



**Determinación de espectros térmicos y condiciones de humedad en mezclas asfálticas abiertas y cerradas, mediante sensores y control operativo con software de asistencia remota.**

Silva Córdova, Jaime Andrés y Sosa Cunalata, Evelyn Alexandra

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Morales Muñoz, Byron Omar

15 de marzo del 2021



## Urkund Analysis Result

Analysed Document: SILVA\_SOSA\_TESIS.docx (D98432965)  
Submitted: 3/15/2021 6:36:00 PM  
Submitted By: easosa1@espe.edu.ec  
Significance: 7 %

### Sources included in the report:

Mezclas drenantes Carvajal Chicaiza.pdf (D21060574)  
Articulo Carvajal-Chicaiza.pdf (D21237702)  
20171020 TITULACION\_LOPEZ-PEREZ\_-PUMA-VASQUEZ.pdf (D31591405)  
final de los finales.docx (D43749755)  
TESIS.docx (D47662660)  
TESIS ARMIJOS.docx (D40565375)  
Evaluación pavimento anillo ESPE\_URKUND.docx (D54371035)  
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15050/1/T-ESPE-040414.pdf>

### Instances where selected sources appear:

43

BYRON OMAR  
MORALES MUÑOZ

Firmado digitalmente por BYRON  
OMAR MORALES MUÑOZ  
Fecha: 2021.03.16 16:49:34 -05'00'



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Determinación de espectros térmicos y condiciones de humedad en mezclas asfálticas abiertas y cerradas, mediante sensores y control operativo con software de asistencia remota” fue realizado por el señor Silva Córdova, Jaime Andrés y la señorita Sosa Cunalata, Evelyn Alexandra el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de marzo de 2021

Firma:

BYRON OMAR  
MORALES MUÑOZ

Firmado digitalmente por BYRON  
OMAR MORALES MUÑOZ  
Fecha: 2021.03.15 11:33:13 -05'00'

Ing. Byron Omar Morales Muñoz, MSc.

C. C.: 1712565900



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, Silva Córdova, Jaime Andrés con cédula de ciudadanía n° 1600605313 y Sosa Cunalata, Evelyn Alexandra, con cédula de ciudadanía n° 1723227748, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Determinación de espectros térmicos y condiciones de humedad en mezclas asfálticas abiertas y cerradas, mediante sensores y control operativo con software de asistencia remota”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 16 de marzo 2021

---

Silva Córdova, Jaime Andrés

C.C.: 1600605313

---

Sosa Cunalata, Evelyn Alexandra

C.C.: 1723227748



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, Silva Córdova, Jaime Andrés con cédula de ciudadanía n° 1600605313 y Sosa Cunalata, Evelyn Alexandra, con cédula de ciudadanía n° 1723227748, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “Determinación de espectros térmicos y condiciones de humedad en mezclas asfálticas abiertas y cerradas, mediante sensores y control operativo con software de asistencia remota” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 16 de marzo 2021

---

Silva Córdova, Jaime Andrés

C.C.: 1600605313

---

Sosa Cunalata, Evelyn Alexandra

C.C.: 1723227748

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mis padres y a mis abuelitos quienes fueron el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional, quienes sentaron en mi la base de responsabilidad y deseos de superación porque siempre he contado con su mejor apoyo desde el día que nací; sin ellos no hubiera llegado a cumplir mi meta de completar mi carrera profesional. A mis hermanos y a mis amigos quienes estuvieron presentes en todo momento acompañándome en cada paso que di para convertirme en la persona que soy ahora.

Jaime Silva

Dedico este trabajo a mis padres quienes se han esforzado y me han guiado con sus consejos en todo el transcurso de mi vida, especialmente a mi madre María Gloria Cunalata quien es la persona que me ha demostrado ser la más fuerte, la persona que siempre ha luchado por mí día a día y a quien debo todas mis ganas de superarme. A mis hermanos quienes me han acompañado y me han apoyado en todo momento.

Evelyn Sosa

### **Agradecimiento**

Primeramente, agradezco a Dios por darme la salud para poder terminar mi carrera universitaria, a mis padres y mis abuelitos que me ayudaron a culminar esta etapa de mi vida que sin su ayuda no hubiera podido terminarla, a mi tutor de tesis Ing. Byron Morales quien nos guio a mi compañera y a mí con sus conocimientos en el desarrollo y culminación de nuestro proyecto de investigación, a mi compañera de tesis Evelyn Sosa quien no permitió que desmayara en este último escalón, a mis hermanos quienes siempre estuvieron apoyándome y a mis amigos quienes fueron parte de mi familia que me acompañaron en mi carrera universitaria en la ciudad de Quito y por último a mis compañeros de trabajo quienes estuvieron presionándome todos los días para terminar la tesis. Cada uno de ustedes apoyaron con su grano de arena para poder convertirme en el profesional para el cual me estuve preparando todo este tiempo de estudios.

Jaime Silva

Agradezco a Dios por darme la fuerza para seguir adelante, a mi familia quienes me apoyaron durante toda mi vida universitaria. A mi director de Proyecto el Ing. Byron Morales quien nos ha guiado en el desarrollo de la investigación con su conocimiento. A mi compañero de tesis Jaime por el esfuerzo invertido y su amistad durante la carrera y en el desarrollo de nuestro trabajo. Finalmente, a mis amigos y en especial a Agustín quien con su apoyo incondicional y sus palabras de aliento me ha ayudado a seguir con la lucha de alcanzar mis metas.

Evelyn Sosa

## Índice

Resumen .....	21
Abstract.....	22
Generalidades .....	23
Planteamiento del Problema .....	23
Macro.....	23
Meso .....	24
Micro.....	25
Antecedentes .....	26
Justificación e importancia .....	27
Objetivos .....	28
Objetivo General.....	28
Objetivos Específicos .....	29
Bases Teóricas.....	30
Generalidades del desempeño de los pavimentos.....	30
Función del Pavimento .....	30
Pavimento.....	30
Sub base.....	30
Capa o superficie de rodadura.....	31
Tipos de Pavimentos .....	31
Pavimentos Flexibles.....	31
Pavimentos Rígidos.....	32
Pavimentos Semi rígidos.....	32
Pavimentos Articulados. ....	33
Tipos de fallas en pavimentos flexibles .....	33
Fisuras .....	34
Fisuras longitudinales y transversales. ....	34
Fisura por reflexión de juntas. ....	35
Fisuras en medialuna. ....	36
Fisuras de borde.....	36
Fisuras en bloque.....	37
Fisuras tipo piel de cocodrilo .....	38

Deformaciones.....	38
Ondulación.....	38
Abultamiento.....	39
Hundimiento.....	40
Ahuellamiento.....	40
Pérdida de capas estructurales.....	41
Descascaramiento.....	41
Baches.....	42
Parche.....	42
Deterioro superficial.....	43
Desgaste superficial.....	43
Pérdida de agregado.....	44
Pulimento del agregado.....	44
Exudación.....	45
Otros daños.....	46
Corrimiento vertical de la berma.....	46
Afloramiento de finos.....	46
Afloramiento de agua.....	46
Factores Climáticos que afectan a los pavimentos.....	47
Radiación Solar.....	47
Efectos en la atmósfera.....	47
Efectos por la Latitud.....	48
Afectaciones en el pavimento.....	48
Temperatura.....	48
Variación de temperatura diaria.....	49
Variación de la temperatura con la altura.....	49
Gradiente térmico.....	50
Medición de la temperatura del aire.....	50
Afectaciones en el pavimento.....	50
Humedad.....	52
Afectaciones en el pavimento.....	52
Mezclas Asfálticas.....	54
Definición de Mezcla Asfáltica.....	54

Clasificación de las Mezclas Asfálticas .....	54
Mezclas abiertas o drenantes .....	55
Componentes de las mezclas asfálticas .....	56
Agregados .....	56
Propiedades del agregado. ....	57
Clasificación de Agregados.....	57
Cemento asfáltico. ....	59
Propiedades Químicas. ....	59
Propiedades Físicas. ....	60
Clasificación. ....	60
Grado de Penetración. ....	60
Grado de viscosidad. ....	61
Grado de desempeño. ....	63
Cementos asfálticos modificados. ....	66
Reología de los Materiales Asfálticos. ....	67
Propiedades Reológicas del Asfalto .....	67
Teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales. ....	67
Plasticidad. ....	67
Viscosidad. ....	67
Hidráulica. ....	68
Consideraciones para la selección y proyecto de una mezcla asfáltica.....	68
Diseño de mezcla asfáltica en caliente .....	69
Fórmula maestra de obra. ....	72
Método Marshall para diseño de pavimentos.....	72
Método Cántabro.....	73
Metodología SUPERPAVE.....	74
Selección por grado de desempeño.....	75
Especificaciones SUPERPAVE para la clasificación de ligantes asfálticos .....	75
Sistema electrónico de obtención de datos .....	76
Redes de sensores.....	76
Sensor de temperatura .....	76
Sensor DS18B20. ....	76
Sensor de Humedad.....	77

Sensor SHT10. ....	77
Sensor Capacitivo de Humedad de Suelo v1.2.....	78
Metodología.....	79
Diseño de mezcla asfáltica en caliente .....	80
Obtención del material pétreo .....	82
Especificaciones técnicas para agregados en mezclas abiertas y cerradas .....	83
Caracterización de los Agregados .....	83
Granulometría según Norma ASTM C 136.....	84
Equivalente de arena según ASTM D 2419.....	87
Abrasión (Desgaste en máquina de los Ángeles) según INEN 860 .....	90
Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso según INEN 857.....	93
Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino según INEN 856. ....	97
Determinación del contenido de terrenos de arcilla y partículas desmenuzables según INEN 698. ....	100
Caracterización del Asfalto .....	103
Penetración según INEN 917. ....	104
Punto de reblandecimiento según INEN 920.....	107
Índice de penetración según INV E 724. ....	109
Ductilidad según INEN 916.....	110
Punto de inflamación según ASTM D 92.....	112
Preparación de las probetas .....	116
Ensayo en briquetas.....	117
Densidad de Bulk para mezclas asfálticas abiertas según la norma INV E 736. ....	118
Gravedad específica máxima teórica según ASTM D 2041.....	119
Cálculo de vacíos.....	122
Prueba de Permeabilidad.....	123
Ensayo del Cántabro Seco.....	124
Ensayo del cántabro húmedo. ....	125
Ensayo Marshall.....	126
Densidad de Bulk para mezclas asfálticas cerradas según la norma ASTM D 2726. ....	128
Fórmula de trabajo .....	130
Sistema de Adquisición de Datos.....	131
Sistema de monitoreo.....	131

Ubicación de sensores .....	132
Instalación y Funcionamiento .....	134
Procesamiento de datos obtenidos de los sensores.....	142
Temperaturas en las mezclas de asfálticas.....	145
Oscilación térmica.....	152
Variación de temperatura ( $\Delta T$ ). .....	152
Gradiente Térmico. ....	153
Condiciones de Humedad.....	153
Espectros térmicos.....	156
Ecuación de Correlación.....	158
Aplicación de la metodología SUPERPAVE.....	161
Selección del Ligante Asfáltico Basado en el Grado de Desempeño (PG) .....	161
Grado de desempeño (PG).....	161
Efectos de la velocidad de carga en la selección del ligante.....	162
Temperatura del aire .....	164
Base de datos climáticos.....	165
Metodología para la elaboración de mapas de desempeño con ArcGIS.....	168
Zonificación del Ecuador.....	170
Confiabilidad. ....	173
Temperatura Máxima del aire. ....	176
Temperatura mínima y Temperatura promedio del aire.....	180
Modelos de Predicción de La Temperatura del Pavimento.....	186
Modelo desarrollado por SRHP.....	187
Desviación estándar de la temperatura máxima ( $^{\circ}C$ ). ....	188
Modelo desarrollado por FHWA (LTPP).....	188
Temperaturas del pavimento obtenidas a partir de los modelos SHRP y LTPP.....	191
Temperatura máxima del pavimento (SHRP y LTPP). ....	191
Temperatura mínima del pavimento (SHRP y LTPP).....	198
Grado de desempeño PG.....	206
Zonificación del grado de desempeño del país.....	207
Zonificación de acuerdo al grado de asfalto .....	211
Resultados y Discusión.....	212
Caracterización de los materiales .....	212

