.89	-6.76
Nuñoa	20.19	-7.91	18.89	-6.76
Orurillo	20.19	-7.91	18.89	-6.76
Santa Rosa	20.19	-7.91	18.89	-6.76
Pilcuyo	18.18	-1.38	17.48	-0.18
Crucero	18.65	-7.64	17.24	-6.70

Muñani	18.65	-7.64	17.24	-6.70
Potoni	18.65	-7.64	17.24	-6.70
Putina	18.65	-7.64	17.24	-6.70
San Antón	18.65	-7.64	17.24	-6.70
San José	18.65	-7.64	17.24	-6.70
Ollaraya	17.88	-3.22	16.99	-2.27
Tinicachi	17.88	-3.22	16.99	-2.27
Unicachi	17.88	-3.22	16.99	-2.27
Conima	17.83	-1.99	16.95	-1.13
Huayrapata	17.83	-1.99	16.95	-1.13
Moho	17.83	-1.99	16.95	-1.13
Tilali	17.83	-1.99	16.95	-1.13
Ananea	17.74	-3.31	16.74	-2.48
Cuyocuyo	17.74	-3.31	16.74	-2.48
Patambuco	17.74	-3.31	16.74	-2.48
Quiaca	17.74	-3.31	16.74	-2.48
Sandia	17.74	-3.31	16.74	-2.48
Sina	17.74	-3.31	16.74	-2.48
Yanahuaya	17.74	-3.31	16.74	-2.48
Ajoyani	17.39	-2.46	16.36	-1.63
Coasa	17.39	-2.46	16.36	-1.63
Ituata	17.39	-2.46	16.36	-1.63
Usicayos	17.39	-2.46	16.36	-1.63
Cojata	17.21	-6.42	16.06	-5.69
Inchupalla	17.21	-6.42	16.06	-5.69
Quilcapuncu	17.21	-6.42	16.06	-5.69
Rosaspata	17.21	-6.42	16.06	-5.69
Vilquechico	17.21	-6.42	16.06	-5.69
Corani	14.81	-6.83	13.95	-5.41
Macusani	14.81	-6.83	13.95	-5.41

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la Tabla N° 21 destacamos que en la región Puno, el distrito de San Pedro De Putina Punco se encontró el mayor valor de la temperatura máxima del aire, registrando un valor de 37.59°C para una confiabilidad del 98% y un valor de 35.37°C para una confiabilidad del 50%, y el menor valor de la temperatura mínima del aire se encontró en los distritos de Ayaviri, José Domingo Choquehuanca, Llalli, Ocuvi, Pucará, Tiparapata, Umachiri, Villavilla, Cupi, Cabanillas, Mañazo, San Antonio, registrando un valor de -8.41°C para una confiabilidad del 98% y un valor de -7.57°C para una confiabilidad del 50%, , estos incrementos de temperaturas están asociados a

la desviación estándar que presenta la data obtenida con el proyecto MERRA-2 (NASA).

5.2. Aplicación y análisis de los modelos matemáticos SHRP y LTPP.

Luego de haber obtenido las temperaturas máximas y mínimas del aire de los distritos de las regiones de Cuzco y Puno con una confiabilidad del 98% y 50%, procedimos a aplicar los modelos matemáticos proporcionados por el SHRP (Strategic Highway Research Program) y el LTPP (Long Term Pavement Performance) y con ello determinamos el Grado de Desempeño (PG). Respecto a la información de la aplicación de los modelos matemáticos esta proporcionada en el CAPITULO II, subíndice 2.3.

5.2.1. Modelo SHRP

Para el procedimiento de la aplicación de los modelos matemáticos SHRP Original – 1994 y SHRP canadiense, seleccionamos como ejemplo el distrito de Acomayo de la región Cuzco y determinamos la temperatura máxima y mínima del pavimento a 20 mm de profundidad.

Tabla N° 22: Latitud, temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad del distrito de Acomayo.

Distrito Acomayo				
Latitud (°)	T _{MAXAIR98%}	T _{MINAIR98%}	T _{MAXAIR50%}	T _{MINAIR50%}
-13.8983	21.78	-4.51	20.42	-3.21

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.1.1. SHRP Original - 1994.

$$T_{MAX} = 0.9545 \times (T_{MAXAIR} - 0.00618 \times lat^2 + 0.2289 \times lat + 42.2) - 17.78$$

$$T_{MIN} = T_{MINAIR}$$

a) Confiabilidad al 98%

$$T_{MAX98\%} = 0.9545 \times (21.78 - 0.00618 \times 13.8983^2 + 0.2289 \times 13.8983 + 42.2) - 17.78$$

$$T_{MAX98\%} = 45.19 \text{ °C}$$

$$T_{MIN98\%} = -4.51 \text{ °C}$$

b) Confiabilidad al 50 %

$$TMAX_{50\%} = 0.9545 \times (20.42 - 0.00618 \times 13.8983^2 + 0.2289 \times 13.8983 + 42.2) - 17.78$$

$$TMAX_{50\%} = 43.89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$TMIN_{50\%} = -3.21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5.2.1.2. SHRP Canadiense

$$TMIN = 0.859 \times T_{MINAIR} + 1.7$$

a) Confiabilidad al 98%

$$TMIN_{98\%} = 0.859 \times -4.51 + 1.7$$

$$TMIN_{98\%} = -2.17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

b) Confiabilidad al 50%

$$TMIN_{50\%} = 0.859 \times -3.21 + 1.7$$

$$TMIN_{50\%} = -1.06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla N° 23: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo SHRP-1994 y el SHRP Canadiense de los distritos de la región Cusco.

Distritos	Región Cusco					
	SHRP					
	1994				Canadiense	
	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMIN	TMIN
	98%	98%	50%	50%	98%	50%
Megantoni	57.88	13.33	57.02	14.46	13.15	14.12
Echarate	54.11	10.92	53.29	11.88	11.08	11.91
Kosñipata	52.41	9.46	51.19	10.53	9.83	10.74
Quellouno	51.90	9.08	50.68	10.14	9.50	10.41
Kimbiri	49.86	5.91	48.80	6.90	6.77	7.62
Pichari	49.84	5.91	48.79	6.90	6.77	7.62
Villa Kintiarina	47.65	2.13	46.60	3.40	3.53	4.62
Huayopata	47.83	2.43	46.49	3.72	3.78	4.90
Inkawasi	47.84	2.43	46.51	3.72	3.78	4.90
Machupicchu	47.84	2.43	46.50	3.72	3.78	4.90
Maranura	47.82	2.43	46.49	3.72	3.78	4.90
Ocobamba	47.82	2.43	46.49	3.72	3.78	4.90
Ollantaytambo	47.84	2.43	46.50	3.72	3.78	4.90
Santa Ana	47.82	2.43	46.48	3.72	3.78	4.90
Challabamba	45.82	1.30	44.85	2.66	2.81	3.98

Lares	45.81	1.30	44.85	2.66	2.81	3.98
Urubamba	45.82	1.30	44.86	2.66	2.81	3.98
Yanatile	45.79	1.30	44.83	2.66	2.81	3.98
Vilcabamba	45.83	1.46	44.72	2.77	2.96	4.08
Villa Virgen	45.83	1.46	44.71	2.77	2.96	4.08
Camanti	44.53	3.03	43.75	4.53	4.30	5.59
Accha	45.19	-4.51	43.90	-3.21	-2.17	-1.06
Acomayo	45.19	-4.51	43.89	-3.21	-2.17	-1.06
Acos	45.19	-4.51	43.89	-3.21	-2.17	-1.06
Capacmarca	45.19	-4.51	43.90	-3.21	-2.17	-1.06
Ccapi	45.18	-4.51	43.89	-3.21	-2.17	-1.06
Colcha	45.18	-4.51	43.89	-3.21	-2.17	-1.06
Colquemarca	45.20	-4.51	43.91	-3.21	-2.17	-1.06
Huaro	45.18	-4.51	43.88	-3.21	-2.17	-1.06
Omacha	45.20	-4.51	43.90	-3.21	-2.17	-1.06
Paccaritambo	45.18	-4.51	43.89	-3.21	-2.17	-1.06
Pillpinto	45.19	-4.51	43.90	-3.21	-2.17	-1.06
Pomacanchi	45.19	-4.51	43.90	-3.21	-2.17	-1.06
Rondocan	45.18	-4.51	43.89	-3.21	-2.17	-1.06
Sangarará	45.19	-4.51	43.90	-3.21	-2.17	-1.06
Chamaca	44.39	-7.13	43.26	-5.95	-4.43	-3.41
Coporaque	44.41	-7.13	43.28	-5.95	-4.43	-3.41
Livitaca	44.39	-7.13	43.26	-5.95	-4.43	-3.41
Velille	44.40	-7.13	43.27	-5.95	-4.43	-3.41
Espinar	44.11	-7.92	43.18	-7.11	-5.10	-4.41
Ocoruro	44.12	-7.92	43.19	-7.11	-5.10	-4.41
Pallpata	44.11	-7.92	43.18	-7.11	-5.10	-4.41
Condorama	43.53	-7.69	42.76	-6.98	-4.90	-4.29
Alto Pichigua	43.75	-7.64	42.70	-6.43	-4.86	-3.82
Checca	43.74	-7.64	42.69	-6.43	-4.86	-3.82
Kunturkanki	43.74	-7.64	42.69	-6.43	-4.86	-3.82
Langui	43.73	-7.64	42.68	-6.43	-4.86	-3.82
Layo	43.74	-7.64	42.69	-6.43	-4.86	-3.82
Marangani	43.73	-7.64	42.68	-6.43	-4.86	-3.82
Pichigua	43.75	-7.64	42.70	-6.43	-4.86	-3.82
Quehue	43.73	-7.64	42.68	-6.43	-4.86	-3.82
Sicuani	43.73	-7.64	42.68	-6.43	-4.86	-3.82
Yanaoca	43.73	-7.64	42.68	-6.43	-4.86	-3.82
Ancahuasi	44.05	-3.46	42.69	-1.96	-1.27	0.01
Chinchaypujio	44.06	-3.46	42.69	-1.96	-1.27	0.01
Huarocondo	44.05	-3.46	42.68	-1.96	-1.27	0.01
Limatambo	44.06	-3.46	42.69	-1.96	-1.27	0.01
Mollepata	44.06	-3.46	42.69	-1.96	-1.27	0.01
Santa Teresa	44.04	-3.46	42.67	-1.96	-1.27	0.01
Zurite	44.05	-3.46	42.69	-1.96	-1.27	0.01
Suykutambo	42.74	-7.89	41.95	-7.22	-5.08	-4.50

Andahuaylillas	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Anta	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Cachimayo	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Caicay	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Calca	42.98	-4.39	41.90	-2.93	-2.07	-0.82
Ccorca	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Chincho	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Colquepata	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Coya	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Cusco	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Huancarani	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Huanoquite	43.00	-4.39	41.93	-2.93	-2.07	-0.82
Huayllabamba	42.98	-4.39	41.90	-2.93	-2.07	-0.82
Lamay	42.98	-4.39	41.90	-2.93	-2.07	-0.82
Lucre	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Maras	42.98	-4.39	41.90	-2.93	-2.07	-0.82
Oropesa	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Paruro	43.01	-4.39	41.93	-2.93	-2.07	-0.82
Pisac	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Poroy	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Pucyura	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
San Jerónimo	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
San Salvador	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
San Sebastián	42.99	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Santiago	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Saylla	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Taray	42.99	-4.39	41.91	-2.93	-2.07	-0.82
Urcos	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Wanchaq	42.99	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Yaurisque	43.00	-4.39	41.92	-2.93	-2.07	-0.82
Yucay	42.98	-4.39	41.90	-2.93	-2.07	-0.82
Ccarhuayo	41.76	-0.97	40.91	0.38	0.87	2.03
Ccatcca	41.77	-0.97	40.92	0.38	0.87	2.03
Marcapata	41.77	-0.97	40.92	0.38	0.87	2.03
Ocongate	41.77	-0.97	40.92	0.38	0.87	2.03
Paucartambo	41.75	-0.97	40.90	0.38	0.87	2.03
Llusco	41.79	-7.61	40.71	-6.65	-4.83	-4.01
Quiñota	41.78	-7.61	40.70	-6.65	-4.83	-4.01
Santo Tomas	41.79	-7.61	40.71	-6.65	-4.83	-4.01
Acopia	40.84	-7.03	39.77	-5.78	-4.34	-3.26
Checacupe	40.84	-7.03	39.77	-5.78	-4.34	-3.26
Combapata	40.84	-7.03	39.77	-5.78	-4.34	-3.26
Cusipata	40.83	-7.03	39.76	-5.78	-4.34	-3.26
Mosoc Llacta	40.84	-7.03	39.77	-5.78	-4.34	-3.26
Pampamarca	40.85	-7.03	39.78	-5.78	-4.34	-3.26
Pitumarca	40.83	-7.03	39.76	-5.78	-4.34	-3.26

Quiquijana	40.83	-7.03	39.76	-5.78	-4.34	-3.26
San Pablo	40.85	-7.03	39.78	-5.78	-4.34	-3.26
San Pedro	40.85	-7.03	39.78	-5.78	-4.34	-3.26
Tinta	40.85	-7.03	39.78	-5.78	-4.34	-3.26
Tupac Amaru	40.85	-7.03	39.78	-5.78	-4.34	-3.26

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la tabla N° 23 se aplicó el modelo matemático SHRP Original -1994, y se obtuvo el mayor valor de la temperatura máxima del pavimento en el distrito de Megatoni, con un valor de 57.88°C para una confiabilidad del 98% y un valor de 57.02°C para una confiabilidad del 50%, en este modelo se consideró la temperatura del pavimento igual a la mínima temperatura del aire promedio registrada en el promedio de 20 años, posteriormente aplicando la corrección recomendada por el SHRP canadiense se obtuvo las temperaturas mínimas en los distros de Espinar, Ocoruro y Pallpa, registrando -7.92°C para una confiabilidad del 98% y un valor de -7.11°C para una confiabilidad del 50%.

Tabla N° 24: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo SHRP-1994 y el SHRP Canadiense de los distritos de la región Puno.

Distritos	Región Puno					
	SHRP					
	1994				Canadiense	
	TMAX	TMIN	TMAX	TMIN	TMIN	TMIN
	98%	98%	50%	50%	98%	50%
San Pedro De Putina Punco	60.26	10.36	58.14	12.24	10.60	12.21
Ayapata	54.81	9.74	52.92	10.85	10.06	11.02
Alto Inambari	48.65	6.22	47.27	7.44	7.05	8.09
Limbani	48.64	6.22	47.25	7.44	7.05	8.09
Phara	48.65	6.22	47.27	7.44	7.05	8.09
San Juan Del Oro	48.66	6.22	47.28	7.44	7.05	8.09
Achaya	46.10	-7.91	44.85	-6.66	-5.10	-4.02
Arapa	46.09	-7.91	44.84	-6.66	-5.10	-4.02
Azángaro	46.08	-7.91	44.83	-6.66	-5.10	-4.02
Chupa	46.09	-7.91	44.84	-6.66	-5.10	-4.02
Huancané	46.09	-7.91	44.84	-6.66	-5.10	-4.02
Huatasani	46.09	-7.91	44.84	-6.66	-5.10	-4.02
Nicasio	46.10	-7.91	44.84	-6.66	-5.10	-4.02

Pedro Vilca Apaza	46.09	-7.91	44.84	-6.66	-5.10	-4.02
San Juan De Salinas	46.09	-7.91	44.84	-6.66	-5.10	-4.02
Santiago De Pupuja	46.09	-7.91	44.84	-6.66	-5.10	-4.02
Pisacoma	45.02	-7.32	44.32	-6.77	-4.59	-4.11
Amantani	45.02	-5.20	44.12	-4.41	-2.77	-2.08
Atuncolla	45.02	-5.20	44.12	-4.41	-2.77	-2.08
Cabana	45.02	-5.20	44.12	-4.41	-2.77	-2.08
Calapuja	45.01	-5.20	44.11	-4.41	-2.77	-2.08
Caminaca	45.01	-5.20	44.11	-4.41	-2.77	-2.08
Capachica	45.02	-5.20	44.12	-4.41	-2.77	-2.08
Caracoto	45.02	-5.20	44.12	-4.41	-2.77	-2.08
Coata	45.02	-5.20	44.11	-4.41	-2.77	-2.08
Huata	45.02	-5.20	44.12	-4.41	-2.77	-2.08
Juliaca	45.01	-5.20	44.11	-4.41	-2.77	-2.08
Paucarcolla	45.02	-5.20	44.12	-4.41	-2.77	-2.08
Pusi	45.01	-5.20	44.11	-4.41	-2.77	-2.08
Samán	45.01	-5.20	44.11	-4.41	-2.77	-2.08
San Miguel	45.01	-5.20	44.11	-4.41	-2.77	-2.08
Taraco	45.01	-5.20	44.11	-4.41	-2.77	-2.08
Ollachea	44.56	3.03	43.78	4.53	4.30	5.59
San Gabán	44.54	3.03	43.77	4.53	4.30	5.59
Ayaviri	45.02	-8.41	43.74	-7.57	-5.53	-4.80
José Domingo Choquehuanca	45.02	-8.41	43.74	-7.57	-5.53	-4.80
Llalli	45.02	-8.41	43.74	-7.57	-5.53	-4.80
Ocuviri	45.03	-8.41	43.75	-7.57	-5.53	-4.80
Pucará	45.03	-8.41	43.75	-7.57	-5.53	-4.80
Tirapata	45.02	-8.41	43.74	-7.57	-5.53	-4.80
Umachiri	45.02	-8.41	43.74	-7.57	-5.53	-4.80
Vilavila	45.03	-8.41	43.75	-7.57	-5.53	-4.80
Cupi	45.02	-8.41	43.74	-7.57	-5.53	-4.80
Conduriri	43.93	-5.43	43.14	-4.71	-2.97	-2.35
Cuturapi	43.92	-5.43	43.13	-4.71	-2.97	-2.35
Desaguadero	43.93	-5.43	43.14	-4.71	-2.97	-2.35
Huacullani	43.93	-5.43	43.14	-4.71	-2.97	-2.35
Ilave	43.92	-5.43	43.13	-4.71	-2.97	-2.35
Juli	43.92	-5.43	43.13	-4.71	-2.97	-2.35
Kelluyo	43.93	-5.43	43.14	-4.71	-2.97	-2.35
Pomata	43.92	-5.43	43.13	-4.71	-2.97	-2.35
Yunguyo	43.92	-5.43	43.13	-4.71	-2.97	-2.35
Zepita	43.93	-5.43	43.13	-4.71	-2.97	-2.35
Cabanillas	44.21	-8.41	43.10	-7.60	-5.53	-4.83
Mañazo	44.21	-8.41	43.11	-7.60	-5.53	-4.83
San Antonio	44.21	-8.41	43.11	-7.60	-5.53	-4.83

Anapia	44.03	-6.07	43.01	-5.14	-3.52	-2.71
Copani	44.04	-6.07	43.01	-5.14	-3.52	-2.71
Palca	44.01	-8.21	42.98	-7.60	-5.35	-4.83
Cabanilla	44.02	-8.21	42.99	-7.60	-5.35	-4.83
Lampa	44.01	-8.21	42.98	-7.60	-5.35	-4.83
Paratia	44.02	-8.21	42.98	-7.60	-5.35	-4.83
Santa Lucía	44.02	-8.21	42.99	-7.60	-5.35	-4.83
Chucuito	43.66	-5.54	42.75	-4.95	-3.06	-2.55
Platería	43.67	-5.54	42.76	-4.95	-3.06	-2.55
Puno	43.66	-5.54	42.75	-4.95	-3.06	-2.55
Tiquillaca	43.66	-5.54	42.75	-4.95	-3.06	-2.55
Vilque	43.66	-5.54	42.75	-4.95	-3.06	-2.55
Acora	43.31	-8.05	42.53	-7.42	-5.21	-4.67
Pichacani	43.31	-8.05	42.53	-7.42	-5.21	-4.67
Capazo	43.00	-7.60	42.31	-6.93	-4.83	-4.25
Santa Rosa	42.99	-7.60	42.31	-6.93	-4.83	-4.25
Antauta	43.70	-7.91	42.45	-6.76	-5.09	-4.10
Asillo	43.71	-7.91	42.47	-6.76	-5.09	-4.10
Macari	43.71	-7.91	42.47	-6.76	-5.09	-4.10
Nuñoa	43.69	-7.91	42.45	-6.76	-5.09	-4.10
Orurillo	43.71	-7.91	42.47	-6.76	-5.09	-4.10
Santa Rosa	43.71	-7.91	42.46	-6.76	-5.09	-4.10
Pilcuyo	41.84	-1.38	41.17	-0.18	0.51	1.54
Crucero	42.22	-7.64	40.87	-6.70	-4.87	-4.06
Muñani	42.24	-7.64	40.89	-6.70	-4.87	-4.06
Potoni	42.23	-7.64	40.88	-6.70	-4.87	-4.06
Putina	42.24	-7.64	40.89	-6.70	-4.87	-4.06
San Antón	42.23	-7.64	40.88	-6.70	-4.87	-4.06
San José	42.24	-7.64	40.89	-6.70	-4.87	-4.06
Ollaraya	41.56	-3.22	40.71	-2.27	-1.06	-0.25
Tinicachi	41.56	-3.22	40.71	-2.27	-1.06	-0.25
Unicachi	41.56	-3.22	40.71	-2.27	-1.06	-0.25
Conima	41.49	-1.99	40.65	-1.13	-0.01	0.73
Huayrapata	41.48	-1.99	40.64	-1.13	-0.01	0.73
Moho	41.48	-1.99	40.64	-1.13	-0.01	0.73
Tilali	41.49	-1.99	40.65	-1.13	-0.01	0.73
Ananea	41.37	-3.31	40.42	-2.48	-1.14	-0.43
Cuyocuyo	41.36	-3.31	40.41	-2.48	-1.14	-0.43
Patambuco	41.35	-3.31	40.40	-2.48	-1.14	-0.43
Quiaca	41.36	-3.31	40.41	-2.48	-1.14	-0.43
Sandia	41.38	-3.31	40.43	-2.48	-1.14	-0.43
Sina	41.36	-3.31	40.41	-2.48	-1.14	-0.43
Yanahuaya	41.35	-3.31	40.40	-2.48	-1.14	-0.43
Ajoyani	41.01	-2.46	40.03	-1.63	-0.41	0.30
Coasa	40.99	-2.46	40.01	-1.63	-0.41	0.30

Ituata	40.99	-2.46	40.01	-1.63	-0.41	0.30
Usicayos	41.01	-2.46	40.03	-1.63	-0.41	0.30
Cojata	40.88	-6.42	39.78	-5.69	-3.81	-3.19
Inchupalla	40.88	-6.42	39.78	-5.69	-3.81	-3.19
Quilcapuncu	40.87	-6.42	39.78	-5.69	-3.81	-3.19
Rosaspata	40.89	-6.42	39.79	-5.69	-3.81	-3.19
Vilquechico	40.89	-6.42	39.79	-5.69	-3.81	-3.19
Corani	38.54	-6.83	37.72	-5.41	-4.16	-2.95
Macusani	38.54	-6.83	37.72	-5.41	-4.16	-2.95

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la tabla N° 24 se aplicó el modelo matemático SHRP Original -1994, y se obtuvo el mayor valor de la temperatura máxima del pavimento en el distrito de San Pedro De Putina Punco, con un valor de 60.26°C para una confiabilidad del 98% y un valor de 58.14°C para una confiabilidad del 50%, en este modelo se consideró la temperatura del pavimento igual a la mínima temperatura del aire promedio registrada en el promedio de 20 años, posteriormente aplicando la corrección recomendada por el SHRP canadiense se obtuvo las temperaturas mínimas en los distros de Ayaviri, José Domingo Choquehuanca, Llalli, Ocuvi, Pucará, Tiparapata, Umachiri, Villavilla, Cupi, Cabanillas, Mañazo, San Antonio registrando -8.41°C para una confiabilidad del 98% y un valor de 7.57°C para una confiabilidad del 50%.

5.2.2. Modelo LTPP

Para el procedimiento de la aplicación de los modelos matemáticos del LTPP-1996, LTPP 1998-2000 y LTPP 2004, seleccionamos como ejemplo el distrito de Acomayo de la región Cuzco y determinamos la temperatura máxima y mínima del pavimento a 20 mm de profundidad.

Tabla N° 25: Latitud, desviación Estándar, temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad del distrito de Acomayo.

Distrito de Acomayo						
Lat. (°)	σ T _{MAX}	σ T _{MIN}	T _{MAXAIR98%}	T _{MINAIR98%}	T _{MAXAIR50%}	T _{MINAIR50%}
-13.8983	0.823	0.790	21.78	-4.51	20.42	-3.21

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.2.1. LTPP - 1996

$$T_{MAX} = 54.32 + [0.77585T_{MAXAIR}] - [0.002468lat^2] - [15.137\log_{10}(H+25)]$$

$$T_{MIN} = -1.56 + [0.71819T_{MINAIR}] - [0.003966lat^2] + [6.264\log_{10}(H+25)]$$

Donde:

H = Profundidad del pavimento (2 cm).

a) Confiabilidad al 98%

$$T_{MAX98\%} = 54.32 + [0.77585 \times 21.78] - [0.002468 \times 13.8983^2] - [15.137 \times \log_{10}(2+25)]$$

$$T_{MX98\%} = 49.07 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{MIN98\%} = -1.56 + [0.71819 \times -4.51] - [0.003966 \times 13.8983^2] + [6.264 \times \log_{10}(2 + 25)]$$

$$T_{MIN98\%} = 3.40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

b) Confiabilidad al 50%

$$T_{MAX50\%} = 54.32 + [0.77585 \times 20.42] - [0.002468 \times 13.8983^2] - [15.137 \times \log_{10}(2+25)]$$

$$T_{MX50\%} = 48.02 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{MIN50\%} = -1.56 + [0.71819 \times -3.21] - [0.003966 \times 13.8983^2] + [6.264 \times \log_{10}(2 + 25)]$$

$$T_{MIN50\%} = 4.34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla N° 26: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo LTPP - 1996, de los distritos de la región Cuzco.

Distritos	Región Cuzco			
	LTPP - 1996			
	TMAX _{98%}	TMIN _{98%}	TMAX _{50%}	TMIN _{50%}
Megantoni	59.64	16.43	58.94	17.24
Echarate	56.49	14.63	55.83	15.32
Kosñipata	55.05	13.53	54.06	14.30
Quellouno	54.69	13.31	53.70	14.07
Kimbiri	53.02	11.02	52.16	11.73
Pichari	53.04	11.04	52.18	11.75
Villa Kintiarina	51.19	8.27	50.33	9.19
Huayopata	51.32	8.47	50.23	9.41

Inkawasi	51.30	8.44	50.22	9.38
Machupicchu	51.31	8.46	50.22	9.39
Maranura	51.32	8.48	50.24	9.42
Ocobamba	51.32	8.48	50.24	9.41
Ollantaytambo	51.31	8.46	50.22	9.39
Santa Ana	51.33	8.49	50.24	9.42
Challabamba	49.67	7.65	48.89	8.63
Lares	49.68	7.66	48.89	8.63
Urubamba	49.67	7.64	48.88	8.62
Yanatile	49.70	7.69	48.91	8.67
Vilcabamba	49.69	7.78	48.78	8.71
Villa Virgen	49.69	7.78	48.79	8.72
Camanti	48.61	8.88	47.98	9.96
Accha	49.07	3.39	48.02	4.33
Acomayo	49.07	3.40	48.02	4.34
Acos	49.07	3.40	48.02	4.33
Capacmarca	49.06	3.39	48.01	4.32
Ccapi	49.08	3.41	48.03	4.34
Colcha	49.08	3.41	48.03	4.34
Colquemarca	49.05	3.36	48.00	4.30
Huaro	49.08	3.42	48.03	4.35
Omacha	49.06	3.38	48.01	4.31
Paccaritambo	49.08	3.42	48.03	4.35
Pillpinto	49.07	3.39	48.02	4.33
Pomacanchi	49.06	3.38	48.01	4.32
Rondocan	49.08	3.42	48.03	4.35
Sangarará	49.07	3.40	48.02	4.33
Chamaca	48.38	1.47	47.46	2.32
Coporaque	48.35	1.42	47.43	2.27
Livitaca	48.38	1.47	47.46	2.32
Velille	48.37	1.44	47.44	2.29
Espinar	48.09	0.83	47.33	1.41
Ocoruro	48.08	0.82	47.32	1.40
Pallpata	48.09	0.84	47.33	1.42
Condoroma	47.58	0.95	46.95	1.46
Alto Pichigua	47.81	1.06	46.96	1.93
Checca	47.83	1.09	46.98	1.96
Kunturkanki	47.83	1.08	46.97	1.95
Langui	47.84	1.10	46.99	1.97
Layo	47.83	1.08	46.98	1.95
Marangani	47.84	1.10	46.99	1.97
Pichigua	47.82	1.07	46.97	1.94
Quehue	47.84	1.10	46.99	1.97
Sicuani	47.85	1.11	47.00	1.98
Yanaoca	47.85	1.11	46.99	1.98
Ancahuasi	48.20	4.20	47.09	5.28

Chinchaypujio	48.19	4.19	47.08	5.26
Huarocondo	48.21	4.21	47.10	5.29
Limatambo	48.20	4.20	47.09	5.28
Mollepata	48.20	4.20	47.09	5.28
Santa Teresa	48.22	4.22	47.10	5.30
Zurite	48.20	4.20	47.09	5.28
Suyckutambo	46.97	0.85	46.32	1.33
Andahuaylillas	47.33	3.51	46.45	4.56
Anta	47.34	3.53	46.46	4.58
Cachimayo	47.34	3.53	46.46	4.58
Caicay	47.33	3.52	46.45	4.57
Calca	47.35	3.56	46.48	4.60
Ccorca	47.33	3.52	46.45	4.57
Chincho	47.34	3.54	46.47	4.59
Colquepata	47.34	3.54	46.47	4.59
Coya	47.34	3.54	46.47	4.59
Cusco	47.34	3.53	46.46	4.58
Huancarani	47.34	3.53	46.46	4.58
Huanoquite	47.32	3.51	46.45	4.56
Huayllabamba	47.35	3.55	46.47	4.59
Lamay	47.35	3.55	46.47	4.60
Lucre	47.33	3.51	46.45	4.56
Maras	47.35	3.55	46.47	4.60
Oropesa	47.33	3.52	46.45	4.57
Paruro	47.32	3.51	46.44	4.55
Pisac	47.34	3.54	46.47	4.59
Poroy	47.34	3.53	46.46	4.58
Pucyura	47.34	3.53	46.46	4.58
San Jerónimo	47.33	3.52	46.46	4.57
San Salvador	47.34	3.53	46.46	4.58
San Sebastián	47.34	3.53	46.46	4.58
Santiago	47.33	3.52	46.46	4.57
Saylla	47.33	3.53	46.46	4.57
Taray	47.34	3.54	46.46	4.58
Urcos	47.32	3.51	46.45	4.56
Wanchaq	47.33	3.53	46.46	4.57
Yaurisque	47.33	3.52	46.45	4.56
Yucay	47.35	3.55	46.47	4.60
Ccarhuayo	46.34	5.98	45.64	6.95
Ccatcca	46.33	5.97	45.64	6.94
Marcapata	46.33	5.97	45.63	6.94
Ocongate	46.32	5.96	45.63	6.94
Paucartambo	46.35	6.01	45.66	6.98
Llusco	46.24	1.11	45.37	1.79
Quiñota	46.25	1.12	45.38	1.81
Santo Tomas	46.23	1.09	45.35	1.78

Acopia	45.53	1.58	44.66	2.48
Checacupe	45.53	1.58	44.66	2.48
Combapata	45.52	1.57	44.65	2.47
Cusipata	45.54	1.59	44.67	2.49
Mosoc Llacta	45.52	1.57	44.65	2.47
Pampamarca	45.52	1.56	44.65	2.47
Pitumarca	45.54	1.59	44.67	2.49
Quiquijana	45.54	1.60	44.67	2.50
San Pablo	45.52	1.56	44.65	2.46
San Pedro	45.52	1.56	44.65	2.46
Tinta	45.52	1.56	44.65	2.46
Tupac Amaru	45.52	1.56	44.65	2.46

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la tabla N° 26 se aplicó el modelo matemático LTPP -1996, y se obtuvo el mayor valor de la temperatura máxima del pavimento en el distrito de Megatoni, con un valor de 59.64 °C para una confiabilidad del 98% y un valor de 58.94 °C para una confiabilidad del 50%, y el menor valor de las temperaturas mínimas se encontró en el distrito de Espinar, registrando un valor de 0.83°C para una confiabilidad del 98% y un valor de 1.41°C para una confiabilidad del 50%.