Resultados de ensayos Agregados.....	212
Resultados de ensayos de Asfalto.....	214
Temperaturas máximas y mínimas registradas por los sensores .....	215
Gradiente térmico de las mezclas asfálticas .....	216
Porcentaje de humedad.....	216
Ecuaciones de correlación .....	217
Espectros térmicos y radiación .....	218
Grados de desempeño PG para cada provincia del Ecuador .....	221
Grados de asfalto del Ecuador de acuerdo al tipo de clima .....	223
Comparación de los datos obtenidos en los sensores con los de la estación meteorológica de la Tola.....	225
Conclusiones y Recomendaciones .....	228
Bibliografía .....	234

## Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de las mezclas asfálticas .....	55
Tabla 2 Clasificación de Agregados.....	58
Tabla 3 Especificaciones para cementos asfálticos según su grado de penetración.....	61
Tabla 4 Especificaciones para cementos asfálticos según por su viscosidad a 60 °C .....	62
Tabla 5 Rangos para el grado de desempeño .....	63
Tabla 6 Especificaciones para cementos asfálticos según su grado de desempeño .....	64
Tabla 7 Nivel de Tráfico.....	73
Tabla 8 Requisitos MOP para mezclas asfálticas .....	74
Tabla 9 Materiales utilizados en la elaboración de las mezclas .....	82
Tabla 10 Especificaciones para agregados pétreos .....	83
Tabla 11 Materiales y Equipos para el desarrollo del ensayo de Granulometría .....	84
Tabla 12 Cantidad de la muestra requerida para el ensayo .....	85
Tabla 13 Resultados del ensayo de granulometría del agregado utilizado en la mezcla asfáltica abierta .....	86
Tabla 14 Resultados del ensayo de granulometría del agregado utilizado en la mezcla asfáltica cerrada .....	86
Tabla 15 Materiales y Equipos para el desarrollo del ensayo de Equivalente de arena .....	87
Tabla 16 Resultados del ensayo de equivalente de arena para la mezcla asfáltica abierta .....	89
Tabla 17 Resultados del ensayo de equivalente de arena para la mezcla asfáltica cerrada .....	90
Tabla 18 Materiales y Equipos para el desarrollo del ensayo de Desgaste en máquina de los Ángeles.....	90
Tabla 19 Gradación de las muestras de ensayo, para la resistencia a la abrasión .....	91
Tabla 20 Número de esferas para carga de abrasión .....	92
Tabla 21 Resultados del ensayo de abrasión de agregados para la mezcla asfáltica abierta.....	93
Tabla 22 Resultados del ensayo de abrasión de agregados para la mezcla asfáltica cerrada.....	93
Tabla 23 Materiales y equipos para el desarrollo del ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso .....	94
Tabla 24 Cantidad de muestra mínima para el ensayo.....	94
Tabla 25 Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de agregados para la mezcla asfáltica abierta.....	96

Tabla 26 Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de agregados para la mezcla asfáltica cerrada.....	97
Tabla 27 Materiales y equipos para el desarrollo del ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino .....	97
Tabla 28 Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de agregados para la mezcla asfáltica abierta.....	99
Tabla 29 Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de agregados para la mezcla asfáltica cerrada.....	100
Tabla 30 Materiales y equipos para el ensayo de determinación del contenido de terrenos de arcilla y partículas desmenuzables .....	100
Tabla 31 Cantidad de muestra para el ensayo.....	101
Tabla 32 Ensayo de contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables en agregados para la mezcla asfáltica abierta.....	102
Tabla 33 Equipos y materiales para el ensayo de penetración .....	105
Tabla 34 Resultados del ensayo de penetración del asfalto.....	106
Tabla 35 Equipos y materiales para el ensayo de punto de ablandamiento .....	107
Tabla 36 Resultados del ensayo del punto de reblandecimiento.....	108
Tabla 37 Interpretación del Ip de acuerdo a los valores límites.....	109
Tabla 38 Cálculo del índice de penetración .....	110
Tabla 39 Equipos y materiales para el ensayo de ductilidad .....	110
Tabla 40 Resultados del ensayo de ductilidad del asfalto .....	112
Tabla 41 Equipos y materiales para el ensayo de punto de inflamación.....	112
Tabla 42 Resultados del ensayo del punto de inflamación del asfalto.....	113
Tabla 43 Equipos y materiales para el ensayo de gravedad específica .....	114
Tabla 44 Resultado del ensayo de gravedad específica de asfalto.....	116
Tabla 45 Cálculo de la Gravedad Específica Bulk .....	119
Tabla 46 Equipos y materiales para el ensayo de gravedad específica máxima teórica .....	120
Tabla 47 Ensayo de gravedad específica máxima teórica de la muestra asfáltica abierta .....	121
Tabla 48 Ensayo de gravedad específica máxima teórica de la muestra asfáltica cerrada .....	121
Tabla 49 Cálculo del porcentaje de vacíos de la muestra asfáltica abierta .....	122
Tabla 50 Materiales y equipos para la prueba de permeabilidad .....	123
Tabla 51 Prueba de permeabilidad en las muestras asfálticas abiertas.....	123

Tabla 52 Equipos y materiales para el ensayo de Cántabro Seco.....	124
Tabla 53 Resultados del Ensayo de Cántabro seco.....	125
Tabla 54 Resultados del Ensayo de Cántabro Húmedo .....	126
Tabla 55 Material y equipo requerido para el ensayo Marshall.....	127
Tabla 56 Ensayo Marshall en mezclas asfálticas abiertas .....	128
Tabla 57 Ensayo Marshall en mezclas asfálticas cerradas .....	128
Tabla 58 Material y equipo requerido para el ensayo de densidad de bulk .....	128
Tabla 59 Resultados de la Gravedad Específica de Bulk mezcla cerrada.....	129
Tabla 60 Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica Abierta .....	130
Tabla 61 Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica Cerrada .....	130
Tabla 62 Coordenadas de ubicación de los sensores .....	132
Tabla 63 Coordenadas de la Estación LA TOLA M0002.....	133
Tabla 64 Coordenadas de la Estación TUMBACO M5040.....	133
Tabla 65 Asignación y numeración de sensores .....	137
Tabla 66 Asignación y numeración de mezclas asfálticas.....	137
Tabla 67 Distribución de sensores en mezclas asfálticas.....	139
Tabla 68 Procedimiento de análisis de datos para la obtención de temperaturas .....	145
Tabla 69 Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de septiembre de 2020 .....	146
Tabla 70 Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de octubre de 2020 .....	147
Tabla 71 Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de noviembre de 2020 .....	148
Tabla 72 Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de diciembre de 2020.....	149
Tabla 73 Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de enero de 2021 .....	150
Tabla 74 Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de febrero de 2021.....	151
Tabla 75 Oscilación Térmica .....	152
Tabla 76 Variación de temperatura en las mezclas asfálticas .....	153
Tabla 77 Porcentajes de Humedad de las mezclas asfálticas .....	154
Tabla 78 Valores de Radiación del mes de septiembre .....	159
Tabla 79 Procesamiento de datos para la elaboración de la ecuación de correlación.....	159
Tabla 80 Valores para la obtención del coeficiente de correlación lineal .....	160
Tabla 81 Rangos para el grado PG según la especificación SUPERPAVE .....	162
Tabla 82 Tabla para definir el aumento del PG para la temperatura máxima del pavimento ....	163
Tabla 83 Estaciones meteorológicas de Ecuador utilizadas.....	166

Tabla 84 Estaciones proyectadas en la Zona 17S.....	171
Tabla 85 Valores de desviación estándar según el porcentaje de confiabilidad .....	175
Tabla 86 Valores de Temperatura máxima a diferentes porcentajes de confiabilidad .....	177
Tabla 87 Valores de Temperatura máxima a diferentes porcentajes de confiabilidad .....	181
Tabla 88 Valores de Temperatura promedio a diferentes porcentajes de confiabilidad .....	184
Tabla 89 Variables más significativas del modelo LTPP .....	189
Tabla 90 Estaciones Meteorológicas.....	192
Tabla 91 Temperaturas máximas del pavimento modelos SHRP y LTPP .....	193
Tabla 92 Temperaturas mínimas modelos SHRP y LTPP .....	198
Tabla 93 Valores de Grado PG Máximos para las diferentes Estaciones Meteorológicas .....	207
Tabla 94 Valores de Grado PG Mínimos para las diferentes Estaciones Meteorológicas .....	209
Tabla 95 Grados de asfalto de acuerdo al tipo de clima.....	211
Tabla 96 Caracterización de los agregados utilizados en la mezcla asfáltica abierta .....	212
Tabla 97 Caracterización de los agregados utilizados en la mezcla asfáltica cerrada .....	213
Tabla 98 Caracterización del asfalto utilizado en las mezclas asfálticas.....	214
Tabla 99 Verificación de cumplimiento de las propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas abiertas .....	215
Tabla 100 Verificación de cumplimiento de las propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas cerradas .....	215
Tabla 101 Resumen de temperaturas de las mezclas asfálticas.....	216
Tabla 102 Gradiente Térmico de las mezclas asfálticas.....	216
Tabla 103 Porcentajes de humedad de las mezclas asfálticas.....	217
Tabla 104 Ecuaciones de correlación lineal con su respectivo coeficiente de correlación lineal	217
Tabla 105 Ecuaciones de correlación.....	218
Tabla 106 Radiación emitida por las muestras .....	219
Tabla 107 Valores PG recomendados para cada provincia del Ecuador.....	221
Tabla 108 Grados de Asfalto de acuerdo al tipo de clima .....	223
Tabla 109 Temperaturas del aire de la Estación Meteorológica de La Tola .....	225
Tabla 110 Temperaturas del aire de la Estación Meteorológica de La Tola .....	226

## Índice de Figuras

Figura 1 Estructura del pavimento flexible .....	31
Figura 2 Estructura del pavimento rígido .....	32
Figura 3 Fisura Longitudinal de un pavimento flexible .....	34
Figura 4 Fisura Transversal de un pavimento flexible .....	35
Figura 5 Fisura por reflexión de juntas .....	35
Figura 6 Fisuras en medialuna .....	36
Figura 7 Fisuras de borde.....	37
Figura 8 Fisuras de bloque .....	37
Figura 9 Fisuras tipo piel de cocodrilo .....	38
Figura 10 Deformación tipo ondulación .....	39
Figura 11 Abultamiento .....	39
Figura 12 Hundimiento en el pavimento .....	40
Figura 13 Ahuellamiento en el pavimento.....	41
Figura 14 Descaramiento del pavimento.....	41
Figura 15 Baches en el pavimento .....	42
Figura 16 Parche .....	43
Figura 17 Desgaste superficial del pavimento .....	43
Figura 18 Pérdida de agregado .....	44
Figura 19 Pulimiento del agregado .....	45
Figura 20 Exudación en el pavimento .....	45
Figura 21 Corrimiento vertical de la berma .....	46
Figura 22 Afloramiento del agua.....	47
Figura 23 Curvas Típicas de radiación y temperatura ambiente .....	49
Figura 24 Movimientos de agua en los pavimentos. ....	53
Figura 25 Nomenclatura para el Grado de Desempeño .....	63
Figura 26 Principio para el proceso de diseño mezclas asfálticas .....	70
Figura 27 Procedimiento para el diseño de mezclas asfálticas.....	71
Figura 28 Sensor de temperatura DS18B20.....	77
Figura 29 Sensor de temperatura y humedad SHT10.....	78
Figura 30 Sensor Capacitivo de Humedad de Suelo v1.2.....	78
Figura 31 Ensayos para el diseño de una mezcla asfáltica.....	81

Figura 32 Ensayos requeridos para el asfalto .....	103
Figura 33 Esquema del sistema de monitorización .....	131
Figura 34 Ubicación de los sensores en la zona de Estudio.....	132
Figura 35 Limpieza de la zona de estudio .....	134
Figura 36 Excavación de la zona .....	134
Figura 37 Material reciclado de asfalto en la zona .....	135
Figura 38 Estratos del suelo .....	135
Figura 39 Instalación del cableado.....	136
Figura 40 Colocación de los sensores .....	136
Figura 41 Numeración de sensores de temperatura y humedad .....	138
Figura 42 Colocación de sensores de temperatura en la mezcla asfáltica .....	138
Figura 43 Colocación de sensores de humedad y temperatura en la mezcla asfáltica .....	139
Figura 44 Sistema de control de datos .....	140
Figura 45 Datos almacenados en el archivo de Excel .....	140
Figura 46 Activación del puerto para obtención de datos.....	141
Figura 47 ID de acceso a control remoto del computador que toma los datos de los sensores.	141
Figura 48 Esquema 1 de colocación de sensores en la briqueta de mezcla asfáltica cerrada.....	142
Figura 49 Esquema 2 de colocación de sensores en la briqueta de mezcla asfáltica abierta .....	143
Figura 50 Esquema 3 de colocación de sensores en la briqueta de mezcla asfáltica cerrada.....	143
Figura 51 Esquema 4 de colocación de sensores en la briqueta de mezcla asfáltica abierta .....	144
Figura 52 Humedad máxima mezcla asfáltica cerrada mes de septiembre del 2020 .....	154
Figura 53 Humedad mínima mezcla asfáltica cerrada mes de septiembre del 2020 .....	155
Figura 54 Humedad máxima mezcla asfáltica abierta mes de septiembre del 2020 .....	155
Figura 55 Humedad mínima mezcla asfáltica abierta mes de septiembre del 2020.....	156
Figura 56 Espectros térmicos de la mezcla asfáltica cerrada mes de septiembre del 2020.....	157
Figura 57 Espectros térmicos de la mezcla asfáltica abierta mes de septiembre del 2020 .....	157
Figura 58 Ejemplo de una representación geográfica (SIG).....	168
Figura 59 Ejemplo de operación empleando superposición ráster .....	169
Figura 60 Zonas UTM del Ecuador .....	170
Figura 61 Mapa de Ubicación de las Estaciones Meteorológicas .....	173
Figura 62 Curva de distribución de frecuencias de datos de temperatura .....	174
Figura 63 Mapa de Temperaturas Viales Máximas al 50% de confiabilidad .....	179
Figura 64 Mapa de Temperaturas Viales Máximas al 85% de confiabilidad .....	179

Figura 65 Mapa de Temperaturas Viales Mínimas al 50% de confiabilidad .....	183
Figura 66 Mapa de Temperaturas Viales Mínimas al 85% de confiabilidad .....	183
Figura 67 Mapa de Temperaturas Viales Promedio al 50% de confiabilidad .....	185
Figura 68 Mapa de temperaturas máximas del pavimento, modelo SHRP al 50% de confiabilidad .....	195
Figura 69 Mapa de temperaturas máximas del pavimento, modelo LTPP al 50% de confiabilidad .....	195
Figura 70 Mapa de temperaturas máximas del pavimento, modelo SHRP al 85% de confiabilidad .....	196
Figura 71 Mapa de temperaturas máximas del pavimento, modelo LTPP al 85% de confiabilidad .....	197
Figura 72 Mapa de temperaturas mínimas del pavimento, modelo SHRP al 50% de confiabilidad .....	200
Figura 73 Mapa de temperaturas mínimas del pavimento, modelo LTPP al 50% de confiabilidad .....	201
Figura 74 Mapa de temperaturas mínimas del pavimento, modelo SHRP al 85% de confiabilidad .....	202
Figura 75 Mapa de temperaturas mínimas del pavimento, modelo LTPP al 85% de confiabilidad .....	203
Figura 76 Tendencia de temperaturas máxima a una confiabilidad del 50%.....	204
Figura 77 Tendencia de temperaturas máxima a una confiabilidad del 85%.....	204
Figura 78 Tendencia de temperaturas mínima a una confiabilidad del 50% .....	205
Figura 79 Tendencia de temperaturas mínima a una confiabilidad del 85% .....	205
Figura 80 Parámetros de Grado de Desempeño .....	206
Figura 81 Espectros de radiación de briqueta de mezcla asfáltica cerrada.....	219
Figura 82 Espectros de radiación de briqueta de mezcla asfáltica abierta .....	220
Figura 83 Zonificación del grado de desempeño (PG) .....	222
Figura 84 Propuesta de zonificación de los grados de asfalto en el Ecuador .....	224
Figura 85 Tendencia entre las temperaturas máximas medidas con sensores y calculadas.....	226
Figura 86 Tendencia entre las temperaturas mínimas medidas con sensores y calculadas .....	227

## Resumen

El deterioro de los pavimentos a temprana edad afecta el rendimiento y por lo tanto el nivel de serviciabilidad de una red vial, esto se debe a diversos factores, uno de los más importantes son las condiciones ambientales como la temperatura y humedad a los que están expuestos estos elementos. Por lo que esta esta investigación tiene como finalidad determinar los espectros térmicos y condiciones de humedad en las mezclas asfálticas abiertas y cerradas, con la ayuda de un sistema de adquisición de datos que está conformado por una red de seis sensores, de los cuales cuatro miden temperatura y los dos restantes miden temperatura y humedad simultáneamente. Estos espectros determinan la tendencia del comportamiento térmico en los dos tipos de mezclas en un intervalo de tiempo de 24 horas, siendo estos datos monitoreados mediante un sistema de asistencia remota. Con la información recopilada por el sistema se podrá realizar un análisis del comportamiento en cada tipo de mezcla asfáltica con el fin de establecer consideraciones técnicas para el control de temperaturas y de humedad en planta, transporte, conformación y durante el funcionamiento del pavimento in situ de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona y a las propiedades reológicas del pavimento que son afectadas por estos dos parámetros.

Palabras clave:

- **SENSOR**
- **HUMEDAD**
- **TEMPERATURA**
- **ESPECTROS TÉRMICOS**
- **DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO**

### **Abstract**

The deterioration of pavements at an early age affects the performance and therefore the level of serviceability of a road network, this is due to several factors, one of the most important are the environmental conditions such as temperature and humidity to which these elements are exposed. Therefore, the purpose of this research is to determine the thermal spectra and humidity conditions in open and closed asphalt mixes, with the help of a data acquisition system that consists of a network of six sensors, four of which measure temperature and the other two measure temperature and humidity simultaneously. These spectra determine the trend of thermal behavior in the two types of mixtures over a 24-hour time interval, and these data are monitored by a remote assistance system. With the information collected by the system, an analysis of the behavior of each type of asphalt mix can be made in order to establish technical considerations for temperature and moisture control in factory, transport, shaping and during in situ pavement operation according to the climatic conditions of the area and the rheological properties of the pavement that are affected by these two parameters.

Key words:

- **SENSOR**
- **HUMIDITY**
- **TEMPERATURE**
- **THERMAL SPECTRA**
- **PAVEMENT PERFORMANCE**

## Generalidades

### Planteamiento del Problema

#### *Macro*

Se conoce que en varias partes del mundo, las mezclas asfálticas en caliente son las más utilizadas en obras de construcción de carreteras, esto se debe a las características que estas poseen, como flexibilidad, estabilidad, trabajabilidad, resistencia a la fatiga, uniformidad, duración y su relativamente baja inversión requeridas, haciendo que se generen nuevas investigaciones para el desarrollo y mejora de las propiedades mecánicas de este tipo de mezclas (Reyes Ortiz et al., 2006, p. 126).

Los factores que más influyen en gran parte en el deterioro de cualquier obra civil es la temperatura y la humedad, sobre todo en aquellas obras que se encuentran en constante uso, absorbiendo las cargas que se generan en los elementos y los efectos climatológicos como son las vías de asfalto. Por lo que varias investigaciones concuerdan con que estos son los factores que inciden en el comportamiento de los pavimentos, afectando su funcionalidad y la vida útil. Las mezclas asfálticas deben deformarse sin que se dé ninguna patología al momento de recibir esfuerzos por las cargas, por lo tanto, al evaluar el desempeño de las mezclas asfálticas, se debe considerar la cohesión y fricción necesarias para estudiar la resistencia al corte y esta manera garantizar la adherencia eficiente de los materiales que conforman las mezclas (Reyes Ortiz & Millán Montejo, 2009).

Los efectos climatológicos son uno de varios factores que influyen en el correcto funcionamiento de una vía, por lo que las carreteras se deben adecuar para poder resistir estas condiciones, pero según el Banco de Desarrollo de América Latina (2019), la mayoría de los países latinoamericanos enfrentan severos retos institucionales, financieros, técnicos, políticos y

sociales que impiden la adaptación de sus vías al cambio climático, situación que pone en riesgo la sostenibilidad de las vías de la zona y la seguridad del usuario. Por lo tanto, para garantizar que se brinde un mayor nivel de servicio en la carretera, algunos países han realizado varios tipos de investigación, enfocándose en la innovación de materiales que puede extender su vida útil y por ende extender la vida útil del proyecto. Este método da prioridad a la nueva infraestructura vial y, en menor medida, prioriza la infraestructura vial existente.

### ***Meso***

Ecuador está situado en el noroeste de América del Sur, limitando con Colombia al norte, Perú al sur y este, finalmente con el Océano Pacífico al oeste. Tiene una extensión territorial de aproximadamente 256,370 km<sup>2</sup> conformado por 4 regiones de 24 provincias en total. De acuerdo a su ubicación geográfica. Ecuador posee un clima tropical, lo que comprueba la presencia de las estaciones climáticas lluviosa y seca. Es un país que se caracteriza por las precipitaciones constantes en distintos lugares, durante todo el año de forma desigual y la temperatura media anual va desde los 22°C a 26°C (Yates et al., 2013).

Según CEPAL (2010), el incremento de la temperatura media en el País varía de 0.5°C a 1.6°C en los últimos años, con una tendencia decreciente de lluvias dentro de la región costa lo que nos indica que el cambio del climático es cada vez más evidente.

Estos cambios significativos de temperatura y de humedad se dan dentro de la misma región o de una misma ciudad debido a que el clima de cada una de las provincias del Ecuador está en constante variación y esto provoca que los materiales que componen la estructura del pavimento tengan graves afectaciones.