Tabla N° 27: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo LTPP-1996 de los distritos de la región Puno.

Distritos	Región Puno			
	LTPP bind - 1996			
	TMAX _{98%}	TMIN _{98%}	TMAX _{50%}	TMIN _{50%}
San Pedro De Putina Punco	61.36	14.11	59.64	15.47
Ayapata	56.93	13.67	55.40	14.47
Alto Inambari	51.87	11.09	50.75	11.97
Limbani	51.89	11.12	50.77	12.00
Phara	51.87	11.09	50.75	11.97
San Juan Del Oro	51.86	11.08	50.74	11.95
Achaya	49.67	0.80	48.65	1.70
Arapa	49.68	0.82	48.66	1.72
Azángaro	49.69	0.85	48.68	1.75
Chupa	49.68	0.82	48.66	1.72
Huancané	49.67	0.81	48.65	1.71
Huatasani	49.68	0.83	48.67	1.73
Nicasio	49.67	0.81	48.65	1.70

Pedro Vilca Apaza	49.68	0.83	48.67	1.73
San Juan De Salinas	49.69	0.83	48.67	1.73
Santiago De Pupuja	49.68	0.82	48.66	1.72
Pisacoma	48.62	1.02	48.05	1.41
Amantani	48.75	2.70	48.01	3.27
Atuncolla	48.75	2.70	48.01	3.27
Cabana	48.75	2.70	48.02	3.27
Calapuja	48.77	2.74	48.04	3.31
Caminaca	48.78	2.74	48.04	3.31
Capachica	48.75	2.70	48.02	3.27
Caracoto	48.76	2.71	48.02	3.28
Coata	48.76	2.72	48.02	3.29
Huata	48.75	2.70	48.02	3.27
Juliaca	48.76	2.72	48.03	3.29
Paucarcolla	48.74	2.69	48.01	3.26
Pusi	48.77	2.73	48.03	3.30
Samán	48.78	2.74	48.04	3.31
San Miguel	48.77	2.73	48.03	3.30
Taraco	48.78	2.74	48.04	3.31
Ollachea	48.58	8.83	47.95	9.91
San Gabán	48.59	8.85	47.96	9.93
Ayaviri	48.82	0.48	47.78	1.08
José Domingo Choquehuanca	48.82	0.47	47.78	1.07
Llalli	48.82	0.47	47.78	1.08
Ocuviri	48.81	0.45	47.77	1.05
Pucará	48.81	0.46	47.77	1.07
Tirapata	48.83	0.48	47.79	1.09
Umachiri	48.83	0.48	47.79	1.09
Vilavila	48.81	0.45	47.77	1.06
Cupi	48.83	0.49	47.79	1.09
Conduriri	47.77	2.42	47.12	2.94
Cuturapi	47.79	2.45	47.15	2.97
Desaguadero	47.76	2.41	47.12	2.93
Huacullani	47.77	2.41	47.12	2.93
Ilave	47.79	2.45	47.15	2.97
Juli	47.79	2.45	47.14	2.97
Kelluyo	47.75	2.39	47.11	2.91
Pomata	47.78	2.44	47.14	2.96
Yunguyo	47.79	2.45	47.15	2.97
Zepita	47.77	2.42	47.13	2.94
Cabanillas	48.07	0.36	47.17	0.95
Mañazo	48.06	0.36	47.17	0.95
San Antonio	48.05	0.34	47.15	0.92

Anapia	47.88	1.99	47.04	2.66
Copani	47.87	1.98	47.04	2.65
Palca	47.97	0.58	47.12	1.02
Cabanilla	47.94	0.55	47.10	0.99
Lampa	47.96	0.58	47.12	1.01
Paratia	47.95	0.56	47.11	1.00
Santa Lucía	47.94	0.54	47.10	0.98
Chucuito	47.62	2.42	46.88	2.85
Platería	47.61	2.41	46.87	2.84
Puno	47.62	2.42	46.88	2.85
Tiquillaca	47.62	2.42	46.88	2.85
Vilque	47.63	2.44	46.89	2.87
Acora	47.29	0.57	46.66	1.03
Pichacani	47.30	0.58	46.66	1.03
Capazo	46.96	0.79	46.40	1.27
Santa Rosa	46.98	0.82	46.42	1.30
Antauta	47.81	0.91	46.80	1.74
Asillo	47.78	0.86	46.77	1.69
Macari	47.79	0.87	46.78	1.70
Nuñoa	47.81	0.91	46.80	1.74
Orurillo	47.79	0.87	46.78	1.70
Santa Rosa	47.80	0.89	46.79	1.72
Pilcuyo	46.12	5.38	45.57	6.25
Crucero	46.62	1.10	45.52	1.78
Muñani	46.59	1.06	45.49	1.74
Potoni	46.61	1.09	45.51	1.77
Putina	46.59	1.05	45.49	1.73
San Antón	46.60	1.08	45.51	1.76
San José	46.59	1.06	45.49	1.74
Ollaraya	45.88	4.05	45.19	4.73
Tinicachi	45.88	4.06	45.19	4.73
Unicachi	45.88	4.05	45.19	4.73
Conima	45.90	5.03	45.21	5.65
Huayrapata	45.91	5.05	45.23	5.67
Moho	45.91	5.04	45.22	5.66
Tilali	45.90	5.02	45.21	5.65
Ananea	45.88	4.18	45.11	4.77
Cuyocuyo	45.90	4.19	45.12	4.79
Patambuco	45.91	4.22	45.14	4.81
Quiaca	45.90	4.20	45.12	4.79
Sandía	45.87	4.15	45.10	4.75
Sina	45.90	4.19	45.12	4.79
Yanahuaya	45.91	4.21	45.13	4.81
Ajoyani	45.65	4.84	44.85	5.44
Coasa	45.68	4.89	44.88	5.48
Ituata	45.67	4.88	44.87	5.48

Usicayos	45.65	4.84	44.85	5.44
Cojata	45.45	1.90	44.56	2.43
Inchupalla	45.45	1.90	44.56	2.43
Quilcapuncu	45.46	1.92	44.57	2.45
Rosaspata	45.44	1.88	44.55	2.40
Vilquechico	45.44	1.89	44.55	2.41
Corani	43.67	1.73	43.00	2.75
Macusani	43.66	1.72	42.99	2.74

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la tabla N° 27 se aplicó el modelo matemático LTPP -1996, y se obtuvo el mayor valor de la temperatura máxima del pavimento en el distrito de San Pedro De Putina Punco, con un valor de 61.36°C para una confiabilidad del 98% y un valor de 59.54 °C para una confiabilidad del 50%, y el menor valor de las temperaturas mínimas se encontró en los distritos de Cabanillas y Mañazo, registrando un valor de 0.36°C para una confiabilidad del 98% y un valor de 0.95 °C para una confiabilidad del 50%.

5.2.2.2. LTPP bind 1998 – 2000.

$$T_{MIN} = -1.56 + 0.72 T_{MINAIR} - 0.004 lat^2 + 6.26 \log(H+25) - Z(4.4 + 0.52 \times \sigma)^{1/2}$$

Donde:

H = Profundidad del pavimento (2 cm).

σ = Desviación Estándar.

Z = confiabilidad (2.32)

a) Confiabilidad al 98% (Z = 2.32)

$$T_{MIN98\%} = -1.56 + 0.72 \times -4.51 - 0.004 \times 13.8983^2 + 6.26 \times \log(2+25) - 2.32 \times (4.4 + 0.52 \times 0.823)^{1/2}$$

$$T_{MIN98\%} = -1.72 \text{ °C}$$

b) Confiabilidad al 50% (Z = 0.6745)

$$T_{MIN50\%} = -1.56 + 0.72 \times -3.21 - 0.004 \times 13.8983^2 + 6.26 \times \log(2+25) - 0.6745 \times (4.4 + 0.52 \times 0.790)^{1/2}$$

$$T_{MIN50\%} = 2.84 \text{ °C}$$

5.2.2.3. LTPP Bind - 2004

$$TMAX = 32.7 + 0.837T_{MAXAIR} - 0.0029lat^2 + Z(\sigma^2 + \delta_{modelo}^2)^{0.5}$$

Donde:

σ = Desviación Estándar.

δ_{modelo} = Error estándar del modelo (2.1 °C)

a) Confiabilidad al 98% ($Z = 2.32$)

$$TMAX_{98\%} = 32.7 + 0.837 \times 21.78 - 0.0029 \times 13.8983^2 + 2.32 \times (0.823^2 + 2.1^2)^{0.5}$$

$$TMAX_{98\%} = 55.60 \text{ °C}$$

b) Confiabilidad al 50% ($Z = 0.6745$)

$$TMAX_{50\%} = 32.7 + 0.837 \times 20.42 - 0.0029 \times 13.8983^2 + 0.6745 \times (0.79^2 + 2.1^2)^{0.5}$$

$$TMAX_{50\%} = 50.75 \text{ °C}$$

Tabla N° 28: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo LTPP - 2004 y LTPP 1998 - 2000, de los distritos de la región Cuzco.

Región Cusco				
Distritos	LTPP bind			
	2004		1998 - 2000	
	TMAX _{98%}	TMAX _{50%}	TMIN _{98%}	TMIN _{50%}
Megantoni	66.82	62.52	11.42	15.78
Echarate	63.40	59.13	9.62	13.87
Kosñipata	62.02	57.24	8.45	12.83
Quellouno	61.63	56.86	8.23	12.61
Kimbiri	59.75	55.18	5.96	10.26
Pichari	59.77	55.20	5.99	10.29
Villa Kintiarina	57.78	53.24	3.21	7.70
Huayopata	58.05	53.14	3.36	7.92
Inkawasi	58.03	53.12	3.33	7.89
Machupicchu	58.04	53.13	3.34	7.90
Maranura	58.06	53.15	3.37	7.93
Ocobamba	58.06	53.15	3.37	7.93
Ollantaytambo	58.04	53.13	3.34	7.90
Santa Ana	58.06	53.15	3.38	7.94
Challabamba	56.10	51.70	2.60	7.14
Lares	56.10	51.70	2.61	7.15
Urubamba	56.09	51.69	2.59	7.13

Yanatile	56.12	51.72	2.64	7.18
Vilcabamba	56.18	51.57	2.70	7.23
Villa Virgen	56.19	51.58	2.71	7.23
Camanti	54.88	50.73	3.87	8.47
Accha	55.60	50.74	-1.72	2.83
Acomayo	55.60	50.75	-1.72	2.84
Acos	55.60	50.75	-1.72	2.83
Capacmarca	55.59	50.74	-1.73	2.82
Ccapi	55.61	50.75	-1.71	2.84
Colcha	55.61	50.75	-1.71	2.84
Colquemarca	55.57	50.72	-1.75	2.80
Huaro	55.61	50.76	-1.70	2.85
Omacha	55.58	50.73	-1.74	2.81
Paccaritambo	55.61	50.76	-1.70	2.85
Pillpinto	55.59	50.74	-1.73	2.83
Pomacanchi	55.59	50.73	-1.73	2.82
Rondocan	55.61	50.76	-1.70	2.85
Sangarará	55.60	50.74	-1.72	2.83
Chamaca	54.77	50.12	-3.62	0.83
Coporaque	54.74	50.09	-3.67	0.77
Livitaca	54.77	50.12	-3.63	0.82
Velille	54.75	50.10	-3.65	0.80
Espinar	54.36	49.93	-4.23	-0.07
Ocoruro	54.35	49.92	-4.25	-0.09
Pallpata	54.37	49.94	-4.22	-0.06
Condoroma	53.75	49.51	-4.08	-0.01
Alto Pichigua	54.12	49.58	-4.03	0.43
Checca	54.14	49.61	-4.00	0.46
Kunturkanki	54.13	49.60	-4.01	0.45
Langui	54.15	49.62	-3.98	0.47
Layo	54.13	49.60	-4.00	0.45
Marangani	54.15	49.61	-3.98	0.47
Pichigua	54.12	49.59	-4.02	0.44
Quehue	54.15	49.62	-3.98	0.47
Sicuani	54.16	49.63	-3.97	0.48
Yanaoca	54.16	49.62	-3.97	0.48
Acahuasi	54.71	49.78	-0.93	3.77
Chinchaypujio	54.70	49.76	-0.94	3.76
Huarocondo	54.72	49.78	-0.92	3.78
Limatambo	54.71	49.77	-0.93	3.77
Mollepata	54.71	49.78	-0.93	3.77
Santa Teresa	54.72	49.79	-0.90	3.79
Zurite	54.71	49.78	-0.93	3.77
Suyckutambo	53.10	48.83	-4.19	-0.14
Andahuaylillas	53.61	49.08	-1.57	3.06
Anta	53.62	49.09	-1.55	3.07

Cachimayo	53.63	49.09	-1.55	3.08
Caicay	53.62	49.08	-1.56	3.06
Calca	53.64	49.11	-1.52	3.10
Ccorca	53.62	49.08	-1.56	3.06
Chincheró	53.63	49.10	-1.54	3.08
Colquepata	53.63	49.10	-1.54	3.08
Coya	53.63	49.10	-1.54	3.08
Cusco	53.62	49.09	-1.55	3.07
Huancarani	53.62	49.09	-1.55	3.07
Huanoquite	53.61	49.07	-1.57	3.05
Huayllabamba	53.64	49.10	-1.53	3.09
Lamay	53.64	49.10	-1.53	3.09
Lucre	53.61	49.08	-1.57	3.06
Maras	53.64	49.10	-1.53	3.09
Oropesa	53.62	49.08	-1.56	3.06
Paruro	53.61	49.07	-1.57	3.05
Pisac	53.63	49.10	-1.54	3.08
Poroy	53.62	49.09	-1.55	3.07
Pucyura	53.62	49.09	-1.55	3.07
San Jerónimo	53.62	49.08	-1.56	3.07
San Salvador	53.62	49.09	-1.55	3.07
San Sebastián	53.62	49.09	-1.55	3.07
Santiago	53.62	49.08	-1.56	3.07
Saylla	53.62	49.08	-1.55	3.07
Taray	53.63	49.09	-1.54	3.08
Urcos	53.61	49.07	-1.57	3.05
Wanchaq	53.62	49.09	-1.55	3.07
Yaurisque	53.61	49.08	-1.56	3.06
Yucay	53.64	49.10	-1.53	3.10
Ccarhuayo	52.45	48.19	0.95	5.46
Ccatcca	52.44	48.18	0.94	5.45
Marcapata	52.44	48.18	0.94	5.45
Ocongate	52.44	48.18	0.93	5.44
Paucartambo	52.47	48.21	0.97	5.49
Llusco	52.43	47.83	-3.98	0.31
Quiñota	52.45	47.85	-3.96	0.32
Santo Tomas	52.42	47.82	-4.00	0.29
Acopia	51.66	47.11	-3.51	0.98
Checacupe	51.66	47.11	-3.51	0.98
Combapata	51.66	47.11	-3.51	0.97
Cusipata	51.67	47.12	-3.49	0.99
Mosoc Llacta	51.66	47.10	-3.51	0.97
Pampamarca	51.65	47.10	-3.52	0.97
Pitumarca	51.67	47.12	-3.49	0.99
Quiquijana	51.68	47.13	-3.48	1.00
San Pablo	51.65	47.10	-3.52	0.96

San Pedro	51.65	47.10	-3.52	0.96
Tinta	51.65	47.10	-3.52	0.96
Tupac Amaru	51.65	47.10	-3.52	0.96

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la tabla N° 28 se aplicó el modelo matemático LTPP bind 2004, y se obtuvo el mayor valor de la temperatura máxima del pavimento en el distrito de Megatoni, con un valor de 66.82 °C para una confiabilidad del 98% y un valor de 62.54 °C para una confiabilidad del 50%, y aplicando el modelo matemático LTPP bind 1988 – 2000 se obtuvo el menor valor de las temperaturas mínimas y se encontró en el distrito de Ocoruro, registrando un valor de -4.25 °C para una confiabilidad del 98% y un valor de -0.09 °C para una confiabilidad del 50%.