En Ecuador existen 10285.53 km de red vial estatal de la cual el 66.89%, es decir, 6880.50 km de red se encuentran en buenas condiciones y su gran mayoría está conformada por

mezcla asfáltica (Ministerio de Transporte y Obras Públicas República del Ecuador [MTOPE], 2020), que lastimosamente disminuyen su nivel de serviciabilidad y el tiempo de vida útil por los factores que afectan el pavimento, uno de estos factores es la variación de temperatura que provoca el deterioro de la mezcla bituminosa y otro factor es el flujo vehicular que va en un aumento constante en los últimos años, haciendo que el elemento estructural soporte una carga mucho mayor al cual fue diseñado. El deterioro de las redes viales causa incomodidad e inseguridad en los usuarios e incluso graves accidentes de tránsito, por lo que el gobierno se ve en la necesidad de realizar un mantenimiento correctivo antes del tiempo esperado generando gastos no programados al estado ecuatoriano.

### ***Micro***

El territorio del Distrito Metropolitano de Quito, está conformado por ocho administraciones zonales y que a su vez están conformadas por 65 parroquias (32 urbanas y 33 rurales) dentro de las cuales existe un porcentaje considerable de carreteras construidas de hormigón asfáltico (Yates et al., 2013). La Parroquia de Pifo se encuentra a 2574 m.s.m.n. con un clima cálido y templado, existen precipitaciones aproximadamente de 1026 mm durante todo el año y la temperatura media anual es de 15.3 °C. (CLIMATE DATA, 2020). Lo que indica que existe variación en las condiciones climáticas de este sector causando un deterioro de manera progresiva en las mezclas asfálticas de las carreteras ya implementadas. Por este motivo es indispensable plantear una alternativa de análisis y evaluación para solucionar los problemas futuros relacionados al desempeño de las vías frente al cambio climático de forma sencilla y con menores costos.

## Antecedentes

En el desarrollo de un estado o nación, conjuntamente con el aumento del crecimiento influye la creación de nuevas redes viales, debido a que son un medio de comunicación entre regiones, lo que permite un incremento en actividades relacionados a varios sectores productivos que dinamizan la economía de un país. Simultáneamente por medio de las redes viales se satisfacen las necesidades básicas de los ciudadanos tales como el trabajo, educación, alimentación y salud por lo que el mantenimiento y la rehabilitación de las carreteras son acciones de suma importancia para garantizar la funcionalidad y la prolongación de la vida útil de las vías (Rivera, 2015).

En Latinoamérica, varios de los países sufren de diversos deterioros en sus redes viales y no se encuentran preparadas para afrontar el cambio climático, esto se debe a la falta de planificación y al uso de las mismas prácticas habituales de ingeniería tanto en el diseño de estos elementos estructurales como en el proceso de construcción (Banco de Desarrollo de América Latina [CAF], 2019a). Otro aspecto que influye según la [CAF] (2019b), es la descoordinación que existe entre autoridades del mismo país, por lo general entre los encargados de los ministerios de obras públicas, transporte y medio ambiente lo que hace que la eficiencia económica de la inversión sea cuestionable.

En los últimos años en el Ecuador ha tenido un crecimiento significativo en lo que se refiere a infraestructura vial y la inversión que representa la construcción de una carretera es muy alta, por lo que cada vez es más necesario contar con estrategias de diseño y planificación para poder mantener las vías de comunicación en óptimas condiciones, pero los factores climáticos de la zona hacen que no cumpla con su periodo de vida útil para la cual fue diseñada

provocando que se requiera de una nueva inversión para restaurarlos antes de lo previsto (Gabela Berrones, 2013).

La capa de rodadura de una vía siempre está expuesta a cargas de tráfico y a condiciones meteorológicas de la región en la que está situada, estos factores en conjunto con el envejecimiento natural de los materiales que conforman el pavimento provocan un deterioro progresivo del elemento estructural. Este proceso disminuye el funcionamiento eficiente de la vía, el nivel de serviciabilidad y la satisfacción del usuario (Chicaiza Sambonino, 2012).

Según Yela Quijada (2017) la temperatura es un factor ambiental que interviene en el desempeño del pavimento por lo que mediante su investigación analiza los espectros térmicos que es el comportamiento de la temperatura en periodos de tiempo críticos y las patologías que se presentan, concluyendo que es el factor más importante que contribuye en el deterioro de pavimentos. Otro factor que influye en el daño de la carpeta asfáltica es la humedad debido a que a que provoca problemas de adherencia.

La influencia del gradiente térmico en el nivel de esfuerzos y deformaciones de las carpetas de rodadura permite establecer las consideraciones técnicas dentro del proceso de diseño y de ejecución, también considera importante la proporción utilizada en las mezclas bituminosas y las propiedades del asfalto de una forma indirecta (Goetendia Torres & Pérez Quispe, 2015).

### **Justificación e importancia**

Las redes viales son un medio importante para potenciar el desarrollo del sistema económico, social y cultural de un país, debido a la reducción de tiempo y costos de transporte que favorecen al incremento de la productividad. Por lo que el gobierno se debe enfocar en la

creación o mejoramiento de la infraestructura vial y de todos los servicios que se requieran para su eficiente funcionamiento.

La inversión que se requiere para la ejecución, construcción y/o rehabilitación de este tipo de proyectos es alta, por lo que es necesario realizar nuevas investigaciones que permitan adaptar las carreteras al cambio climático y de esta manera garantizar que los elementos estructurales cumplan con su vida útil.

En definitiva la adecuada conservación de la infraestructura vial es imprescindible, por lo que se considera importante realizar un análisis y monitoreo de los gradientes térmicos y las condiciones de humedad para la determinación del comportamiento del pavimento, además establecer consideraciones técnicas que se deben manejar tanto en la elaboración de la mezcla asfáltica como en su colocación in situ tomando en cuenta el clima de la zona de proyecto e intervalos de tiempo apropiados para el proceso, lo que permitirá garantizar que la temperatura se mantenga dentro de un rango aceptable, evitando el agrietamiento y otras patologías en el pavimento a temprana edad.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas abiertas y cerradas en función del cambio de temperatura y humedad mediante el uso de sensores acoplados a un sistema de control de recopilación de datos simultáneamente con un software de asistencia remota, para determinar el desempeño de la capa de rodadura de un pavimento flexible.

***Objetivos Específicos***

- Caracterizar los agregados y el bitumen a utilizarse en las mezclas asfálticas según las normativas técnicas.
- Elaborar las mezclas asfálticas abiertas y cerradas de acuerdo a especificaciones generales MOP-001-F 2002.
- Medir mediante sensores la variación de temperatura y de humedad en el pavimento considerando las condiciones climáticas y meteorológicas de la zona.
- Analizar la base de datos obtenidos de los espectros térmicos y de humedad en el transcurso del día mediante un software de asistencia remota.
- Determinar del gradiente térmico de las mezclas asfálticas abiertas y cerradas a partir del procesamiento de datos analizadas según las condiciones climáticas de la zona de estudio.
- Establecer consideraciones técnicas para el control de temperaturas y de humedad en planta, transporte y conformación del pavimento in situ según las condiciones de la zona.

## Bases Teóricas

### Generalidades del desempeño de los pavimentos

#### *Función del Pavimento*

**Pavimento.** El pavimento es la superficie artificial o estructura utilizada como revestimiento del suelo, compuesta por varias capas de materiales diferentes que actúa como elemento de soporte o circulación de vehículos y peatones, de manera que brinda calidad, comodidad y seguridad mejorando el estilo de vida a los mismos. Este elemento debe estar diseñada de tal manera que las cargas generadas por el tránsito no generen fallas en la estructura (Trujillo Cebrián, 2013).

**Subrasante.** Se denomina subrasante a la capa donde se apoya la estructura del pavimento y los espaldones, esta capa puede estar constituida por un material seleccionado para el mejoramiento de suelo o por el terreno natural en caso de cumplir con todas las especificaciones. Las propiedades físicas de la subrasante son indispensables para el diseño de un pavimento (AASHTO, 2006)

**Base.** Capa de un espesor establecido que es colocada sobre la subbase o directamente sobre la subrasante según sea el diseño o requerimiento, conformada por materiales que cumplen especificaciones necesarias para que desempeñe la función de soportar la carga de la capa de rodadura (MOP, 2002).

**Sub base.** Capa que se encuentra entre la subrasante y la base, de igual manera tiene un espesor establecido según el diseño y está conformado por material granular obtenido por trituración o cribado, generalmente esta capa posee una calidad menor a la de la base (MOP, 2002; AASHTO, 2006).

**Capa o superficie de rodadura.** Capa superior de la vía que es colocada sobre la capa base previamente preparada, compuesto de agregados gruesos y finos que cumplen con especificaciones determinadas y material asfáltico que se mezclan en caliente. Cumple la función de dar comodidad al tránsito y seguridad por sus características antideslizantes, resistentes a la abrasión e impermeables (MOP, 2002).

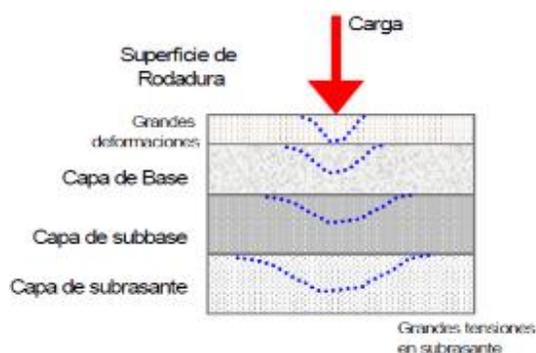
### ***Tipos de Pavimentos***

Los Pavimentos se dividen de la siguiente manera:

**Pavimentos Flexibles.** Los pavimentos flexibles tienen un revestimiento asfáltico sobre una capa base granular que permite la distribución de tensiones y pequeñas deformaciones verticales de compresión que normalmente son generadas por las cargas del tráfico (Zarate Aquino, 2005). El pavimento consta de una carpeta asfáltica, base granular y capa de sub base, el costo inicial de estos proyectos es relativamente baja teniendo una vida útil de 10 a 15 años con su respectivo mantenimiento regular (Medina Palacios & De la Cruz Puma, 2021).

### **Figura 1**

#### *Estructura del pavimento flexible*

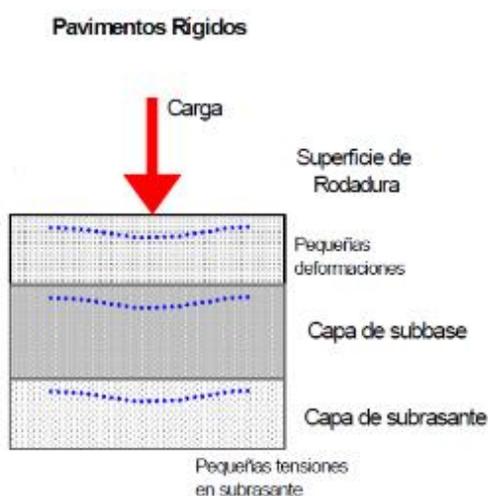


Fuente: (Secretaría de Integración Económica Centroamericana, 2002)

**Pavimentos Rígidos.** Los pavimentos rígidos son aquellos que se componen de losas de concreto hidráulico, este tipo de pavimentos por su elevada resistencia a la flexión distribuye las tensiones generadas en las capas subyacentes y alivia las deformaciones de tracción que se producen con las constantes repeticiones de carga (Universidad Mayor de San Simón, 2012). El pavimento rígido está compuesto por la losa de concreto hidráulico, la capa de sub base y estas se encuentran sobre la subrasante. Los costos iniciales para la aplicación de este tipo de proyectos de construcción son altos a comparación de pavimentos flexibles y su periodo de vida varía entre 20 y 40 años (Medina Palacios & De la Cruz Puma, 2021).

**Figura 2**

*Estructura del pavimento rígido*



Fuente: (Secretaría de Integración Económica Centroamericana, 2002)

**Pavimentos Semi rígidos.** Los pavimentos semi rígidos están conformados por la misma estructura que los pavimentos flexibles, la diferencia varía en que una de las capas se rigidiza de manera artificial con algún aditivo como cemento, cal, asfalto, químicos o

emulsiones que permiten que la capacidad portante del suelo se incremente (Medina Palacios & De la Cruz Puma, 2021).

**Pavimentos Articulados.** En los pavimentos articulados las capas de rodadura se encuentran conformadas por elementos prefabricados, estos tienen una misma dimensión por lo general pueden ser adoquines de cemento o de ladrillo y son colocados sobre una capa delgada de arena (Medina Palacios & De la Cruz Puma, 2021).

Por la forma de colocación y las características de las caras de los bloques estos permiten la transferencia de cargas desde el elemento hacia los demás elementos que se encuentren adyacentes. (Armijos Cuenca, 2011).

### ***Tipos de fallas en pavimentos flexibles***

Durante la operación funcional de un pavimento existen varios factores que provocan un impacto negativo en la capa de rodadura y llega a afectar el correcto desempeño de la estructura, a su vez causa inseguridad e incomodidad a los usuarios requiriendo de grandes inversiones para su reparación (Clemente Huarcaya, 2019).

Los siguientes tipos de fallas son lo que se pueden identificar en una estructura de pavimento flexible:

- Fisuras
- Deformaciones
- Pérdida de capas estructurales
- Deterioro superficial.
- Otros deterioros

## Fisuras

***Fisuras longitudinales y transversales.*** En la carpeta asfáltica se observan discontinuidades cuya dirección es igual o perpendicular a las del desplazamiento vehicular. Este tipo de daño se inicia generalmente desde el fondo de la carpeta de rodadura, zona que por la acción de cargas se genera mayores esfuerzos de tracción. La causa más común de este tipo de fisuras es por la fatiga de la estructura que se presentan en las huellas del tránsito y existen otras causas como el espesor insuficiente de las carpetas, deformaciones en la capa de la subrasante, compactación inadecuada de las capas, problemas de drenaje, entre otros (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006).

### Figura 3

*Fisura Longitudinal de un pavimento flexible*



Fuente: (Barajas Reina & Buitrago Martínez, 2017)

**Figura 4**

*Fisura Transversal de un pavimento flexible*



Fuente: (Barajas Reina & Buitrago Martínez, 2017)

***Fisura por reflexión de juntas.*** Este tipo de fisuras se evidencian únicamente en pavimentos mixtos que están conformados por una carpeta asfáltica construidos sobre losas de concreto rígido y se generan por el movimiento de la capa de concreto inducido por la variación de temperatura o humedad del sitio (Vásquez, 2002).

**Figura 5**

*Fisura por reflexión de juntas*



Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006)

***Fisuras en medialuna.*** Estas fisuras se presentan en forma parabólica y se generan por el frenado o por el giro de vehículos de carga pesada que provocan la deformación de la capa de rodadura, normalmente se da por la inadecuada adherencia entre las capas del pavimento (INVIAS, 2012).

### **Figura 6**

*Fisuras en medialuna*



Fuente: (Gabela Berrones, 2013)

***Fisuras de borde.*** Este tipo de fisuras como su nombre lo indica se generan en el borde de la calzada y se presentan en forma longitudinal a semicircular. La causa de este deterioro se manifiestan principalmente por la ausencia de la berma o por el desnivel que existe entre la berma y la carretera (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006).

**Figura 7***Fisuras de borde*

Fuente: (Gabela Berrones, 2013)

***Fisuras en bloque.*** Son fisuras interconectadas que generalmente dividen la carpeta asfáltica en polígonos de forma rectangular. La dimensión de los bloques va desde 0.9 m<sup>2</sup> hasta un aproximado de 9 m<sup>2</sup> y su origen se da por la alta rigidez de las mezclas asfálticas, deficiencia en la elaboración de las mezclas y la contracción excesiva provocada por agentes climáticos (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2016).

**Figura 8***Fisuras de bloque*

Fuente: (Gabela Berrones, 2013)

***Fisuras tipo piel de cocodrilo.*** En el pavimento se presentan fisuras continuas en forma de polígonos irregulares simulando la apariencia de piel de cocodrilo, generalmente estas fisuras se dan en áreas sujetas a cargas vehiculares repetidas y se produce desde las capas inferiores por las deformaciones generadas en las mismas (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006).

### **Figura 9**

*Fisuras tipo piel de cocodrilo*



Fuente: (Gabela Berrones, 2013)

### **Deformaciones**

***Ondulación.*** Es un daño conocido también como corrugación que se caracteriza por formación de ondas en la superficie asfáltica, generalmente creando crestas y valles que se encuentran de forma perpendicular al sentido del tránsito. Esta deformación se genera por la baja inestabilidad de las capas superficiales, condiciones ambientales y deficiencia en el proceso de elaboración de las mezclas asfálticas (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2016).

**Figura 10**

*Deformación tipo ondulación*



Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006)

**Abultamiento.** Este deterioro está asociado con la formación de prominencias o relieves que se generan en la capa de rodadura de manera abrupta sobre una pequeña superficie y se origina por la expansión de la capa subrasante (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2016).

**Figura 11**

*Abultamiento*



Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006)

**Hundimiento.** Los hundimientos corresponden a los descensos de la superficie del pavimento, que se pueden originar en el borde de la calzada o internamente ya sea por asentamientos de las capas subyacentes o una inadecuada compactación de las mismas (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2016).

### Figura 12

*Hundimiento en el pavimento*



Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006)

**Ahuellamiento.** El ahuellamiento es una depresión longitudinal que se genera en el trayecto de circulación de los neumáticos de los vehículos, el cual provoca levantamientos en las zonas adyacentes a lo largo de la depresión. Las causas más comunes de este tipo de daño es la deficiente compactación de las capas que conforman el pavimento, influye también el espesor inadecuado de la capa de rodadura y perceptiblemente se ve afectado por las sobrecargas de tránsito a las que están sometidas. Un ahuellamiento severo puede provocar una falla estructural en el pavimento y la acumulación del agua en esta zona facilita a que se genere el fenómeno de hidroneumático provocando accidentes en la vía (INVIAS, 2012).

**Figura 13**

*Ahuellamiento en el pavimento*



Fuente: (Gabela Berrones, 2013)

**Pérdida de capas estructurales**

***Descascaramiento.*** Se refiere a la pérdida o desprendimiento de fragmentos que se genera únicamente en la capa de rodadura sin afectar las capas subyacentes a la carpeta asfáltica (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006). Normalmente este tipo de deterioro se genera por la poca adherencia que existe entre la carpeta asfáltica y la capa subyacente, otra causa es el espesor inadecuado de la capa de asfalto (INVIAS, 2012).

**Figura 14**

*Descaramiento del pavimento*



Fuente: (Barajas Reina & Buitrago Martínez, 2017)

**Baches.** Los baches corresponden a la disgregación de la carpeta asfáltica que dejan expuestos a los materiales granulares de las capas, el daño tiende a expandirse por la carga de tráfico y su origen está relacionado con el avance de otro daño como las fisuras tipo piel de cocodrilo (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006).

### Figura 15

#### *Baches en el pavimento*



Fuente: (Barajas Reina & Buitrago Martínez, 2017)

**Parche.** Los parches conciernen a las zonas del pavimento donde una superficie localizada fue retirada y reemplazada por otro material que puede ser similar o diferente al colocado anteriormente, se lo realiza con el fin de reparar la capa de rodadura (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006).

**Figura 16**

*Parche*



Fuente: (Barajas Reina & Buitrago Martínez, 2017)

**Deterioro superficial**

***Desgaste superficial.*** El desgaste superficial se genera por las cargas repetidas de tránsito y se evidencia con la pérdida del ligante, normalmente se debe la poca adherencia de los componentes de la mezcla asfáltica o por una incorrecta dosificación de la misma (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006).

**Figura 17**

*Desgaste superficial del pavimento*



Fuente: (Gabela Berrones, 2013)

***Pérdida de agregado.*** Este deterioro se refiere al desprendimiento gradual de los agregados pétreos de la capa de rodadura, que se genera normalmente por un proceso inadecuado al momento de colocar la mezcla asfáltica en sitio. Otras causas que provocan este daño son los factores climáticos y la carga de tráfico en la estructura (INVIAS, 2012).

### **Figura 18**

*Pérdida de agregado*



Fuente: (Gabela Berrones, 2013)

***Pulimento del agregado.*** Este tipo de daño provoca una disminución en la fricción que existe durante el contacto de la vía y las ruedas de un vehículo, debido a que es notable la presencia agregados con caras lisas en la superficie del pavimento provocando que la carretera sea insegura y propensa a accidentes (INVIAS, 2012).

**Figura 19**

*Pulimiento del agregado*



Fuente: (Gabela Berrones, 2013)

**Exudación.** La exudación se presenta en la carpeta de rodadura como un afloramiento del ligante asfáltico, usualmente puede llegar a ser resbaladiza y pegajosa afectando el desempeño antideslizante de la carretera (INVIAS, 2012).

**Figura 20**

*Exudación en el pavimento*



Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006)

## Otros daños

***Corrimiento vertical de la berma.*** Corresponde al desnivel que se genera entre el borde de la calzada y la berma, esto se debe por el proceso de infiltración haciendo que el agua llegue al interior del pavimento provocando un asentamiento o la erosión de la berma (Vásquez, 2002).

### Figura 21

*Corrimiento vertical de la berma*



Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006)

***Afloramiento de finos.*** El afloramiento de finos se da por la constante circulación vehicular y consiste en la salida de toda esa agua infiltrada acompañada de materiales en este caso finos que sobresale desde la capa base, normalmente este tipo de daño se genera en pavimentos semi rígidos (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006).

***Afloramiento de agua.*** La ausencia de un sistema de drenaje interno en las capas del pavimento puede generar el afloramiento de agua en la carpeta asfáltica en instantes en los cuales no hay lluvia, generalmente el agua se presenta por las fisuras (INVIAS, 2012).

**Figura 22**

*Afloramiento del agua*



Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia et al., 2006)

## **Factores Climáticos que afectan a los pavimentos**

### ***Radiación Solar***

La radiación solar es la energía que emite el sol y se difunde por medio de ondas electromagnéticas a través del espacio a una velocidad de 300.000 Km/s, tardando tan sólo 8 minutos en viajar 150 millones de km aproximadamente que es la distancia entre el sol y la tierra. Las ondas electromagnéticas por lo general están conformados por varias longitudes de onda que en conjunto componen la radiación electromagnética y a esto se le denomina espectro de radiación (Andrades & Múñez, 2012).

**Efectos en la atmósfera.** La radiación solar al introducirse en la atmósfera produce desviaciones y pérdidas de energía ya que una parte de la radiación es absorbida por la atmósfera, otra parte alcanza la superficie de la tierra y una parte se pierde en el espacio (Andrades & Múñez, 2012).

**Efectos por la Latitud.** La radiación también puede influir por la latitud, ya que depende de la posición geográfica que es la que establece la duración del día y la manera en la que los rayos del sol inciden (Andrades & Múñez, 2012)

**Afectaciones en el pavimento.** La radiación solar que llega a los pavimentos depende de la fecha, la posición espacial del sol y la cantidad de nubes. La radiación que genera calor es la de onda corta por lo que la radiación absorbida por el pavimento dependerá de la capacidad de absorción de la superficie de la carpeta asfáltica (Leiva Villacorta et al., 2016).

La radiación solar produce la evaporación de un cierto porcentaje de asfalto y crea un ambiente propicio para la oxidación provocando el envejecimiento prematuro de las mezclas asfálticas, aumento de la permeabilidad de la capa y también se evidencia la decoloración de la carpeta asfáltica junto con el desgaste del material granular (Del Águila Rodríguez, 2000).