Tabla N° 29: Temperatura máxima y mínima al 98% y 50% de confiabilidad con el modelo LTPP - 2004 y LTPP 1998 - 2000, de los distritos de la región Puno.

Distritos	Región Puno			
	LTPP bind			
	2004		1998 - 2000	
	TMAX _{98%}	TMAX _{50%}	TMIN _{98%}	TMIN _{50%}
San Pedro De Putina Punco	69.42	63.38	8.88	13.97
Ayapata	64.46	58.68	8.47	13.01
Alto Inambari	58.67	53.68	5.98	10.50
Limbani	58.69	53.70	6.01	10.53
Phara	58.67	53.68	5.98	10.49
San Juan Del Oro	58.66	53.67	5.96	10.48
Achaya	56.21	51.41	-4.32	0.20
Arapa	56.22	51.42	-4.30	0.22
Azángaro	56.24	51.44	-4.27	0.24
Chupa	56.22	51.42	-4.30	0.22
Huancané	56.22	51.41	-4.31	0.21
Huatasani	56.23	51.43	-4.29	0.23
Nicasio	56.21	51.41	-4.31	0.20
Pedro Vilca Apaza	56.23	51.43	-4.29	0.23
San Juan De Salinas	56.23	51.43	-4.29	0.23
Santiago De Pupuja	56.22	51.42	-4.30	0.22

Pisacoma	54.84	50.68	-4.01	-0.06
Amantani	55.06	50.67	-2.35	1.79
Atuncolla	55.05	50.67	-2.36	1.79
Cabana	55.06	50.67	-2.35	1.80
Calapuja	55.09	50.70	-2.31	1.84
Caminaca	55.09	50.70	-2.31	1.84
Capachica	55.06	50.67	-2.35	1.79
Caracoto	55.06	50.68	-2.34	1.80
Coata	55.07	50.68	-2.34	1.81
Huata	55.06	50.67	-2.35	1.80
Juliaca	55.07	50.69	-2.33	1.82
Paucarcolla	55.05	50.66	-2.36	1.78
Pusi	55.08	50.69	-2.33	1.82
Samán	55.09	50.70	-2.31	1.84
San Miguel	55.08	50.69	-2.32	1.82
Taraco	55.09	50.70	-2.31	1.84
Ollachea	54.84	50.70	3.82	8.42
San Gabán	54.86	50.72	3.84	8.44
Ayaviri	55.32	50.43	-4.65	-0.40
José Domingo Choquehuanca	55.31	50.42	-4.66	-0.41
Llalli	55.31	50.43	-4.65	-0.41
Ocuviri	55.30	50.41	-4.68	-0.43
Pucará	55.30	50.42	-4.66	-0.42
Tirapata	55.32	50.43	-4.64	-0.40
Umachiri	55.32	50.43	-4.64	-0.39
Vilavila	55.30	50.41	-4.67	-0.43
Cupi	55.32	50.43	-4.64	-0.39
Conduriri	53.95	49.69	-2.62	1.46
Cuturapi	53.98	49.72	-2.58	1.50
Desaguadero	53.95	49.69	-2.63	1.45
Huacullani	53.95	49.69	-2.62	1.46
Ilave	53.98	49.72	-2.58	1.50
Juli	53.98	49.72	-2.59	1.49
Kelluyo	53.94	49.68	-2.64	1.44
Pomata	53.97	49.71	-2.59	1.49
Yunguyo	53.98	49.72	-2.58	1.50
Zepita	53.96	49.70	-2.61	1.47
Cabanillas	54.40	49.75	-4.73	-0.54
Mañazo	54.40	49.75	-4.73	-0.54
San Antonio	54.39	49.74	-4.76	-0.56
Anapia	54.16	49.63	-3.09	1.17
Copani	54.16	49.62	-3.09	1.17
Palca	54.27	49.69	-4.50	-0.45
Cabanilla	54.25	49.67	-4.53	-0.49
Lampa	54.27	49.69	-4.50	-0.46

Paratia	54.26	49.68	-4.52	-0.47
Santa Lucía	54.24	49.66	-4.54	-0.50
Chucuito	53.84	49.42	-2.63	1.38
Platería	53.83	49.41	-2.65	1.37
Puno	53.84	49.42	-2.63	1.38
Tiquillaca	53.84	49.42	-2.64	1.38
Vilque	53.85	49.44	-2.62	1.40
Acora	53.44	49.19	-4.46	-0.45
Pichacani	53.44	49.19	-4.46	-0.44
Capazo	53.04	48.91	-4.23	-0.20
Santa Rosa	53.06	48.93	-4.20	-0.18
Antauta	54.21	49.41	-4.21	0.24
Asillo	54.18	49.37	-4.25	0.19
Macari	54.18	49.38	-4.25	0.20
Nuñoa	54.21	49.41	-4.21	0.24
Orurillo	54.18	49.38	-4.25	0.20
Santa Rosa	54.20	49.39	-4.23	0.22
Pilcuyo	52.14	48.08	0.38	4.76
Crucero	52.98	48.00	-4.03	0.29
Muñani	52.95	47.97	-4.08	0.25
Potoni	52.97	47.99	-4.04	0.28
Putina	52.95	47.97	-4.08	0.24
San Antón	52.96	47.98	-4.06	0.27
San José	52.95	47.97	-4.08	0.25
Ollaraya	51.94	47.63	-0.99	3.25
Tinicachi	51.94	47.63	-0.98	3.25
Unicachi	51.94	47.63	-0.99	3.25
Conima	51.96	47.66	-0.01	4.18
Huayrapata	51.98	47.67	0.01	4.20
Moho	51.97	47.66	0.01	4.19
Tilali	51.96	47.65	-0.01	4.17
Ananea	51.99	47.54	-0.88	3.29
Cuyocuyo	52.01	47.56	-0.86	3.31
Patambuco	52.02	47.57	-0.84	3.33
Quiaca	52.01	47.56	-0.86	3.32
Sandia	51.98	47.53	-0.90	3.27
Sina	52.01	47.56	-0.86	3.31
Yanahuaya	52.02	47.57	-0.84	3.33
Ajoyani	51.75	47.27	-0.22	3.96
Coasa	51.79	47.30	-0.17	4.01
Ituata	51.78	47.30	-0.18	4.00
Usicayos	51.76	47.27	-0.22	3.97
Cojata	51.59	46.94	-3.19	0.95
Inchupalla	51.59	46.94	-3.18	0.95
Quilcapuncu	51.60	46.95	-3.17	0.97
Rosaspata	51.57	46.92	-3.21	0.93

Vilquechico	51.58	46.93	-3.20	0.94
Corani	49.55	45.35	-3.31	1.24
Macusani	49.54	45.34	-3.32	1.23

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la tabla N° 29 se aplicó el modelo matemático LTPP bind 2004, y se obtuvo el mayor valor de la temperatura máxima del pavimento en el distrito de San Pedro de Putina Punco, con un valor de 69.42 °C para una confiabilidad del 98% y un valor de 63.38 °C para una confiabilidad del 50%, y aplicando el modelo matemático LTPP bind 1988 – 2000 se obtuvo el menor valor de las temperaturas mínimas y se encontró en los distritos de Cabanillas y Mañazo, registrando un valor de -4.73 °C para una confiabilidad del 98% y un valor de -0.54 °C para una confiabilidad del 50%.

5.3. Obtención del grado de desempeño (PG) y del mapa de Grado de Desempeño (PG)

Para el cálculo de la temperatura máxima a una profundidad de 20 mm en la superficie del pavimento se realizó mediante tres modelos diferentes: el modelo recomendado por el SHRP original y el modelo basado en la investigación realizada por investigadores de LTPP bind (FHWA) en 1996 y 2004. De estos tres, el último modelo de LTPP Bind (2004) proporciona el valor más crítico, por ende, se utilizó dicho modelo matemático para el cálculo del grado de Desempeño (PG).

Para el cálculo de la temperatura mínima de la superficie del pavimento se realizó mediante cuatro modelos diferentes. El modelo recomendado por el SHRP original la temperatura calculada desarrollada por los investigadores canadienses de C-SHRP y la desarrollada por LTPP Bind en función del rendimiento de 30 tramos experimentales, entre los cuatro modelos, el modelo LTPP Bind de 1998 - 2000 proporciona una de las temperaturas del pavimento menos severa, pero representa un estudio más actual y, por ende, se utilizó dicho modelo matemático para el cálculo del grado de Desempeño (PG).

Con dichos valores de temperaturas máximas y mínimas del pavimento se procedió a calcular el grado de desempeño (PG) para una confiabilidad del 50% y 98%, guiándonos con las tablas proporcionadas por el manual de carreteras (2013), la cual se encuentra la Tabla N° 3 y N° 4 del CAPITULO II. Posteriormente a la data obtenida de los grados de desempeño (PG) de los distritos de las regiones de Cusco

y Puno se le asignó un color e identificamos mediante el software ArcMap 10.4.1 cada distrito asignándole el color del grado de desempeño correspondiente.

5.3.1. Determinación y análisis del grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 50%.

Tabla N° 30: Grado de Desempeño (PG) de los distritos de la región Cusco con una confiabilidad del 50%.

Región Cuzco			
Distritos	Modelo LTPP		PG
	2004	1998 - 2000	
	TMAX _{50%}	TMIN _{50%}	
Megantoni	62.52	15.78	64-10
Echarate	59.13	13.87	64-10
Kosñipata	57.24	12.83	58-16
Quellouno	56.86	12.61	58-16
Kimbiri	55.18	10.26	58-16
Pichari	55.20	10.29	58-16
Villa Kintiarina	53.24	7.70	58-16
Huayopata	53.14	7.92	58-16
Inkawasi	53.12	7.89	58-16
Machupicchu	53.13	7.90	58-16
Maranura	53.15	7.93	58-16
Ocobamba	53.15	7.93	58-16
Ollantaytambo	53.13	7.90	58-16
Santa Ana	53.15	7.94	58-16
Challabamba	51.70	7.14	52-10
Lares	51.70	7.15	52-10
Urubamba	51.69	7.13	52-10
Yanatile	51.72	7.18	52-10
Vilcabamba	51.57	7.23	52-10
Villa Virgen	51.58	7.23	52-10
Camanti	50.73	8.47	52-10
Accha	50.74	2.83	52-10
Acomayo	50.75	2.84	52-10
Acos	50.75	2.83	52-10
Capacmarca	50.74	2.82	52-10
Ccapi	50.75	2.84	52-10
Colcha	50.75	2.84	52-10
Colquemarca	50.72	2.80	52-10
Huaro	50.76	2.85	52-10
Omacha	50.73	2.81	52-10
Paccaritambo	50.76	2.85	52-10
Pillpinto	50.74	2.83	52-10

Pomacanchi	50.73	2.82	52-10
Rondocan	50.76	2.85	52-10
Sangarará	50.74	2.83	52-10
Chamaca	50.12	0.83	52-10
Coporaque	50.09	0.77	52-10
Livitaca	50.12	0.82	52-10
Velille	50.10	0.80	52-10
Espinar	49.93	-0.07	52-10
Ocoruro	49.92	-0.09	52-10
Pallpata	49.94	-0.06	52-10
Condoroma	49.51	-0.01	52-10
Alto Pichigua	49.58	0.43	52-10
Checca	49.61	0.46	52-10
Kunturkanki	49.60	0.45	52-10
Langui	49.62	0.47	52-10
Layo	49.60	0.45	52-10
Marangani	49.61	0.47	52-10
Pichigua	49.59	0.44	52-10
Quehue	49.62	0.47	52-10
Sicuani	49.63	0.48	52-10
Yanaoca	49.62	0.48	52-10
Ancahuasi	49.78	3.77	52-10
Chinchaypujio	49.76	3.76	52-10
Huarocondo	49.78	3.78	52-10
Limatambo	49.77	3.77	52-10
Mollepata	49.78	3.77	52-10
Santa Teresa	49.79	3.79	52-10
Zurite	49.78	3.77	52-10
Suyckutambo	48.83	-0.14	52-10
Andahuaylillas	49.08	3.06	52-10
Anta	49.09	3.07	52-10
Cachimayo	49.09	3.08	52-10
Caicay	49.08	3.06	52-10
Calca	49.11	3.10	52-10
Ccorca	49.08	3.06	52-10
Chincho	49.10	3.08	52-10
Colquepata	49.10	3.08	52-10
Coya	49.10	3.08	52-10
Cusco	49.09	3.07	52-10
Huancarani	49.09	3.07	52-10
Huanoquite	49.07	3.05	52-10
Huayllabamba	49.10	3.09	52-10
Lamay	49.10	3.09	52-10
Lucre	49.08	3.06	52-10
Maras	49.10	3.09	52-10
Oropesa	49.08	3.06	52-10

Paruro	49.07	3.05	52-10
Pisac	49.10	3.08	52-10
Poroy	49.09	3.07	52-10
Pucyura	49.09	3.07	52-10
San Jerónimo	49.08	3.07	52-10
San Salvador	49.09	3.07	52-10
San Sebastián	49.09	3.07	52-10
Santiago	49.08	3.07	52-10
Saylla	49.08	3.07	52-10
Taray	49.09	3.08	52-10
Urcos	49.07	3.05	52-10
Wanchaq	49.09	3.07	52-10
Yaurisque	49.08	3.06	52-10
Yucay	49.10	3.10	52-10
Ccarhuayo	48.19	5.46	52-10
Ccatcca	48.18	5.45	52-10
Marcapata	48.18	5.45	52-10
Ocongate	48.18	5.44	52-10
Paucartambo	48.21	5.49	52-10
Llusco	47.83	0.31	52-10
Quiñota	47.85	0.32	52-10
Santo Tomas	47.82	0.29	52-10
Acopia	47.11	0.98	52-10
Checacupe	47.11	0.98	52-10
Combapata	47.11	0.97	52-10
Cusipata	47.12	0.99	52-10
Mosoc Llacta	47.10	0.97	52-10
Pampamarca	47.10	0.97	52-10
Pitumarca	47.12	0.99	52-10
Quiquijana	47.13	1.00	52-10
San Pablo	47.10	0.96	52-10
San Pedro	47.10	0.96	52-10
Tinta	47.10	0.96	52-10
Tupac Amaru	47.10	0.96	52-10

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la Tabla N° 24 se presenta las temperaturas máximas y mínimas obtenidas por los modelos matemáticos LTPP 2004 y LTPP 1998-2000 para una confiabilidad del 50 % identificado 3 grados de desempeño PG, 64-10 para 2 distritos, 58-16 para 12 distritos y 52-10 para 98 distritos.

5.3.2. Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 50%.

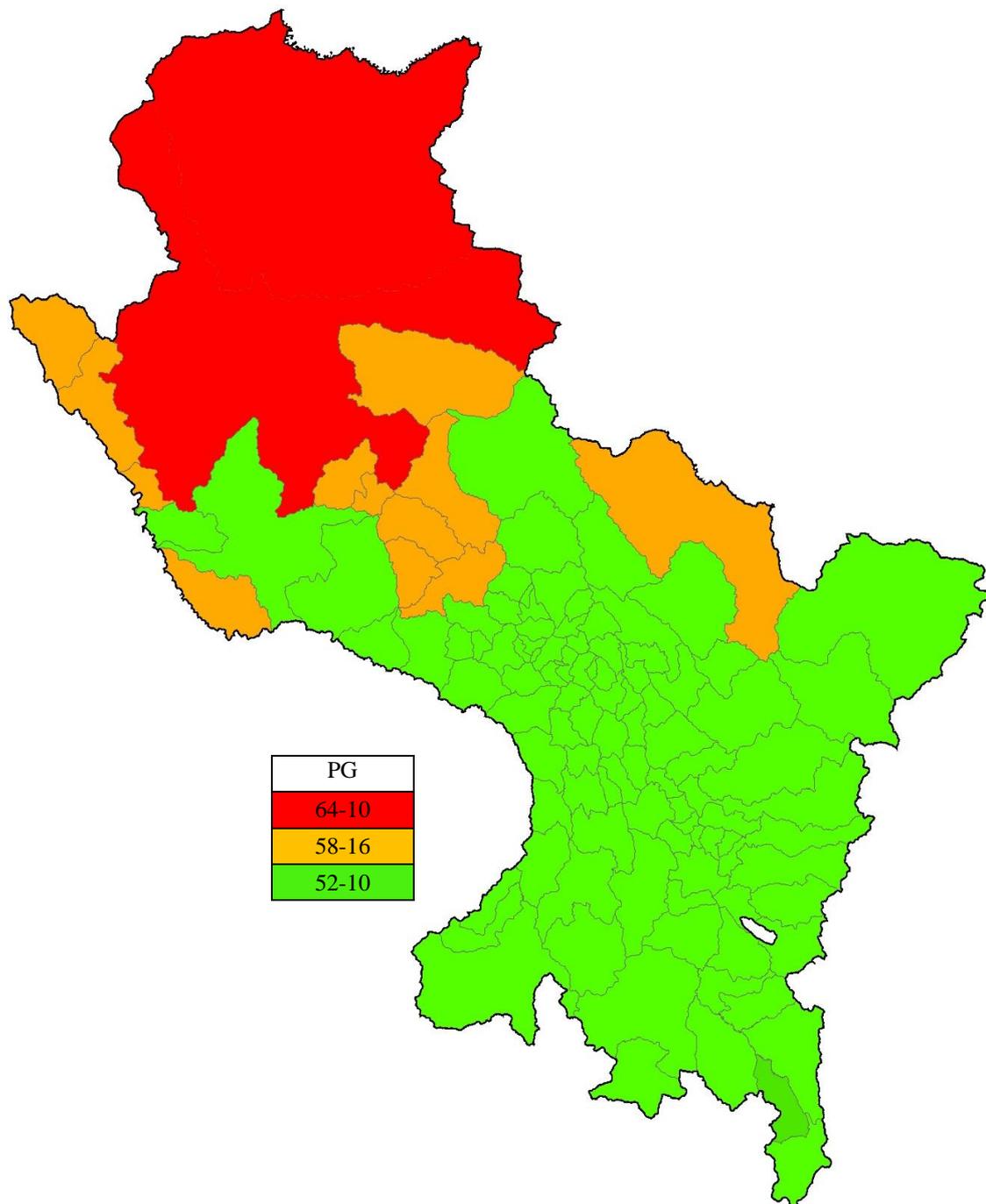


Figura N° 26: Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 50%

Fuente: Elaboración Propia usando el software ArcMap 10.4.1.

5.3.3. Determinación y análisis del grado de desempeño (PG) de la región Cuzco para una confiabilidad del 98%.

Tabla N° 31: Grado de Desempeño (PG) de los distritos de la región Cuzco con una confiabilidad del 98%.

Región Cuzco			
Distritos	Modelo LTPP		PG
	2004	1998 - 2000	
	TMAX _{98%}	TMIN _{98%}	
Megantoni	66.82	11.42	70-10
Echarate	63.40	9.62	64-10
Kosñipata	62.02	8.45	64-10
Quellouno	61.63	8.23	64-10
Kimbiri	59.75	5.96	64-10
Pichari	59.77	5.99	64-10
Villa Kintiarina	57.78	3.21	58-16
Huayopata	58.05	3.36	64-10
Inkawasi	58.03	3.33	64-10
Machupicchu	58.04	3.34	64-10
Maranura	58.06	3.37	64-10
Ocobamba	58.06	3.37	64-10
Ollantaytambo	58.04	3.34	64-10
Santa Ana	58.06	3.38	64-10
Challabamba	56.10	2.60	58-16
Lares	56.10	2.61	58-16
Urubamba	56.09	2.59	58-16
Yanatile	56.12	2.64	58-16
Vilcabamba	56.18	2.70	58-16
Villa Virgen	56.19	2.71	58-16
Camanti	54.88	3.87	58-16
Accha	55.60	-1.72	58-16
Acomayo	55.60	-1.72	58-16
Acos	55.60	-1.72	58-16
Capacmarca	55.59	-1.73	58-16
Ccapi	55.61	-1.71	58-16
Colcha	55.61	-1.71	58-16
Colquemarca	55.57	-1.75	58-16
Huaro	55.61	-1.70	58-16
Omacha	55.58	-1.74	58-16
Paccaritambo	55.61	-1.70	58-16
Pillpinto	55.59	-1.73	58-16
Pomacanchi	55.59	-1.73	58-16
Rondocan	55.61	-1.70	58-16
Sangarará	55.60	-1.72	58-16
Chamaca	54.77	-3.62	58-16

Coporaque	54.74	-3.67	58-16
Livitaca	54.77	-3.63	58-16
Velille	54.75	-3.65	58-16
Espinar	54.36	-4.23	58-16
Ocoruro	54.35	-4.25	58-16
Palpata	54.37	-4.22	58-16
Condoroma	53.75	-4.08	58-16
Alto Pichigua	54.12	-4.03	58-16
Checca	54.14	-4.00	58-16
Kunturkanki	54.13	-4.01	58-16
Langui	54.15	-3.98	58-16
Layo	54.13	-4.00	58-16
Marangani	54.15	-3.98	58-16
Pichigua	54.12	-4.02	58-16
Quehue	54.15	-3.98	58-16
Sicuani	54.16	-3.97	58-16
Yanaoca	54.16	-3.97	58-16
Ancahuasi	54.71	-0.93	58-16
Chinchaypujio	54.70	-0.94	58-16
Huarocondo	54.72	-0.92	58-16
Limatambo	54.71	-0.93	58-16
Mollepata	54.71	-0.93	58-16
Santa Teresa	54.72	-0.90	58-16
Zurite	54.71	-0.93	58-16
Suyckutambo	53.10	-4.19	58-16
Andahuaylillas	53.61	-1.57	58-16
Anta	53.62	-1.55	58-16
Cachimayo	53.63	-1.55	58-16
Caicay	53.62	-1.56	58-16
Calca	53.64	-1.52	58-16
Ccorca	53.62	-1.56	58-16
Chincho	53.63	-1.54	58-16
Colquepata	53.63	-1.54	58-16
Coya	53.63	-1.54	58-16
Cusco	53.62	-1.55	58-16
Huancarani	53.62	-1.55	58-16
Huanoquite	53.61	-1.57	58-16
Huayllabamba	53.64	-1.53	58-16
Lamay	53.64	-1.53	58-16
Lucre	53.61	-1.57	58-16
Maras	53.64	-1.53	58-16
Oropesa	53.62	-1.56	58-16
Paruro	53.61	-1.57	58-16
Pisac	53.63	-1.54	58-16
Poroy	53.62	-1.55	58-16
Pucyura	53.62	-1.55	58-16

San Jerónimo	53.62	-1.56	58-16
San Salvador	53.62	-1.55	58-16
San Sebastián	53.62	-1.55	58-16
Santiago	53.62	-1.56	58-16
Saylla	53.62	-1.55	58-16
Taray	53.63	-1.54	58-16
Urcos	53.61	-1.57	58-16
Wanchaq	53.62	-1.55	58-16
Yaurisque	53.61	-1.56	58-16
Yucay	53.64	-1.53	58-16
Ccarhuayo	52.45	0.95	58-16
Ccatcca	52.44	0.94	58-16
Marcapata	52.44	0.94	58-16
Ocongate	52.44	0.93	58-16
Paucartambo	52.47	0.97	58-16
Llusco	52.43	-3.98	58-16
Quiñota	52.45	-3.96	58-16
Santo Tomas	52.42	-4.00	58-16
Acopia	51.66	-3.51	52-10
Checacupe	51.66	-3.51	52-10
Combapata	51.66	-3.51	52-10
Cusipata	51.67	-3.49	52-10
Mosoc Llacta	51.66	-3.51	52-10
Pampamarca	51.65	-3.52	52-10
Pitumarca	51.67	-3.49	52-10
Quiquijana	51.68	-3.48	52-10
San Pablo	51.65	-3.52	52-10
San Pedro	51.65	-3.52	52-10
Tinta	51.65	-3.52	52-10
Tupac Amaru	51.65	-3.52	52-10

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la Tabla N° 25 se presenta las temperaturas máximas y mínimas obtenidas por los modelos matemáticos LTPP 2004 y LTPP 1998-2000 para una confiabilidad del 98 % identificado 4 grados de desempeño PG, 70 – 10 para 1 distrito, 64-10 para 12 distritos, 58-16 para 87 distritos y 52-10 para 12 distritos.

5.3.4. Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Cusco para una confiabilidad del 98%

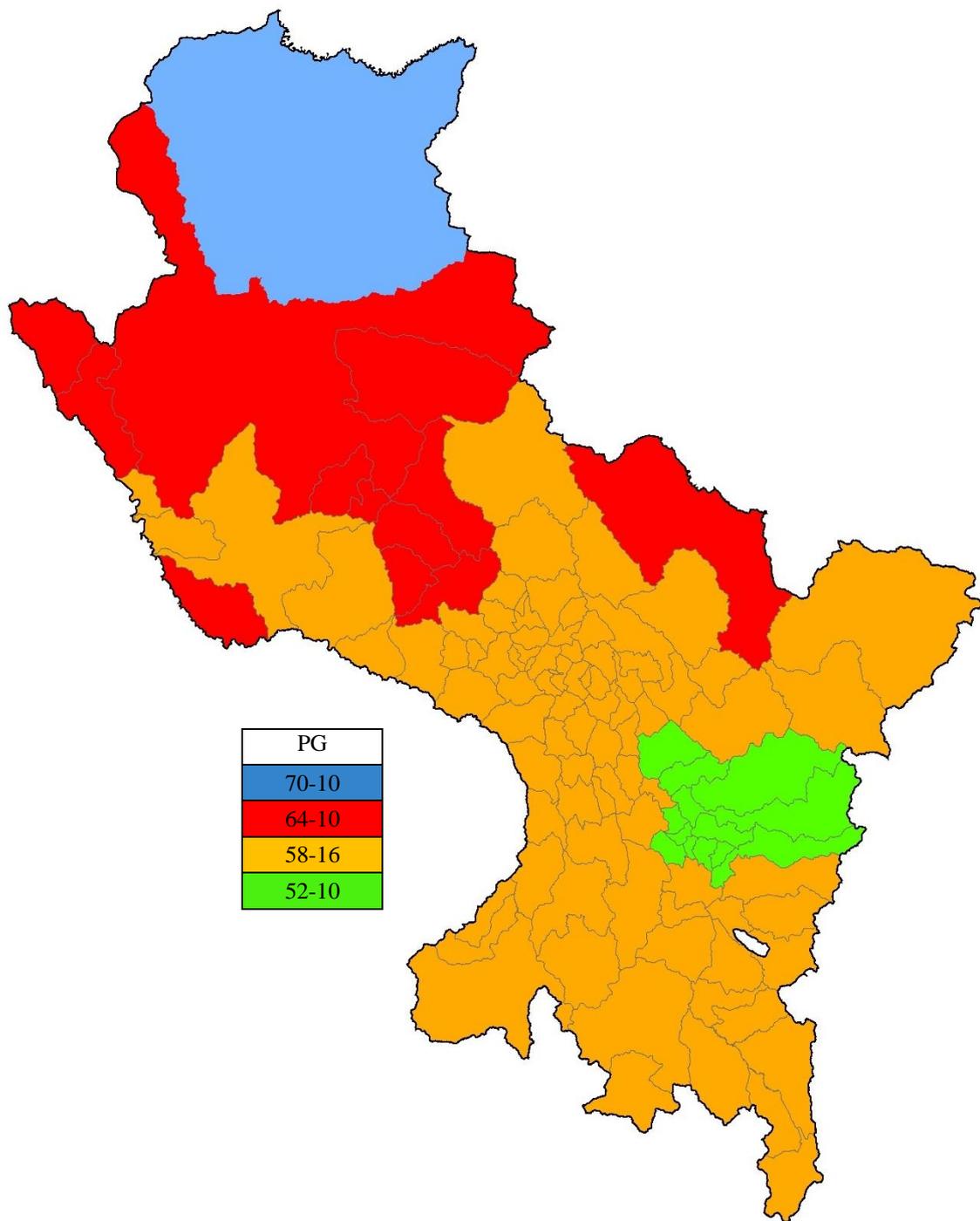


Figura N° 27: Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Cusco con una confiabilidad del 98%

Fuente: Elaboración Propia usando el software ArcMap 10.4.1.

5.3.5. Determinación y análisis del grado de desempeño (PG) de la región Puno para una confiabilidad del 50%.

Tabla N° 32: Grado de Desempeño (PG) de los distritos de la región Puno con una confiabilidad del 50%.

Región Puno			
Distritos	Modelo LTPP		PG
	2004	1998 - 2000	
	TMAX _{50%}	TMIN _{50%}	
San Pedro De Putina Punco	63.38	13.97	64-10
Ayapata	58.68	13.01	64-10
Alto Inambari	53.68	10.50	58-16
Limbani	53.70	10.53	58-16
Phara	53.68	10.49	58-16
San Juan Del Oro	53.67	10.48	58-16
Achaya	51.41	0.20	52-10
Arapa	51.42	0.22	52-10
Azángaro	51.44	0.24	52-10
Chupa	51.42	0.22	52-10
Huancané	51.41	0.21	52-10
Huatasani	51.43	0.23	52-10
Nicasio	51.41	0.20	52-10
Pedro Vilca Apaza	51.43	0.23	52-10
San Juan De Salinas	51.43	0.23	52-10
Santiago De Pupuja	51.42	0.22	52-10
Pisacoma	50.68	-0.06	52-10
Amantani	50.67	1.79	52-10
Atuncolla	50.67	1.79	52-10
Cabana	50.67	1.80	52-10
Calapuja	50.70	1.84	52-10
Caminaca	50.70	1.84	52-10
Capachica	50.67	1.79	52-10
Caracoto	50.68	1.80	52-10
Coata	50.68	1.81	52-10
Huata	50.67	1.80	52-10
Juliaca	50.69	1.82	52-10
Paucarcolla	50.66	1.78	52-10
Pusi	50.69	1.82	52-10
Samán	50.70	1.84	52-10
San Miguel	50.69	1.82	52-10
Taraco	50.70	1.84	52-10
Ollachea	50.70	8.42	52-10
San Gabán	50.72	8.44	52-10

Ayaviri	50.43	-0.40	52-10
José Domingo Choquehuanca	50.42	-0.41	52-10
Llalli	50.43	-0.41	52-10
Ocuviri	50.41	-0.43	52-10
Pucará	50.42	-0.42	52-10
Tirapata	50.43	-0.40	52-10
Umachiri	50.43	-0.39	52-10
Vilavila	50.41	-0.43	52-10
Cupi	50.43	-0.39	52-10
Conduriri	49.69	1.46	52-10
Cuturapi	49.72	1.50	52-10
Desaguadero	49.69	1.45	52-10
Huacullani	49.69	1.46	52-10
Ilave	49.72	1.50	52-10
Juli	49.72	1.49	52-10
Kelluyo	49.68	1.44	52-10
Pomata	49.71	1.49	52-10
Yunguyo	49.72	1.50	52-10
Zepita	49.70	1.47	52-10
Cabanillas	49.75	-0.54	52-10
Mañazo	49.75	-0.54	52-10
San Antonio	49.74	-0.56	52-10
Anapia	49.63	1.17	52-10
Copani	49.62	1.17	52-10
Palca	49.69	-0.45	52-10
Cabanilla	49.67	-0.49	52-10
Lampa	49.69	-0.46	52-10
Paratia	49.68	-0.47	52-10
Santa Lucía	49.66	-0.50	52-10
Chucuito	49.42	1.38	52-10
Platería	49.41	1.37	52-10
Puno	49.42	1.38	52-10
Tiquillaca	49.42	1.38	52-10
Vilque	49.44	1.40	52-10
Acora	49.19	-0.45	52-10
Pichacani	49.19	-0.44	52-10
Capazo	48.91	-0.20	52-10
Santa Rosa	48.93	-0.18	52-10
Antauta	49.41	0.24	52-10
Asillo	49.37	0.19	52-10
Macari	49.38	0.20	52-10
Nuñoa	49.41	0.24	52-10
Orurillo	49.38	0.20	52-10
Santa Rosa	49.39	0.22	52-10
Pilcuyo	48.08	4.76	52-10

Crucero	48.00	0.29	52-10
Muñani	47.97	0.25	52-10
Potoni	47.99	0.28	52-10
Putina	47.97	0.24	52-10
San Antón	47.98	0.27	52-10
San José	47.97	0.25	52-10
Ollaraya	47.63	3.25	52-10
Tinicachi	47.63	3.25	52-10
Unicachi	47.63	3.25	52-10
Conima	47.66	4.18	52-10
Huayrapata	47.67	4.20	52-10
Moho	47.66	4.19	52-10
Tilali	47.65	4.17	52-10
Ananea	47.54	3.29	52-10
Cuyocuyo	47.56	3.31	52-10
Patambuco	47.57	3.33	52-10
Quiaca	47.56	3.32	52-10
Sandia	47.53	3.27	52-10
Sina	47.56	3.31	52-10
Yanahuaya	47.57	3.33	52-10
Ajoyani	47.27	3.96	52-10
Coasa	47.30	4.01	52-10
Ituata	47.30	4.00	52-10
Usicayos	47.27	3.97	52-10
Cojata	46.94	0.95	52-10
Inchupalla	46.94	0.95	52-10
Quilcapuncu	46.95	0.97	52-10
Rosaspata	46.92	0.93	52-10
Vilquechico	46.93	0.94	52-10
Corani	45.35	1.24	46-34
Macusani	45.34	1.23	46-34

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la Tabla N° 26 se presenta las temperaturas máximas y mínimas obtenidas por los modelos matemáticos LTPP 2004 y LTPP 1998-2000 para una confiabilidad del 50 % identificado 4 grados de desempeño, 64-10 para 2 distritos, 58-16 para 4 distritos, 52-10 para 102 distritos y 46-10 para 2 distritos.