### ***Temperatura***

La cantidad de energía calórica que tiene un cuerpo depende del indicador de la temperatura y el calor debido que están estrechamente relacionados. Asimismo, el calor tiene la propiedad de transmitirse de un elemento a otro que tenga una temperatura mucho menor (Clemente Huarcaya, 2019).

Según De Llano (2003), las formas de transferir calor que existen son las siguientes:

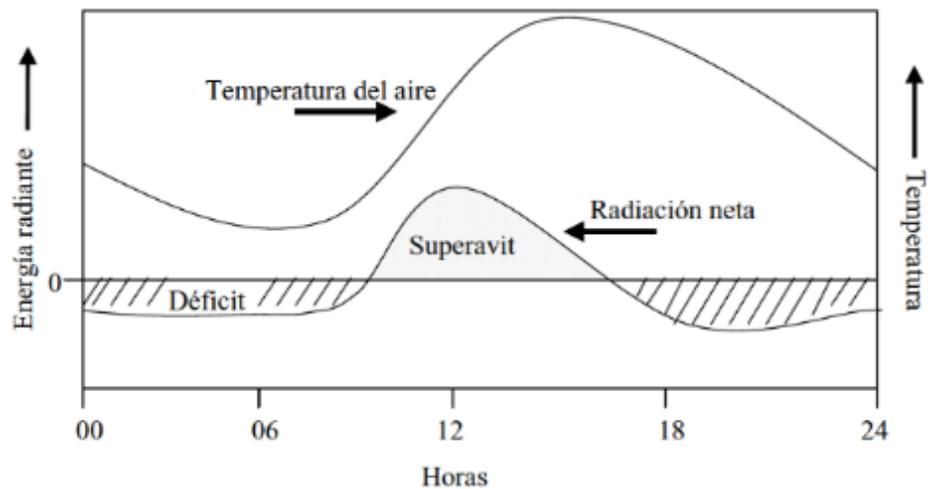
- **Conducción:** Transferencia de calor de un elemento que se encuentra a diferente temperatura sin existir transferencia de materia.
- **Convección:** La transferencia se da a través de un gas o líquido.

- Radiación: El calor es radiado en forma de onda electromagnética.

**Variación de temperatura diaria.** La temperatura y la radiación tienden a variar en el transcurso del día, en la siguiente figura se puede observar los cambios desde las 06 horas a las 18 horas y los fenómenos de las energías que entran y salen de la superficie terrestre, afectando la temperatura en la atmosfera y por ende el de los pavimentos. La curva de la temperatura ambiental que se visualiza en la figura no es simétrica y las temperaturas máximas alcanzadas se dan a partir del mediodía, debido al tiempo que conlleva en calentarse la superficie (Andrades & Múñez, 2012)

**Figura 23**

*Curvas Típicas de radiación y temperatura ambiente*



Fuente: (Andrades & Múñez, 2012)

**Variación de la temperatura con la altura.** Según Andrades & Múñez (2012), la temperatura ambiente puede variar en función de la altura, debido a que si se encuentre a mayor altura, menor es la temperatura del aire, por lo general la variación

media de temperatura es de 6,5°C cada kilómetro aproximadamente, pero puede cambiar por las condiciones de humedad de la atmósfera en la zona de estudio.

**Gradiente térmico.** Es un fenómeno que se da en zonas de altura y produce cambios volumétricos diarios dentro de la estructura de la carpeta asfáltica, esto provoca esfuerzos cíclicos de tracción y compresión que posteriormente se convertirán en fallas por fatiga. Por lo general el gradiente puede variar de acuerdo las condiciones del sector tales como el calentamiento del suelo, disminución drástica de la temperatura del suelo, vientos fuertes y/o movimiento turbulento de aire (Encalada, 2017; Del Águila Rodríguez, 2000).

**Medición de la temperatura del aire.** Esta información habitualmente lo puede proporcionar los institutos de meteorología de cada país debido a que cuentan con estaciones meteorológicas apropiadamente equipadas. Para la adquisición de datos de las temperaturas se requiere de un termómetro de máxima, un termómetro de mínima y en algunas ocasiones de un termógrafo que son ubicados aproximadamente a 1,50 m del suelo (Clemente Huarcaya, 2019).

**Afectaciones en el pavimento.** La temperatura del aire tiene una gran influencia en el comportamiento de los pavimentos flexibles, debido que el material asfáltico tiende a volverse rígido y relativamente quebradizo cuando se expone a temperaturas bajas, siendo propenso a sufrir de agrietamientos por fatiga. A temperaturas altas el asfalto tiene un comportamiento blando y viscoelástico lo que puede provocar deformaciones permanentes en el pavimento. Este factor climático tiene un efecto significativo en el envejecimiento de los materiales por lo que se debe considerar en el diseño de la

estructura para evitar el desgaste del revestimiento asfáltico y garantizar la vida útil del mismo (Austroads, 2008).

La fatiga es uno de los modos de falla más comunes en los pavimentos flexibles, la cual es caracterizada por la interconexión de grietas longitudinales y transversales provocadas por los esfuerzos de tensión que se generan en la base de la carpeta asfáltica, debido al tránsito pesado. Se debe considerar que el comportamiento de las capas granulares, difiere de las carpetas asfálticas en cuanto a su respuesta a la humedad y temperatura. Por ende, estos factores son muy importantes de considerar a la hora de estructurar el camino.

Respecto al efecto de temperatura en la fatiga de mezclas asfálticas se conoce que la variación de temperatura altera las características y el comportamiento mecánico del material, disminuyendo la capacidad estructural del pavimento [Caro, García, Caicedo, 2001]. Adicionalmente se ve involucrado aquí la reología del asfalto pues se ha demostrado que a altas temperaturas el asfalto se comporta como un líquido viscoso, a temperaturas bajas se comporta como un sólido elástico y a temperaturas intermedias se comporta como un material viscoelástico.

La temperatura disminuye la servicialidad del asfalto, ante temperaturas extremas el pavimento pierde sus características óptimas y la fatiga es mucho mayor, la repetición de cargas afectan en mayor medida a la deformación que tienen las capas que conforman el asfalto y por tanto en una mezcla asfáltica cerrada a pesar de tener ventajas por su bajo porcentaje de vacíos los efectos de la fatiga serán importantes en ella, pero se puede decir que mucho menores que en las mezclas asfálticas abiertas (Valdés et al., 2012).

## **Humedad**

El fenómeno que causa el daño por humedad es compleja, debido a que hay varios aspectos que influyen en los pavimentos como los termodinámicos, químicos, físicos y/o dinámicos (Rondón Quintana et al., 2016). Por lo general la humedad se determina según la intensidad de las precipitaciones debido a que afectan el nivel freático de la superficie, además influye la infiltración del agua, las condiciones geográficas y la capacidad de drenaje de la estructura del pavimento (Leiva Villacorta et al., 2016).

**Afectaciones en el pavimento.** El efecto de humedad tiene una gran influencia en el rendimiento de un pavimento. La resistencia de los materiales no ligados y de las subrasantes depende en gran medida del contenido de humedad de los materiales (Austroads, 2008). También se menciona que el fenómeno de la humedad está en función de la tensión superficial que existe entre el agregado y el asfalto, y se ha demostrado que la utilización de ligantes más viscosos ayuda a tener una mayor resistencia al daño por humedad (Rondón Quintana et al., 2016).

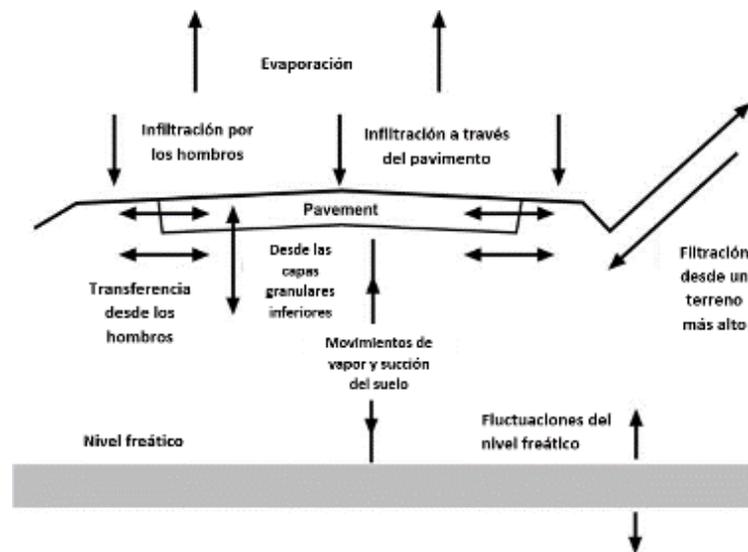
El agua superficial al introducirse por los vacíos de la carpeta asfáltica contribuye a la oxidación del asfalto y al combinarla con las cargas de tráfico se produce un efecto destructivo debido al agua almacenada dentro de las fisuras y a la presión que genera los neumáticos en el pavimento (Obando Gamboa, 2017).

En una mezcla asfáltica abierta o porosa existe un fenómeno denominado “stripping” o “perdida de recubrimiento” y se origina cuando el ligante asfáltico se separa del agregado pétreo debido a la presencia de agua en el interior de la mezcla asfáltica. Muchos de estos efectos negativos en las mezclas asfálticas se dan por la reducción de contenido de asfalto que generalmente se lo realiza con el fin de

contrarrestar el fenómeno de ahuellamiento, pero según otros autores se debe considerar que a mayor espesor de la película de asfalto mayor va a ser la resistencia al efecto de la humedad o entre más viscoso sea el asfalto este va a ser menos propenso a tener daños a causa de la humedad (Rondón Quintana et al., 2016).

**Figura 24**

*Movimientos de agua en los pavimentos.*



Fuente: (Austroads, 2008)

## **Mezclas Asfálticas**

### ***Definición de Mezcla Asfáltica***

Según Kraemer et al. (2004), en su libro Ingeniería de Pavimentos menciona que las mezclas asfálticas también llamados como aglomerados están conformados por agregado pétreo y material, de tal forma que al ser mezclados queden completamente cubiertos por una película continua. La elaboración de estos elementos es de forma mecánica, conformados dentro de centrales adecuados que pueden ser fijas o móviles para luego ser transportados al sitio de construcción donde es extendido y finalmente se compactado. (p. 313).

Las mezclas asfálticas son utilizadas en proyectos viales, pavimentos industriales, construcción de aeropuertos, entre otros. Están conformadas aproximadamente por 5 % de ligante, 5% de polvo mineral y por un 90% de agregados pétreos, dentro de estos se considera el material grueso y fino. Todos los componentes mencionados deben pasar por un proceso de calidad para garantizar la correcta adherencia de los materiales (Padilla Rodríguez, 2004).