5.3.6. Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Puno para una confiabilidad del 50%.

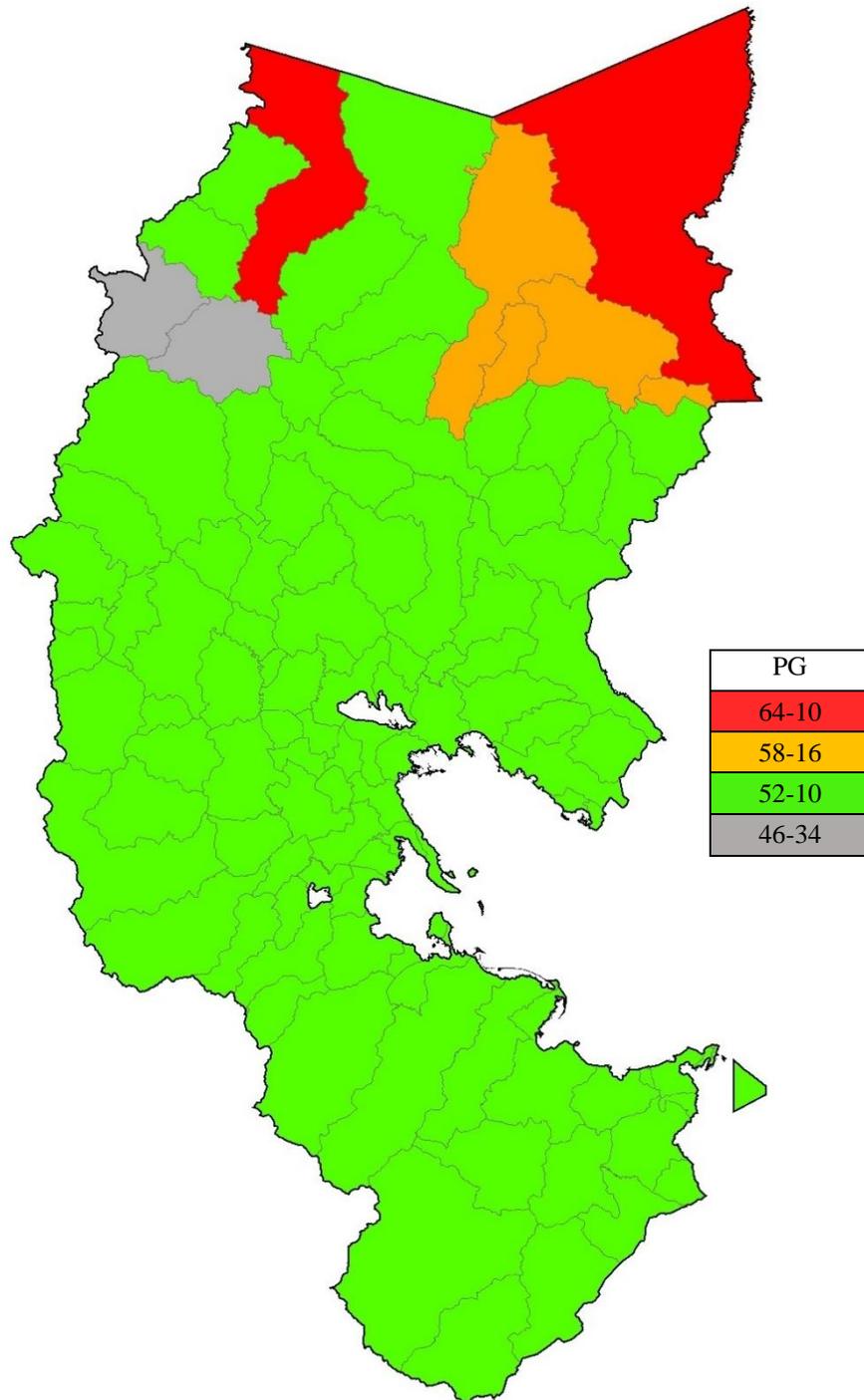


Figura N° 28: Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Puno con una confiabilidad del 50%

Fuente: Elaboración Propia usando el software ArcMap 10.4.1.

5.3.7. Determinación y análisis del grado de desempeño (PG) de la región Puno para una confiabilidad del 98%.

Tabla N° 33: Grado de Desempeño (PG) de los distritos de la región Puno con una confiabilidad del 98%.

Región Puno			
Distritos	Modelo LTPP		PG
	2004	1998 - 2000),	
	TMAX _{98%}	TMIN _{98%}	
San Pedro De Putina Punco	69.42	8.88	70-10
Ayapata	64.46	8.47	70-10
Alto Inambari	58.67	5.98	64-10
Limbani	58.69	6.01	64-10
Phara	58.67	5.98	64-10
San Juan Del Oro	58.66	5.96	64-10
Achaya	56.21	-4.32	58-16
Arapa	56.22	-4.30	58-16
Azángaro	56.24	-4.27	58-16
Chupa	56.22	-4.30	58-16
Huancané	56.22	-4.31	58-16
Huatasani	56.23	-4.29	58-16
Nicasio	56.21	-4.31	58-16
Pedro Vilca Apaza	56.23	-4.29	58-16
San Juan De Salinas	56.23	-4.29	58-16
Santiago De Pupuja	56.22	-4.30	58-16
Pisacoma	54.84	-4.01	58-16
Amantani	55.06	-2.35	58-16
Atuncolla	55.05	-2.36	58-16
Cabana	55.06	-2.35	58-16
Calapuja	55.09	-2.31	58-16
Caminaca	55.09	-2.31	58-16
Capachica	55.06	-2.35	58-16
Caracoto	55.06	-2.34	58-16
Coata	55.07	-2.34	58-16
Huata	55.06	-2.35	58-16
Juliaca	55.07	-2.33	58-16
Paucarcolla	55.05	-2.36	58-16
Pusi	55.08	-2.33	58-16
Samán	55.09	-2.31	58-16
San Miguel	55.08	-2.32	58-16
Taraco	55.09	-2.31	58-16
Ollachea	54.84	3.82	58-16
San Gabán	54.86	3.84	58-16

Ayaviri	55.32	-4.65	58-16
José Domingo Choquehuanca	55.31	-4.66	58-16
Llalli	55.31	-4.65	58-16
Ocuviri	55.30	-4.68	58-16
Pucará	55.30	-4.66	58-16
Tirapata	55.32	-4.64	58-16
Umachiri	55.32	-4.64	58-16
Vilavila	55.30	-4.67	58-16
Cupi	55.32	-4.64	58-16
Conduriri	53.95	-2.62	58-16
Cuturapi	53.98	-2.58	58-16
Desaguadero	53.95	-2.63	58-16
Huacullani	53.95	-2.62	58-16
Ilave	53.98	-2.58	58-16
Juli	53.98	-2.59	58-16
Kelluyo	53.94	-2.64	58-16
Pomata	53.97	-2.59	58-16
Yunguyo	53.98	-2.58	58-16
Zepita	53.96	-2.61	58-16
Cabanillas	54.40	-4.73	58-16
Mañazo	54.40	-4.73	58-16
San Antonio	54.39	-4.76	58-16
Anapia	54.16	-3.09	58-16
Copani	54.16	-3.09	58-16
Palca	54.27	-4.50	58-16
Cabanilla	54.25	-4.53	58-16
Lampa	54.27	-4.50	58-16
Paratia	54.26	-4.52	58-16
Santa Lucía	54.24	-4.54	58-16
Chucuito	53.84	-2.63	58-16
Platería	53.83	-2.65	58-16
Puno	53.84	-2.63	58-16
Tiquillaca	53.84	-2.64	58-16
Vilque	53.85	-2.62	58-16
Acora	53.44	-4.46	58-16
Pichacani	53.44	-4.46	58-16
Capazo	53.04	-4.23	58-16
Santa Rosa	53.06	-4.20	58-16
Antauta	54.21	-4.21	58-16
Asillo	54.18	-4.25	58-16
Macari	54.18	-4.25	58-16
Nuñoa	54.21	-4.21	58-16
Orurillo	54.18	-4.25	58-16
Santa Rosa	54.20	-4.23	58-16
Pilcuyo	52.14	0.38	58-16

Crucero	52.98	-4.03	58-16
Muñani	52.95	-4.08	58-16
Potoni	52.97	-4.04	58-16
Putina	52.95	-4.08	58-16
San Antón	52.96	-4.06	58-16
San José	52.95	-4.08	58-16
Ollaraya	51.94	-0.99	52-10
Tinicachi	51.94	-0.98	52-10
Unicachi	51.94	-0.99	52-10
Conima	51.96	-0.01	52-10
Huayrapata	51.98	0.01	52-10
Moho	51.97	0.01	52-10
Tilali	51.96	-0.01	52-10
Ananea	51.99	-0.88	52-10
Cuyocuyo	52.01	-0.86	52-10
Patambuco	52.02	-0.84	52-10
Quiaca	52.01	-0.86	52-10
Sandia	51.98	-0.90	52-10
Sina	52.01	-0.86	52-10
Yanahuaya	52.02	-0.84	52-10
Ajoyani	51.75	-0.22	52-10
Coasa	51.79	-0.17	52-10
Ituata	51.78	-0.18	52-10
Usicayos	51.76	-0.22	52-10
Cojata	51.59	-3.19	52-10
Inchupalla	51.59	-3.18	52-10
Quilcapuncu	51.60	-3.17	52-10
Rosaspata	51.57	-3.21	52-10
Vilquechico	51.58	-3.20	52-10
Corani	49.55	-3.31	52-10
Macusani	49.54	-3.32	52-10

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la Tabla N° 27 se presenta las temperaturas máximas y mínimas obtenidas por los modelos matemáticos LTPP 2004 y LTPP 1998-2000 para una confiabilidad del 50 % identificado 4 grados de desempeño, 70 – 10 para 2 distritos, 64-10 para 4 distritos, 58-16 para 79 distritos, 52-10 para 25 distritos.

5.3.8. Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Puno para una confiabilidad del 98%.

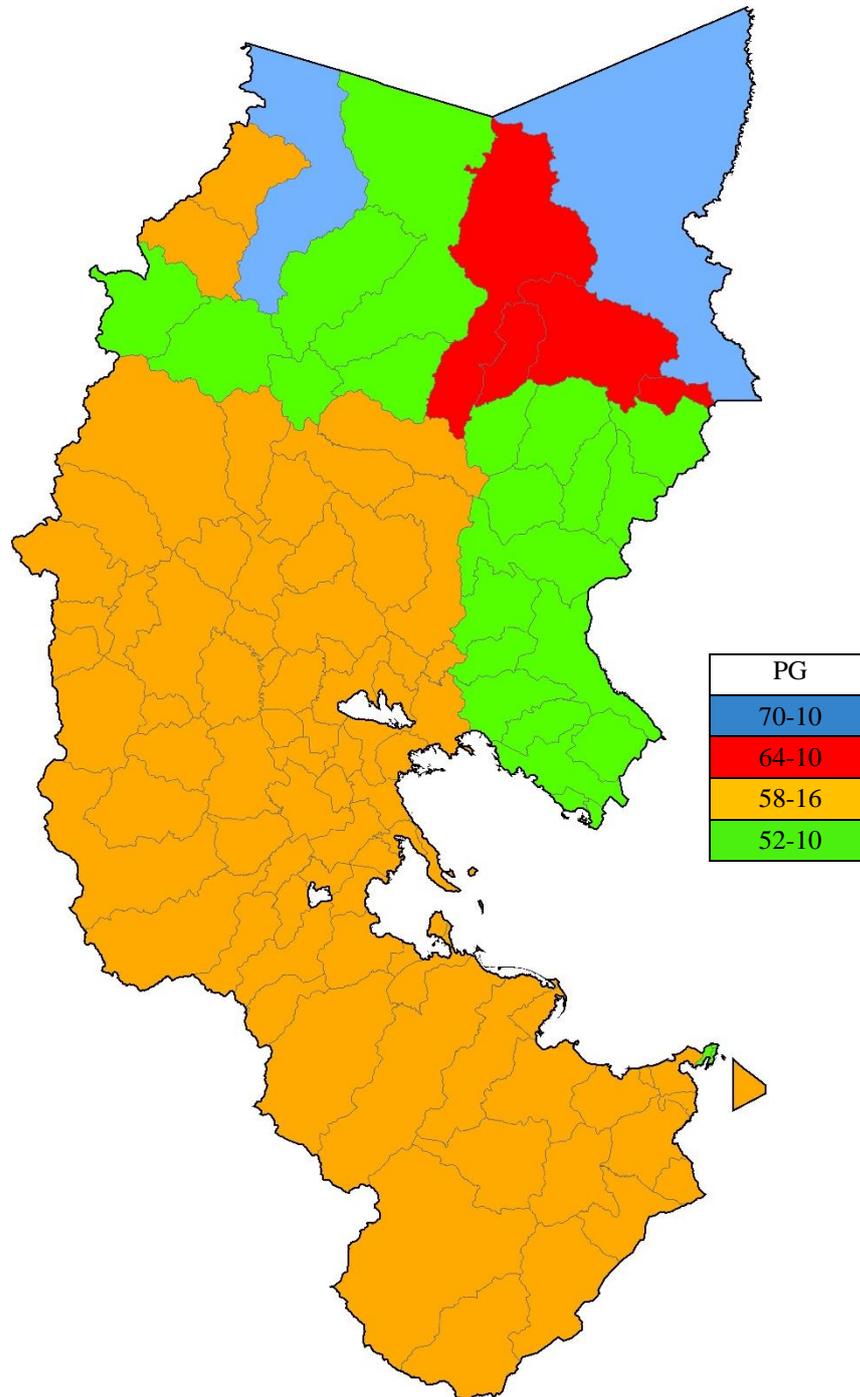


Figura N° 29: Mapa de grado de desempeño (PG) de la región Puno con una confiabilidad del 98%

Fuente: Elaboración Propia.