### ***Clasificación de las Mezclas Asfálticas***

Para la clasificación de las mezclas asfálticas se consideran varios parámetros para establecer diferencias. A continuación, se presenta una tabla que muestra su clasificación:

**Tabla 1***Clasificación de las mezclas asfálticas*

<b>Parámetro de Clasificación</b>	<b>Tipo de mezcla</b>
<b>Fracciones de agregado empleadas</b>	Masilla (Polvo mineral más ligante)
	Mortero (Agregado fino más masilla)
	Concreto (Agregado grueso más mortero)
	Macadam (Agregado grueso más ligante asfáltico)
<b>Temperatura de puesta en obra</b>	En Frío (Se utiliza una emulsión asfáltica y la colocación en sitio es a temperatura ambiente)
	En Caliente (Temperatura de fabricación $\approx 150^{\circ}\text{C}$ , temperatura mayor al del ambiente al ser colocado)
<b>Huecos en la mezcla/ Proporción de vacíos (h)</b>	Cerradas ( $h < 6\%$ )
	Semicerradas ( $6\% < h < 12\%$ )
	Abiertas ( $h > 12\%$ )
	Porosas ( $h > 20\%$ )
<b>Tamaño máximo del agregado (t máx)</b>	Gruesas ( $t \text{ máx} > 10 \text{ mm}$ )
	Finas/Microaglomerados ( $t \text{ máx} < 10 \text{ mm}$ )
<b>Estructura del agregado</b>	Con esqueleto mineral resistente
	Sin esqueleto mineral resistente
<b>Granulometría</b>	Continuas (Diferentes tamaños de agregado)
	Discontinuas (Limitado tamaño de agregado)

Nota: Las mezclas en caliente requieren que los agregados sean calentados para una adherencia eficiente de los materiales y la temperatura para su colocación en sitio debe ser mucho mayor a la del ambiente.

Fuente: (Kraemer et al., 2004)

**Mezclas abiertas o drenantes.** Son aquellas mezclas que tienen un porcentaje de vacíos mayor a los 12% de tal manera que permite una rápida filtración del agua para luego ser evacuada hacia las cunetas y a sistemas de drenaje lo que evita la acumulación de agua en la

capa de rodadura. Por lo general, las mezclas abiertas son colocadas en las vías y con espesores delgados para mejorar el drenaje superficial (Juyar Mora & Pérez Cely, 1998).

Según el artículo de Juyar Mora & Pérez Cely (1998), las ventajas de implementar las mezclas asfálticas abiertas con las siguientes:

- En periodos de lluvia la resistencia al deslizamiento es mayor, a tal punto que reduce el fenómeno de hidroplaneo.
- Aumenta la resistencia al deslizamiento cuando los vehículos se transportan a altas velocidades.
- Disminución de agua dispersada en la calzada.
- Reducción del ruido por la presencia alta de huecos que permiten el paso del aire.

Existen desventajas que pueden influir a que este tipo de mezclas no sean implementadas según (Autopistas an Abertis Company, s. f.; Juyar Mora & Pérez Cely, 1998):

- La capacidad de permeabilidad de estas mezclas puede disminuir con el tiempo.
- Costo de inversión alto a comparación de la construcción de pavimentos con mezclas tradicionales.
- El costo de mantenimiento es relativamente alto debido a que debe ser más continuo para evitar la acumulación de residuos.

### ***Componentes de las mezclas asfálticas***

**Agregados.** Es conocido también como roca, material granular o cualquier material mineral que se encuentra en forma de partículas graduadas que se utilizan conjuntamente con un ligante para formar materiales compuestos como mezclas

asfálticas. El agregado también es utilizado para las capas de base y sub base de un pavimento flexible o rígido (WSDOT, 2008; como se citó en Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016).

***Propiedades del agregado.*** Según el Asphalt Institute (1982), la mezcla asfáltica está compuesta del 90% a 95% de agregados, por lo que las propiedades de este material granular son de gran importancia para el buen desempeño del pavimento. El agregado debe cumplir con todas las especificaciones necesarias para una buena adherencia con el ligante asfáltico y a más de eso debe cumplir con otros requisitos como la disponibilidad del material y el costo del mismo.

A continuación, se menciona otras propiedades que garantizan la buena calidad de los agregados:

- Dureza
- Limpieza
- Capacidad de absorción
- Textura de la superficie
- Afinidad con el cemento asfáltico

***Clasificación de Agregados.*** La clasificación se basa en el tipo de formación de la roca según con el Asphalt Institute (1982) y están divididas en 3 tipos:

- Rocas Sedimentarias
- Rocas Ígneas
- Rocas Metamórficas

Tabla 2

*Clasificación de Agregados*

<b>Clase</b>	<b>Tipo</b>	<b>Familia</b>	
<b>Sedimentarias: Se forman por la acumulación de sedimentos</b>	Calcáreas	Caliza	
		Dolomita	
	Síliceas	Arcilla Esquistosa	
		Arenisca	
		Horsteno	
		Conglomerado	
<b>Metamórficas: Rocas sedimentarias o ígneas transformadas por la presión y por reacciones químicas</b>	Foliadas	Breccia	
		Gneis	
		Esquisto	
		Anfibolita	
	No Foliadas	Pizarra	
		Cuarcita	
		Mármol	
		Serpentina	
<b>Ígneas: Constan de material fundido (magma) que se han enfriado y solidificado.</b>	Intrusivas	Granito	
		Sienita	
		Diorita	
		Gabbro	
		Periodotita	
		Piroxenita	
		Hornablendita	
		Extrusivas	Obsidiana
			Pómez
	Tufa		
	Riolita		
	Traquita		
	Andesita		
	Basalto		
	Diabasa		

Fuente: (Asphalt Institute, 1982)

Los agregados utilizados para la elaboración de los pavimentos son producidos en una mina o cantera, que cuentan con el equipo necesario para convertir la roca in situ en agregado con especificaciones necesarias para la construcción. El proceso consta de extraer de las paredes

de la cantera el material prima y reducirlo mediante el uso de una serie de pantallas y trituradoras a un tamaño que se ajuste a las necesidades del proyecto (WSDOT, 2008; como se citó en Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016).

**Cemento asfáltico.** Según en el libro de Arenas Lozano (2006) la definición de asfalto, es el material de color oscuro con propiedades adhesivas y aglutinantes, conformado por una serie de elementos y compuestos muy complejos, entre los que destacan los hidrocarburos. La mayor parte es soluble en disulfuro de carbono y presenta una consistencia semisólida a temperatura ambiente normal, este material tiende a fluir rápidamente a medida que aumenta la temperatura, cual lo hace adecuado para una variedad de diferentes propósitos dentro de la ingeniería civil. (p. 17)

**Propiedades Químicas.** El cemento asfáltico tiene propiedades que lo hacen manejable para el empleo en obras de construcción como es el caso de las vías. El asfalto está compuesto por varios hidrocarburos que son las combinaciones de moléculas de carbono e hidrógeno, también puede tener en pequeñas cantidades el azufre, nitrógeno y oxígeno (Asphalt Institute, 1982). La composición específica del asfalto está relacionada con la fuente del petróleo crudo y es un material anisotrópico considerado como un coloide compuesto por varias partes, principalmente por los asfaltenos y maltenos. Los asfaltenos corresponden a la fase dispersa del asfalto que aporta dureza al material y los maltenos corresponden a la fase continua que contribuyen a la adherencia y ductilidad del mismo (Delbono, 2014).

**Propiedades Físicas.** Según el manual elaborado por el Asphalt Institute (1982) las propiedades físicas más importantes que se deben considerar tanto para el diseño como para el mantenimiento de las vías son las siguientes:

- Durabilidad: Permite conocer la medida de que tanto puede un asfalto mantener sus características originales.
- Adhesión: Capacidad del cemento asfáltico en mantenerse adherido a los agregados.
- Susceptibilidad a la temperatura: Se refiere a sus propiedades termoplásticas, ya que su consistencia cambia con la variación de temperatura.
- Envejecimiento y endurecimiento: Se genera durante el proceso constructivo a causa de la oxidación y por las altas temperaturas.

**Clasificación.** La clasificación de los cementos o ligantes asfálticos depende de sus propiedades físicas, que generalmente se determinan por medio de ensayos especificados. Las formas de caracterización tradicionalmente utilizados para la clasificación de los asfaltos pueden ser por el grado de penetración, por el grado de viscosidad y por el grado de desempeño (Salazar Delgado, 2011; Corrales Chilibingua, 2015)

**Grado de Penetración.** Se requiere de un galón de asfalto para la realización de las pruebas. El objetivo es clasificar al asfalto de acuerdo a los resultados obtenidos con el ensayo de penetración a 25 °C, en el cual se debe comprobar que todos los parámetro cumplan de acuerdo a lo establecido (Salazar Delgado, 2011). El cemento asfáltico tiende a ser más blando mientras mayor sea su grado de penetración (Carvajal Mora &

Chicaiza Fuentes, 2016). En la tabla 3 se puede visualizar las especificaciones de acuerdo al grado de penetración según la Norma ASTM -D946.

**Tabla 3**

*Especificaciones para cementos asfálticos según su grado de penetración*

Característica	Uni.	Método ASTM	Grado de Penetración									
			40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
			Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
<b>Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s</b>	---	D-5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
<b>Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta</b>	°C	D-92	232	---	232	---	232	---	218	---	177	---
<b>Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min</b>	cm	D-113	100	---	100	---	100	---	100	---	100	---
<b>Solubilidad en tricloroetileno</b>	%	D-2042	99	---	99	---	99	---	99	---	99	---
<b>Penetración retenida después de la prueba de horno sobre película delgada</b>	%	D-5 Después de realizar D-1754	55+	---	52+	---	47+	---	42+	---	37+	---
<b>Ductilidad 25 °C, 5 cm (min, después de prueba de horno sobre película delgada)</b>	cm	D-113 Después de realizar D-1754	---	---	50	---	75	---	100	---	100	---

Fuente: Norma ASTM D-946 (ASTM International, 2010)

**Grado de viscosidad.** La tabla 4 muestra las especificaciones para ligantes asfálticos clasificados según el grado de viscosidad a 60 °C. De igual manera se requiere de un galón de muestra para la realización de los ensayos necesarios y lograr determinar el

grado de viscosidad como se especifica en la norma ASTM D 3381 (Salazar Delgado, 2011).

La unidad de medida utilizada para representar la viscosidad absoluta es el poise ya que clasifican al asfalto de la siguiente manera: AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-40, esto significa que un asfalto AC-5 tiene una viscosidad de 500 poises a 60° C y sus características son más blandas que un cemento asfaltico de AC-30 (Corrales Chilibingua, 2015).

**Tabla 4**

*Especificaciones para cementos asfálticos según por su viscosidad a 60 °C*

Característica	Unidad	Método ASTM	Grado de Viscosidad					
			AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad a 60 °C	N s/m <sup>2</sup>	D-2170	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad a 135 °C, mín	mm <sup>2</sup> /s	D-2170	125	175	250	300	350	400
Penetración a 25°C, 100gr, 5seg, mín	1/10 mm	D-5	200	140	80	60	50	40
Punto de inflamación Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mín	%	D-2042	99	99	99	99	99	99
Ensayos sobre residuo de película en horno		D-1754						
Viscosidad a 60°C, máx	N s/m <sup>2</sup>	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad (25°C, 5cm/min) mín.	cm	D-113	100	100	75	50	40	25

Fuente: Norma ASTM D 3381 (Salazar Delgado, 2011).

**Grado de desempeño.** Está clasificación permite establecer un rango del valor de temperatura en el que pueda desempeñarse de manera adecuada un asfalto en particular como se muestra en tabla 5 (Aguiar Velasquez, 2019). En la figura 25 se puede observar la nomenclatura del Grado PG.