Los Mapas de Grado de Desempeño (PG) de las regiones de Cuzco y Puno nos muestran la zonificación por Grado de Desempeño (PG), dentro de estas podemos observar que dentro de la Región Cuzco en la zona selva donde presentan mayores temperaturas se encuentra el PG 70-10 y 64-10 para una confiabilidad del 98% y 50% respectivamente, de la misma manera en la región Puno en la zona selva se encuentra el PG 70-10 y 60-10 para una confiabilidad del 98% y 50% respectivamente además se observa que en la zona sierra de la región Cusco predomina el PG 58-16 y 52-10 para una confiabilidad del 98% y 50% esto debido a las bajas temperatura registradas en los distritos de estudio, en la zona sierra de la región Puno Predomina el PG 58-16 y PG 52-10 para una confiabilidad del 98% y 50% respectivamente, y se observa para la confiabilidad del 50% el PG 46-34 en los distritos de Corani y Macusani, ambos distritos presentaron la temperatura más baja registrada por el proyecto MERRA-2 (NASA).

5.4. Corrección del Grado de Desempeño por tráfico y velocidad

5.4.1. Región Puno

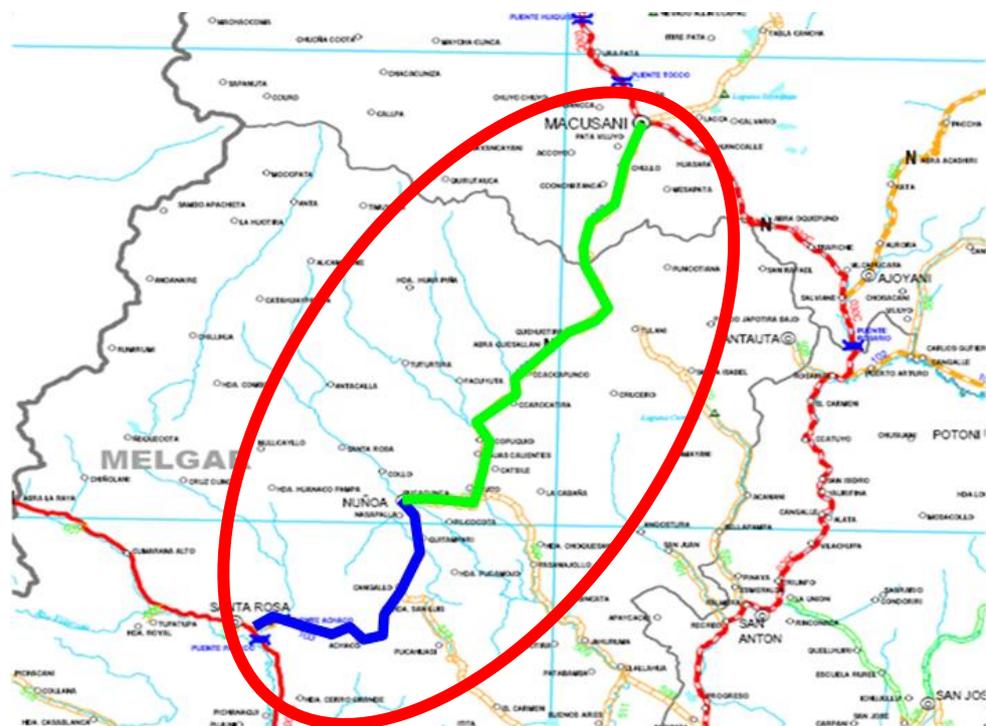


Figura N° 30: Ubicación del proyecto Mejoramiento de la carretera.

Fuente: “Mejoramiento de la Carretera (Emp. PE-R3S) Santa Rosa – Nuñoa – Macusani – Emp. PE – 34B – Distrito de Macusani”, Tramo Nuñoa – Macusani”. (2011).



Figura N° 31: Mapa de Zonificación por grado de desempeño (PG) de los distritos de Nuñoa y Macusani.

Fuente: Elaboración Propia usando el software ArcMap 10.4.1.

Como se muestra en la figura el proyecto se encuentra en los distritos de Nuñoa y Macusani, el distrito de Nuñoa presenta un grado de desempeño de 58-16 y el distrito de Macusani presenta un grado de performance de 50-10 para una confiabilidad del 98%, el Grado de Desempeño (PG) debe corregirse según el nivel de carga y velocidad de la carretera. Para nuestra investigación, se tomó como ejemplo el proyecto “Mejoramiento de la carretera Emp PE-3S (Santa Rosa) – Nuñoa – Macusani – Emp R. PE – 34B”, Tramo II Nuñoa – Macusani en la región de Puno. Este tramo pertenece a la ruta departamental PU-100

Los datos requeridos para la corrección son el nivel de tráfico y la velocidad de diseño, para ello, recopilamos la información proporcionada en el expediente técnico. El desarrollo del proyecto fue hecho en el 2012, para lo cual haremos una proyección del tráfico futuro:

Tabla N° 34: ESAL de diseño de proyecto para la región de Puno

Estación de conteo	ESAL POR AÑO				
Tramo Macusani - Nuñoa	2012	2017	2022	2028	2031
	21845.0	42096.2	52435.1	68390.3	78163.6
ESAL DE DISEÑO	1048416.944				

Fuente: Proyecto: “Mejoramiento de la Carretera (Emp.PE-R3S) Santa Rosa – Nuñoa – Macusani – Emp. PE – 34B – Distrito de Macusani”, Tramo Nuñoa – Macusani”. (2011).

Para el dato de velocidad, lo obtenemos de acuerdo al diseño geométrico de la vía, el cual se presenta en la siguiente tabla:

Tabla N° 35: Datos geométricos del proyecto en la región Puno

Parámetro	Valor	Medida
Velocidad	60	km/h
Calzada	6.6	m
Bermas	0.9	m
Radio mínimo	80	m
Radio máximo	900	m
Bombeo	2.5	%

Fuente: Proyecto: “Mejoramiento de la Carretera (Emp.PE-R3S) Santa Rosa – Nuñoa – Macusani – Emp. PE – 34B – Distrito de Macusani”, Tramo Nuñoa – Macusani”. (2011).

De acuerdo con los parámetros de corrección presentados en la Tabla N° 5 del CAPITULO II de la presente investigación, nuestro proyecto se encuentra dentro una clasificación ESAL de diseño de entre 0.3 a <3 millones de ESAL y es clasificado con una velocidad baja de 60 km/h, con lo cual debe corregirse en 1 PG. Con la corrección del proyecto, se obtuvo un valor para el distrito de Nuñoa PG 64-16 y para el distrito de Macusani PG 58-16. Y de acuerdo con la tabla N° 12. Relación del Grado de Penetración (PEN) con el Grado de Desempeño (PG) se determina que para el distrito de Nuñoa se tiene un cemento asfáltico PEN 60/70 y para el distrito de Macusani se tiene un cemento asfáltico PEN 120/150.

5.4.2. Región Cusco.

Para la región Cuzco, se eligió el proyecto “Estudio definitivo para la construcción y mejoramiento de la carretera Ollantaytambo-Quillabamba, Tramo Alfamayo-Chaullay-Quillabamba”, el cual tiene 54+240 kilómetros de longitud.

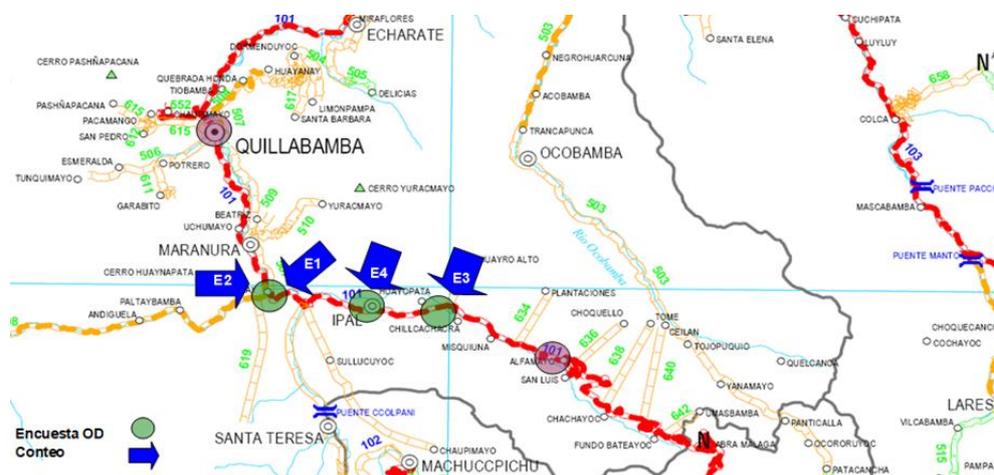


Figura N° 32: Ubicación de las estaciones

Fuente: Estudio definitivo para la construcción y mejoramiento de la carretera Ollantaytambo-Quillabamba, Tramo Alfamayo-Chaullay-Quillabamba. (2008).

Para la programación del control vehicular, se colocaron las siguientes estaciones:

Tabla N° 36: Identificación de las estaciones de control, con sus respectivos tramos.

Código	Tramo	Ubicación
1.- Volumen y clasificación vehicular		
E 1	Chaullay-Quillabamba	Salida de Chaullay, hacia Quillabamba (margen izquierda)
E 2	Chaullay-Quillabamba	Salida de Chaullay, hacia Quillabamba (margen derecha)
E 3	Alfamayo-Huayopata	Acceso de Huyro, hacia Alfamayo
2.- Encuesta Origen-Destino		
E 1	Chaullay (margen izquierda)	Salida de Chaullay, hacia Quillabamba
E 2	Chaullay (margen derecha)	Salida de Chaullay, hacia Quillabamba
E 3	Huyro	Acceso de Huyro, hacia Alfamayo
4.- Estudio Velocidad		

V1	Alfamayo-Chaullay	Huayo
V2	Chaullay-Quillabamba	Chaullay-Quillabamba

Fuente: Estudio definitivo para la construcción y mejoramiento de la carretera Ollantaytambo-Quillabamba, Tramo Alfamayo-Chaullay-Quillabamba. (2008).

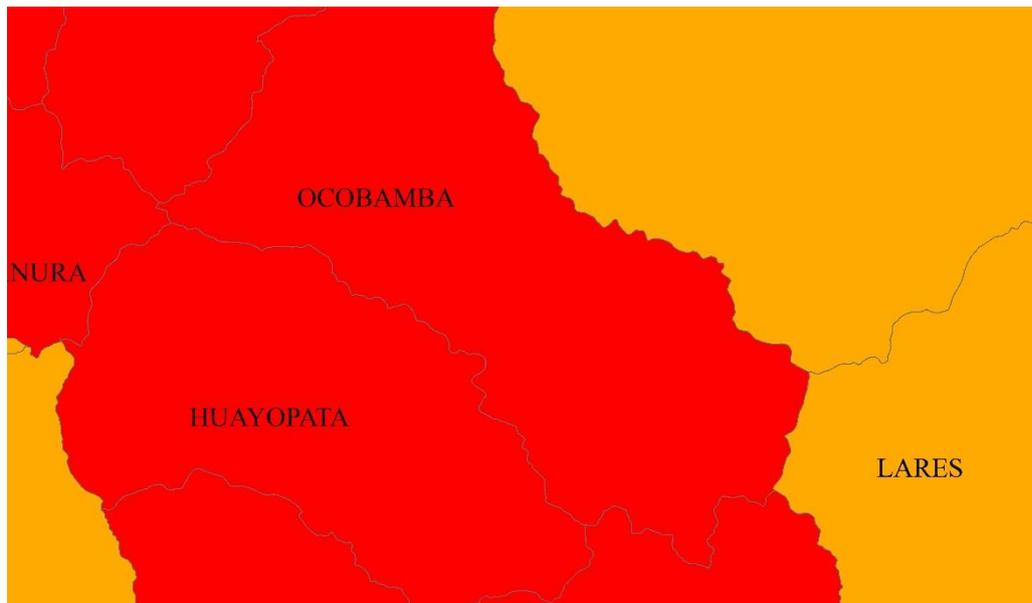


Figura N° 33: Mapa de Zonificación por grado de desempeño (PG) de los distritos de Ocobamba y Huayopata

Fuente: Elaboración Propia usando el software ArcMap 10.4.1.

Como se muestra en la figura el proyecto se encuentra en los distritos de Ocobamba y Huayopata los cuales presentan un grado de desempeño de 60-10 para una confiabilidad del 98%, el Grado de Desempeño (PG) debe corregirse según el nivel de carga y velocidad de la carretera. Para nuestra investigación, se tomó como ejemplo el proyecto “Estudio definitivo para la construcción y mejoramiento de la carretera Ollantaytambo-Quillabamba, Tramo Alfamayo-Chaullay-Quillabamba”.

Para las cargas de tráfico a 20 años, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla N° 37: Resumen de Ejes equivalente por tamos

Tramo	Estación	2009	2008- 2013	2008- 2018	2008- 2023	2008- 2028
Chauilly- Quillabamba	E 1	7.3E+04	4.0E+05	9.0E+05	1.5E+06	2.2E+06
Alfamayo- Huayopata	E 3	1.1E+05	6.2E+05	1.4E+06	2.3E+06	3.4E+06
Huayopata- Chauilly	E 4	1.3E+05	6.9E+05	1.5E+06	2.6E+06	3.8E+06

Fuente: Estudio definitivo para la construcción y mejoramiento de la carretera Ollantaytambo-Quillabamba, Tramo Alfamayo-Chauilly-Quillabamba. (2008).

Con respecto a la velocidad, se presentan la siguiente tabla:

Tabla N° 38: Datos de velocidad del tramo Alfamayo-Quillabamba

Estación	Sentido	Vehículos Ligeros	Cr	Micros	Buses	Camiones Unitarios
Chauilly (Margen Derecha)	Chauilly- Quillabamba	24	18	13	15	17
	Quillabamba- Chauilly	23	18		14	17
Chauilly (Margen Izquierda)	Chauilly- Quillabamba	26	20			17
	Quillabamba- Chauilly	26	20		17	15
Huyro	Huyro- Alfamayo	27	32		24	25
	Alfamayo- Huyro	25	32			25

Fuente: Estudio definitivo para la construcción y mejoramiento de la carretera Ollantaytambo-Quillabamba, Tramo Alfamayo-Chauilly-Quillabamba. (2008).

De acuerdo con los parámetros de corrección presentados en la Tabla N° 5 del CAPITULO II de la presente investigación, en las estaciones encontramos velocidades entre 13 a 32 km/h, además un ESAL de 2.2×10^6 . De acuerdo con el factor de corrección, como tenemos un ESAL 0.3 a <3 y la velocidad se encuentra entre 20 km/h y 70km/h, se debe corregir 1 PG. Para la corrección del proyecto se obtuvo un PG 70-10. Y de acuerdo con la tabla N° 12. Relación del Grado de Penetración (PEN) con el Grado de Desempeño (PG) se

determina que para el distrito de Nuñoa se tiene un cemento asfáltico PEN 40/50.

5.5. Contratación de Hipótesis

5.5.1. Hipótesis Especifica 1

Hipótesis alterna 1: Mediante la aplicación de los modelos matemáticos SHRP y LTPP se obtiene los grados de desempeño (PG) para la elaboración del mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno

Hipótesis nula 1: Mediante la aplicación de los modelos matemáticos SHRP y LTPP no se obtiene los grados de desempeño (PG) para la elaboración del mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno

De acuerdo a la tabla N° 23, 24, 26, 27, 28 y 29 se logró calcular las temperaturas máximas y mínimas del pavimento de acuerdo a los modelos matemáticos del SHRP y LTPP en las regiones de Cuzco y Puno respectivamente. En las tablas N° 30, 31, 32 y 33 se presentan el resultado de los Grados de Desempeño (PG) para las regiones de Cuzco y Puno respectivamente.

Según Arteaga (2017), se obtuvo los grados de desempeño aplicando los modelos matemáticos SHRP y LTPP determinando un PG de 64-28 para zonas de bajo volumen de tránsito, un PG 70-28 para volúmenes medio de tránsito y para condiciones de alto volumen de tráfico, se estableció un PG 76-28. Se menciona también que el modelo LTPP es menos conservador que el modelo SHRP.

Por lo tanto, la hipótesis específica 1 es válida.

5.5.2. Hipótesis Especifica 2

Hipótesis alterna 2: Mediante un análisis en el software ArcMap se delimita el área de influencia de los grados de desempeño (PG), para la elaboración del mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE de las regiones de Cuzco y Puno.

Hipótesis nula 2: Mediante un análisis en el software ArcMap no se delimita el área de influencia de los grados de desempeño (PG), para la elaboración del mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE de las regiones de Cuzco y Puno.

De acuerdo a las figuras N° 26, 27, 28 y 29 con el software ArcMap se pudo delimitar el área de influencia de los grados de desempeño (PG) por cada distrito de la región de Cusco con un total de 112 distritos y la región de Puno con un total de 110 distritos.

Según Miranda (2015), menciona que la utilización del software ArcMap sirvió para determinar el área de influencia de los grados de desempeño (PG) para modelos de grados de desempeño (PG) en Guatemala, que se realizó con base en los datos climáticos (temperatura del aire), obtenidas de las 40 estaciones meteorológicas del Insivumeh, las ecuaciones de predicción de la temperatura del pavimento, que son los sistemas SHRP y LTPP los que definen el tipo de ecuación basado en los estudios teóricos y experimentales, y basados en los modelos de grados de desempeño.

Por lo tanto, la hipótesis específica 2 es válida.

5.5.3. Hipótesis Especifica 3

Hipótesis alterna 3: Las correcciones basadas en el tráfico y la velocidad modifican el Grado de Desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico en las carreteras de las regiones de Cuzco y Puno.

Hipótesis nula 3: Las correcciones basadas en el tráfico y la velocidad no modifican el Grado de Desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico en las carreteras de las regiones de Cuzco y Puno.

De acuerdo a los proyectos “Estudio definitivo para la construcción y mejoramiento de la carretera Ollantaytambo-Quillabamba” de la región Cusco y “Mejoramiento de la Carretera (Emp.PE-R3S) Santa Rosa – Nuñoa – Macusani – Emp. PE – 34B – Distrito de Macusani”, Tramo Nuñoa – Macusani (2011)” de la región Puno, las correcciones por tráfico y velocidad modificaron el Grado de Desempeño (PG) en 1 PG.

Según Alcalá y Delgado (2020), menciona que las correcciones por tráfico y velocidad en las vías de estudio, los valores de Grado de Desempeño (PG) fueron modificados teniendo en consideración las cargas de tráfico vehicular a las que estas son expuestas, de igual manera con la velocidad, ya que, dentro de las vías de estudio, estas son en gran parte de tráfico lento, factores que son determinantes para la corrección.

Por lo tanto, la hipótesis específica 3 es válida.

CONCLUSIONES

1. Según los resultados obtenidos en las tablas N° 30 y 31 los grados de desempeño (PG) en la región Cusco de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE fueron PG 64 – 10, PG 58 – 16 y PG 52 – 10 para una confiabilidad del 50 % y PG 70 – 10, PG 64 – 10, PG 58 – 16, PG 52 – 10 para una confiabilidad del 98% respectivamente, y según las tablas N° 32 y 33 los grados de desempeño (PG) en la región Puno de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE fueron PG 64 – 10, PG 58 – 16, PG 52 – 10 y PG 46 – 34 para una confiabilidad del 50 % y PG 70 – 10, PG 64 – 10, PG 58 – 16, PG 52 – 10 para una confiabilidad del 98%, aplicando los modelos matemáticos SHRP del año 1994, el modelo matemático CSHRP del año 1996, conjuntamente se evaluó los modelos LTPP propuestos en los años 1996, el modelo matemático LTPP del año 1998 – 2000 y el modelo matemático LTPP del año 2004 para las temperaturas mínimas, concluyendo que los modelos propuestos por LTPP en los años 1998-2000 y 2004.
2. El área influencia de los grados de desempeño (PG) se delimitó mediante el software ArcMap, asignando un punto de control de temperaturas por cada distrito de las regiones de Cusco y Puno, obteniendo 112 puntos de control para la región Cusco y 110 puntos de control para la región Puno, obteniendo para cada distrito su grado de desempeño correspondiente.
- 3.- Mediante las correcciones por tráfico y velocidad de la carretera Ollantaytambo-Quillabamba ubicada en los distritos de Ocobamba y Huayopata de la región Cusco se modificó en 1 grado de desempeño (PG), obteniendo un nuevo PG 70 – 10, así mismo se aplicó las correcciones por tráfico y velocidad para la carretera Santa Rosa – Nuñoa – Macusani, ubicados en los distritos de Nuñoa y Macusani de la región Puno modificándose en 1 grado de desempeño (PG), obteniendo un nuevo PG 64 – 16 y PG 58 – 16 respectivamente.
4. Se alcanzó establecer el mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG) para los distritos de las regiones de Cuzco y Puno según la clasificación SUPERPAVE, teniendo como base de análisis los datos climáticos proporcionados por el proyecto

MERRA-2 (NASA). El mapa de zonificación propuesto contribuirá a la adecuada selección de cemento asfáltico en futuros proyectos de pavimentación, con el fin de reducir costos de mantenimiento y los fallos prematuros en el pavimento asfáltico.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar un mayor número de puntos de control de temperaturas que abarquen la mayor área de las regiones para determinar el grado de desempeño (PG) con mayor exactitud y poder establecer el mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) más ajustado a la realidad climática de cada región.
2. Se recomienda el uso de los datos proporcionados por proyecto MERRA-2 (NASA), ya que brinda datos confiables y completos de temperaturas máximas y mínimas que cumplen los requerimientos exigidos para aplicar la metodología SUPERPAVE, respecto a los datos proporcionados por SENAMHI, ya que la data en algunos casos es incompleta además de no contar con estaciones meteorológicas suficientes para abarcar las temperaturas de toda la región.
3. Se recomienda aplicar la metodología SUPERPAVE en todo el territorio peruano. Ello lleva a realizar un gasto en investigación para obtener mediciones continuas de temperatura del aire y relacionarlo con la temperatura del pavimento, pero si se compara con el gasto que se genera con el deterioro prematuro de nuestras carreteras, se obtendría un beneficio a largo plazo al reducirse el gasto en mantenimiento y una mayor durabilidad de las carreteras en el país.
4. En base al manual de especificaciones técnicas del Ministerio del Transporte y Comunicaciones (MTC), se recomienda modificar la tabla 423-13 la cual está basada en AASHTO M320. En la tabla mencionada se presenta una relación de Grado de Desempeño (PG) a altas temperaturas y su relación con las bajas temperaturas, las cuales deben seleccionarse de acuerdo a la máxima temperatura. En nuestra investigación se determinó que el Grado de Desempeño (PG) obtenido sin corrección fue de 58-16 para un nivel de confiabilidad del 98%. Aplicando la corrección para un determinado proyecto, se debe corregir en un PG el valor de la temperatura máxima, con lo cual obtendríamos 64-10 de acuerdo a lo expresado por el MTC. Sin embargo, se recomienda colocar a bajas temperaturas un valor de -16, debido a tener una mayor exigencia a bajas temperaturas.

REFERENCIAS

- (SHRP), S. H. (1994). Superior Performing Asphalt Pavement (SUPERPAVE): The product of the SHRP.
- Abdullah, A. S. (2008). Application of SUPERPAVE System for Binder Selection Based on Local Conditions.
- Alcala Pascual , R. F., & Delgado Ramirez, C. J. (2020). Mapa de grado de desempeño(PG) para ligantes asfálticos segun la clasificación SUPERPAVE, aplicado en las regiones de Lima, Ancash e Ica. Lima, Perú.
- Alonso Aenlle, A. M. (2020). Determinacion y zonificacion del Grado de Desempeño de los asfaltos para Cuba segun la metodologia SUPERPAVE. Universidad del Norte. doi:<https://doi.org/10.14482/inde.38.2.620.19>
- asfalto, I. d. (1982). Principios de construccion de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.
- Bernal Torres, C. A. (2010). Metodología de la investigación (Tercera ed.). Colombia: Pearson Educación.
- Bocco, M., Bravo, I., Turraca, D., Sagayo, S., & Salim Rosales, J. (2019). Evaluacion de datos obtenidos del producto MERRA-2 (NASA) con estaciones metereológicas de las provincias de Catamarca y La Rioja (Argentina) para estimar temperaturas en zaonas nogaleras. Catamarca, Argentina. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/115505>
- Borja Suárez, M. (2016). Metodología de investigación científica para ingenieros. Chiclayo.
- Comunicaciones, M. d. (2018). Glosario de terminos de uso frecuente en los proyectos de infraestructura vial.
- Corredor, G. (2004). Apuntes de pavimentos. Caracas.
- Cusi Ramos, J. C., & Duran Egoavil, M. R. (2021). Determinación del grado de desempeño - Superpave de cementos asfálticos en control de fallas de pavimentos flexibles, carretera Huancavelica - Santa Ines. Huancavelica, Perú. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3533>
- Ezcalante Zegarra, J. R., Fernandez Junior, J. L., & Saez Alvan, L. d. (2011). Clasificación de los ligantes asfálticos por desempeño para las diferentes regiones climáticas del Perú. Sao Paulo. Obtenido de <https://qdoc.tips/clasificacion-de-ligantes-por-ucl-pdf-free.html>

- Gomez, L. C. (2015). Modelización matemática. Mexico.
- Hernández Sampieri, R. (2014). Metodología de la investigación (Sexta ed.). Mexico D. F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A.
- Huamán Guerreño, N., & Chang Albitres, C. (2016). la deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. Lima: Perfiles de Ingeniería. Obtenido de https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles_Ingenieria/article/view/402/398
- Huang, Y. (2004). Análisis y diseño de pavimentos.
- Jaramillo, L. A. (Noviembre de 2017). Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y cuantificación de la influencia del cambio climático en la selección del ligante. Valparaíso, Chile.
- Jong-Sub Lee, J. H.-S.-D. (2018). Asphalt Binder Performance Grading of North Korea for SUPERPAVE asphalt mix Design.
- Marisol Andrades Rodríguez, C. M. (2012). Fundamentos de climatología.
- Mihretu, M. G. (2018). Mapping Temperature Zone of Ethiopia for Binder Performance Grading System. Ethiopia.
- Ministerio de transportes y comunicaciones. (2013). Manual de carreteras, especificaciones técnicas generales para la construcción. Perú. Obtenido de http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4955.pdf
- Miranda Calderón, R. (Septiembre de 2015). Determinación del tipo de cemento asfáltico según el Grado de Desempeño para el diseño de la carpeta de rodadura de acuerdo a la zonificación climática del país de Guatemala. Guatemala.
- Miranda, E. B. (Mayo de 2013). Determinación del tipo de cemento asfáltico según el Grado de Desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tráfico. Costa Rica.
- Mohseni, A. (1998). LTPP seasonal asphalt concrete (ac) Pavement temperature Models.
- Orozco Santoyo, R. V. (2008). Aplicación del concreto asfáltico en canales y presas. Obtenido de <https://es.slideshare.net/AcademiaDeIngenieriaMx/aplicacion-del-concreto-en-canales-y-presas>
- Ortiz Medina, H. G. (2020). Análisis del clima para la predicción de Grados de Desempeño empleando el método SUPERPAVE en la carretera - Tramo Chíncha alta - Huancavelica. Lima, Perú.
- Robert McGennis, M. A. (1994). Antecedente del diseño y análisis de mezclas asfálticas.

- Sanchez Rosado, D. (1987). Materiales asfálticos utilizados en pavimentación. Mexico.
Obtenido de <http://dimsec.com/wp-content/uploads/2017/08/MATERIALES-ASFALTICOS.pdf>
- SENAMHI. (2020). Mapa climático del Perú. Lima, Perú. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Transportation, T. I. (2011). Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diesel con contenido ultra bajo de azufre. Obtenido de https://theicct.org/sites/default/files/ICCT_RefiningTutorial_Spanish.pdf
- Zambrano, C. I. (Noviembre de 2017). Análisis comparativo de normas SUPERPAVE para ligantes asfálticos. Valparaíso, Chile.

ANEXO

Anexo 1: Matriz de consistencia

Mapa de zonificación por grados de desempeño (PG) para cementos asfálticos según la clasificación SUPERPAVE

Tabla N° 39: Matriz de Consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Variable Independiente	Variable Independiente	
¿Es posible establecer un mapa de zonificación por grado de desempeño (PG), con la base de datos climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA), para seleccionar el tipo de cemento asfáltico de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno?	Establecer un mapa de zonificación por grados de desempeño (PG), con la base de datos climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA), para seleccionar el tipo de cemento asfáltico de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno, año 2021.	Se puede establecer el mapa de zonificación por Grado de desempeño (PG) con la base de datos climatológicos del proyecto MERRA-2 (NASA), para la selección del tipo de cemento asfáltico de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno.	Clasificación SUPERPAVE para cementos asfálticos	Modelos matemáticos para la predicción de los Grados de Desempeño (PG)	Modelo SHRP Modelo LTPP	Orientación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Nivel: Descriptivo Diseño: No experimental
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicos	Variable Dependiente	Variable Dependiente	Variable Dependiente	
1. ¿Cuáles son los grados de desempeño (PG) al aplicar los modelos matemáticos LTPP y SHRP para la elaboración del mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE de las regiones de Cuzco y Puno?	1. Calcular los grados de desempeño (PG) aplicando los modelos matemáticos SHRP y LTPP para la elaboración del mapa de zonificación por grados de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno.	1. Mediante la aplicación de los modelos matemáticos SHRP y LTPP se obtiene los grados de desempeño (PG) para la elaboración del mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno.	Mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG)	Zonificación de los grados de desempeño (PG)	climatología	

<p>2. ¿Cómo realizar la delimitación del área de influencia de los grados de desempeño (PG) para graficar un mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE de las regiones de Cuzco y Puno?</p>	<p>2. Delimitar el área de influencia de los grados de desempeño (PG) para graficar un mapa de zonificación por grado de desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE en las regiones de Cuzco y Puno.</p>	<p>2. Mediante un análisis en el software ArcMap se delimita el área de influencia de los grados de desempeño (PG), para la elaboración del mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG) de acuerdo a la clasificación SUPERPAVE de las regiones de Cuzco y Puno.</p>	<p>Parámetro de diseño de pavimentos flexibles</p>
<p>3. ¿En qué medida las correcciones por tráfico y velocidad modifican el grado de desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico en las carreteras de las regiones de Cuzco y Puno?</p>	<p>3. Aplicar las correcciones por tráfico y velocidad del grado de desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico en las carreteras de las regiones de Puno y Cuzco.</p>	<p>3. Las correcciones basadas en el tráfico y la velocidad modifican el Grado de Desempeño (PG) para la selección del tipo de cemento asfáltico en las carreteras de las regiones de Cuzco y Puno.</p>	<p>Parámetro de diseño geométrica</p>

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 1: Operacionalización de variables

Variable dependiente	Descripción conceptual	Descripción operacional	Dimensiones	indicadores	índices	Instrumentos	Herramienta
Mapa de zonificación por Grado de Desempeño (PG)	Es un mapa basado en el clima con los grados de ligantes a ser usados por el diseñador.	El mapa de zonificación se realizará en base a la clasificación por	Zonificación de los grados de desempeño (PG)	Climatología	Temperatura	MERRA-2 (NASA)	Software ArcGIS
		Grado de Desempeño (PG) que se le dé a cada estación meteorológica, distribuyendo de acuerdo a su área de influencia.		Parámetro de diseño de pavimento flexible	Trafico	Expediente técnico	
				Parámetro de diseño geométrico	Velocidad	Expediente técnico	
Variable independiente	Descripción conceptual	Descripción operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Instrumentos	Herramienta
Clasificación SUPERPAVE para cementos asfálticos	La especificación por Grado de Desempeño (PG) clasifica el asfalto clasifica el asfalto en una serie de grados que designan el rango de temperaturas máxima y mínima de buen desempeño del asfalto para resistir los modos de falla típicos de un pavimento.	Los Grados de Desempeño (PG) son obtenidos en base a modelos matemáticos, los cuales están en base a diferentes parámetros.	Modelos matemáticos para la predicción de los Grados de Desempeño (PG)	SHRP	Temperatura	Hojas de cálculo	SHRP-A-648
				LTPP	Temperatura	Hojas de cálculo	LTPP Seasonal Asphalt Concrete

Fuente: Elaboración Propia

Anexo 3. Data climatológica del software MERRA-02.

Los datos climatológicos se encuentran en la siguiente dirección, los cuales confirman los datos obtenidos para la realización de esta investigación.

<https://drive.google.com/drive/folders/1tZ6CeZ6qkdyNSARbWZ1HijHzEazhd8Oj?usp=sharing>