**Figura 25**

*Nomenclatura para el Grado de Desempeño*



Fuente: (Aguiar Velasquez, 2019)

**Tabla 5**

*Rangos para el grado de desempeño*

	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
<b>PG</b>	46	34, 40, 46
<b>PG</b>	52	10, 16, 22, 28, 34, 40, 46
<b>PG</b>	58	16, 22, 28, 34, 40
<b>PG</b>	64	10, 16, 22, 28, 34, 40
<b>PG</b>	70	10, 16, 22, 28, 34, 40
<b>PG</b>	76	10, 16, 22, 28, 34
<b>PG</b>	82	10, 16, 22, 28, 34

Fuente: Instituto del Asfalto (Aguiar Velasquez, 2019)

A continuación, se muestra las especificaciones según el grado de desempeño que posteriormente se va a utilizar para la metodología SUPERPAVE

Tabla 6

*Especificaciones para cementos asfálticos según su grado de desempeño*

Característica	Unidad	Grado de Desempeño						
		PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
		-34 -40 -46	-10 -16 -22 -28 -34 -40 -46	-16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34	-10 -16 -22 -28 -34
<b>Promedio 7-días Temperatura Máxima de Diseño de Pavimento</b>	°C	<46	<52	<58	<64	<70	<76	<82
<b>Temperatura Mínima de Diseño de Pavimento (1)</b>	°C	>-34>- 40 >-46	>-10>-16 >-22>-28>-34 >-40>-46	>-16>-22>- 28 >-34>-40	>-10>-16>- 22 >-28>-34>- 40	>-10>-16>- 22 >-28>-34>- 40	>-10>-16>- 22 >-28>-34	>-10>-16>- 22 >-28>-34
<b>Aglutinante Original</b>								
<b>Temperatura de Punto de Inflamación, Mínima</b>	°C	230						
<b>Viscosidad, 3 Pa.s, Temperatura de Prueba, máxima</b>	°C	135						
<b>Cizalla Dinámica (2) G*/sen <math>\phi</math>, mín. 1.10 kPa. de 25-mm, Plato 1-mm de Espacio, Temp. de Prueba a 10- rad/s</b>	°C	46	52	58	64	70	76	82
<b>Horno sobre película delgada rodante (Método de Prueba D-2872)</b>								
<b>Pérdida de masa, máxima</b>	%	1						
<b>Cizalla Dinámica: G*/sen <math>\phi</math>, mín. 2.20 kPa, Plato de 25-mm, 1-mm de Espacio, Temp. de Prueba a 10 rad/s</b>	°C	46	52	58	64	70	76	82

Continuación Tabla 6

<b>Residuo de Recipiente para Envejecimiento a Presión (AASHTO PP1)</b>								
<b>Temperatura de Envejecimiento PAV (3)</b>	°C	90	90	100	100	100 (110)	100 (110)	100 (110)
<b>G*/sen <math>\phi</math>, máx. 5000 kPa, Plato de 8 mm, 2 mm de Espacio, Temp de Prueba a 10 rad/s</b>	°C	10 7 4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16	34 31 28 25 22 19	37 34 31 28 25	40 37 34 31 28
<b>Resistencia a la Fluencia: (4) S, máx. 300 MPa, valor m, mín. 0.300, Tempo de Prueba en 60 s</b>	°C	-24 -30 -36	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36	-6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24
<b>Tensión Directa: (4) Falla de Deformación, mín. 1.0 %, Temp. de Prueba a 1.0 m/minuto</b>	°C	-24 -30 -36	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36	-6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24

Nota:

- 1) Las temperaturas del pavimento se estiman por medio de las temperaturas del aire utilizando un algoritmo contenido en el Programa de Computadora SUPERPAVE.
- 2) Para control de calidad de la producción de cemento asfáltico sin modificar, la medida de viscosidad del cemento asfáltico original puede sustituir a las medidas de cizalla dinámica de G\*/sen d en las temperaturas de prueba donde el asfalto es un fluido Newtoniano. Se puede utilizar cualquier norma adecuada para medir la viscosidad, incluyendo viscosímetro capilar o rotacional (Métodos de Prueba D-2170 ó D-2171).
- 3) La temperatura de envejecimiento PAV es 100°C para PG 64 y grados superiores, excepto para climas desérticos donde es 110 °C.
- 4) Si la dureza a la deformación gradual es menor que 300 MPa, no se requiere la prueba de tensión directa. Si la dureza a la deformación está entre 300 y 600 MPa el requerimiento de falla de deformación de la tensión directa se puede utilizar en lugar del requerimiento del esfuerzo a la fluencia. El requerimiento del valor m se debe satisfacer en ambos casos.

**Cementos asfálticos modificados.** En algunas circunstancias se dan casos en que las características de las mezclas asfálticas elaboradas con ligantes convencionales, no cumplen con la funcionalidad que les corresponde debido a que no tienen la capacidad de soportar la acción de las cargas de tráfico ni el cambio climático de manera conjunta y eficiente, creando la necesidad de utilizar modificadores en el cemento asfáltico (Arenas Lozano, 2006). Por lo tanto, los cementos asfálticos modificados, son los asfaltos que muestran un comportamiento mejorado con la finalidad de soportar mayores esfuerzos y modificar la susceptibilidad térmica que es causada por la variación extrema de temperatura, por esta razón se adiciona al asfalto un polímero adecuado, que mejora las propiedades reológicas y sus características de elasticidad, adherencia y cohesión. (Corrales Chiliquina, 2015)

Los polímeros son sustancias que pueden ser naturales o sintéticas y están constituidas por la unión de moléculas más sencillas, llamados monómeros que se caracteriza por su peso elevado. Estos, son obtenidos por medio de procesos de polimeración junto con la incorporación de aditivos que mejoran considerablemente sus propiedades (Corrales Chiliquina, 2015).

Las mezclas asfálticas fabricadas con estos ligantes modificados muestran una rigidez mayor frente a temperaturas altas de servicio ya que ayuda a la disminución de los ahuellamientos. Los bajos valores de rigidez cuando la temperatura es relativamente baja permite la reducción del riesgo de la aparición de fisuras prematuras. Además, el grado de afinidad entre el asfalto y el agregado mejora principalmente en presencia de la humedad (Arenas Lozano, 2006).

**Reología de los Materiales Asfálticos.** La reología es una ciencia que se enfoca en el estudio de la deformación y el flujo de los materiales a lo largo de un periodo de tiempo. En el caso de los asfaltos, cabe recalcar que son un tipo de material en el que su comportamiento reológico es causado por dos factores principales: la velocidad y la temperatura de la carga (Morea, 2011).

**Propiedades Reológicas del Asfalto.** De acuerdo al trabajo de Huamán (2011), para los productos asfálticos la reología es uno de los aspectos más importantes, es por ello que es importante señalar las propiedades de teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales, plasticidad, viscosidad e hidráulica.

**Teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales.** La teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales hace referencia a los esfuerzos internos y desplazamientos en un cuerpo en equilibrio como consecuencia de un estímulo externo que puede ser de diferentes clases como mecánica, térmica o reológica, siendo esta última la de interés para la presente investigación (Rodríguez Avial & García, 2012).

**Plasticidad.** La plasticidad es el fenómeno físico en el que las magnitudes de las fuerzas aplicadas sobre un cuerpo sólido son suficientes para que se comporte de forma muy semejante a un líquido, es decir, que al aplicar fuerzas lo suficientemente grandes a un cuerpo y removerlas, este cuerpo afectado retiene la forma deformada por dichas fuerzas (Godoy, 2005).

**Viscosidad.** La viscosidad nace como concepto por primera vez en el estudio de Newton “Principia Mathematica” en el cual afirma que se define a la viscosidad como la resistencia al cambio de posición de un fluido siendo proporcional a la velocidad de los componentes de dicho fluido que se están desconectando. (Obando Gamboa, 2017)

**Hidráulica.** La hidráulica estudia las interrelaciones entre viscosidad, caudal y presión de los fluidos, es decir que analiza la forma en la que los flujos de los fluidos crean y utilizan distintas presiones, y el comportamiento de dichos flujos solo son descritos por modelos reológicos (Arispe, 2020).

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

***Consideraciones para la selección y proyecto de una mezcla asfáltica.***

Se requiere de un análisis minucioso de todos los elementos relacionados, para garantizar un comportamiento eficiente de las mezclas asfálticas. Según Padilla Rodríguez (2004) Las fases de las que consta el proyecto de una mezcla son las siguientes:

- Estudio de todas las condiciones a las que va a estar expuesta la mezcla asfáltica.
- Establecer las propiedades que debe tener la mezcla según sus requerimientos.
- De acuerdo a los requerimientos del proyecto se selecciona el tipo de mezcla.
- Seleccionar el material adecuado, el cual debe cumplir con las especificaciones necesarias según el diseño de la mezcla. Verificar la disponibilidad de los agregados y que se encuentren cercanos al lugar del proyecto para no generar costos elevados.
- Selección del tipo de ligante que se va a utilizar, de igual manera influye el costo.
- Determinación de la dosificación idónea del ligante asfáltico y del agregado pétreo, el cual debe realizarse para diferentes combinaciones.

- Dentro del diseño se debe tomar en cuenta otros factores en la elección de una mezcla asfáltica tales como: Lugar de construcción, técnicas constructivas, requerimientos de seguridad vial, la estructura del pavimento (base, sub base, subrasante) y sistemas de drenaje.

### ***Diseño de mezcla asfáltica en caliente***

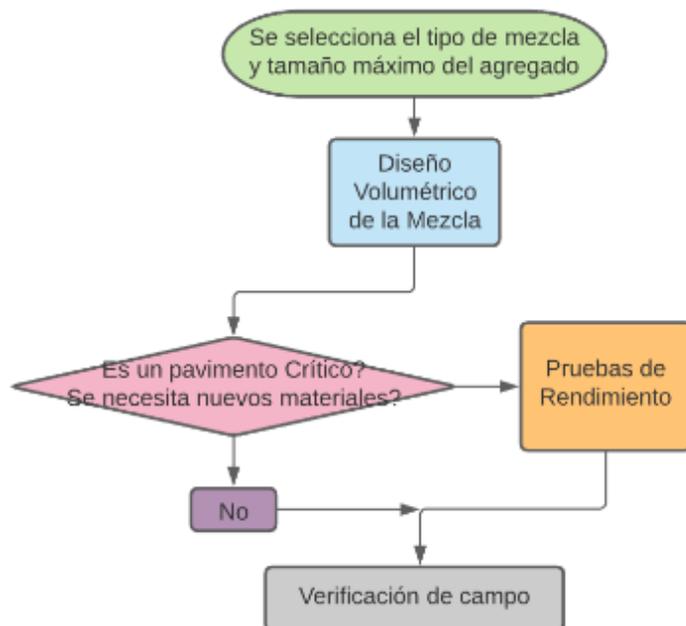
El procedimiento para el diseño de mezclas asfálticas radica en la selección del material adecuado y en la determinación de una combinación de agregados y asfaltos de acuerdo a lo establecido en el MOP. Según Burbano Del Castillo & Salazar Salazar (2019) esta combinación de materiales debe ser económica y las mezclas asfálticas elaboradas con dicho material deben tener las siguientes características:

- La cantidad de asfalto suficiente para garantizar la resistencia y durabilidad de la mezcla.
- Estabilidad para resistir deformaciones o desplazamiento provocadas por las cargas vehiculares.
- Porcentaje de vacíos óptimo de tal manera que impida que el agua se infiltre y no haya una pérdida de estabilidad.
- Trabajabilidad del material para una compactación más eficiente.

El proceso de diseño empieza con la selección del tipo de mezcla apropiada para el proyecto y el tamaño máximo de agregado. Por lo general, está basado en el tiempo de vida útil del pavimento tomando en cuenta otras consideraciones técnicas como el volumen de tráfico, peso vehicular y la velocidad de circulación. Existen casos en los que influyen otros factores tales como la permeabilidad y la reducción del ruido que determinan el tipo de mezcla asfáltica, pero dependerá del proyecto. En la figura 26 se indica los pasos que se deben considerar para el diseño de una mezcla asfáltica (Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016).

**Figura 26**

*Principio para el proceso de diseño mezclas asfálticas*

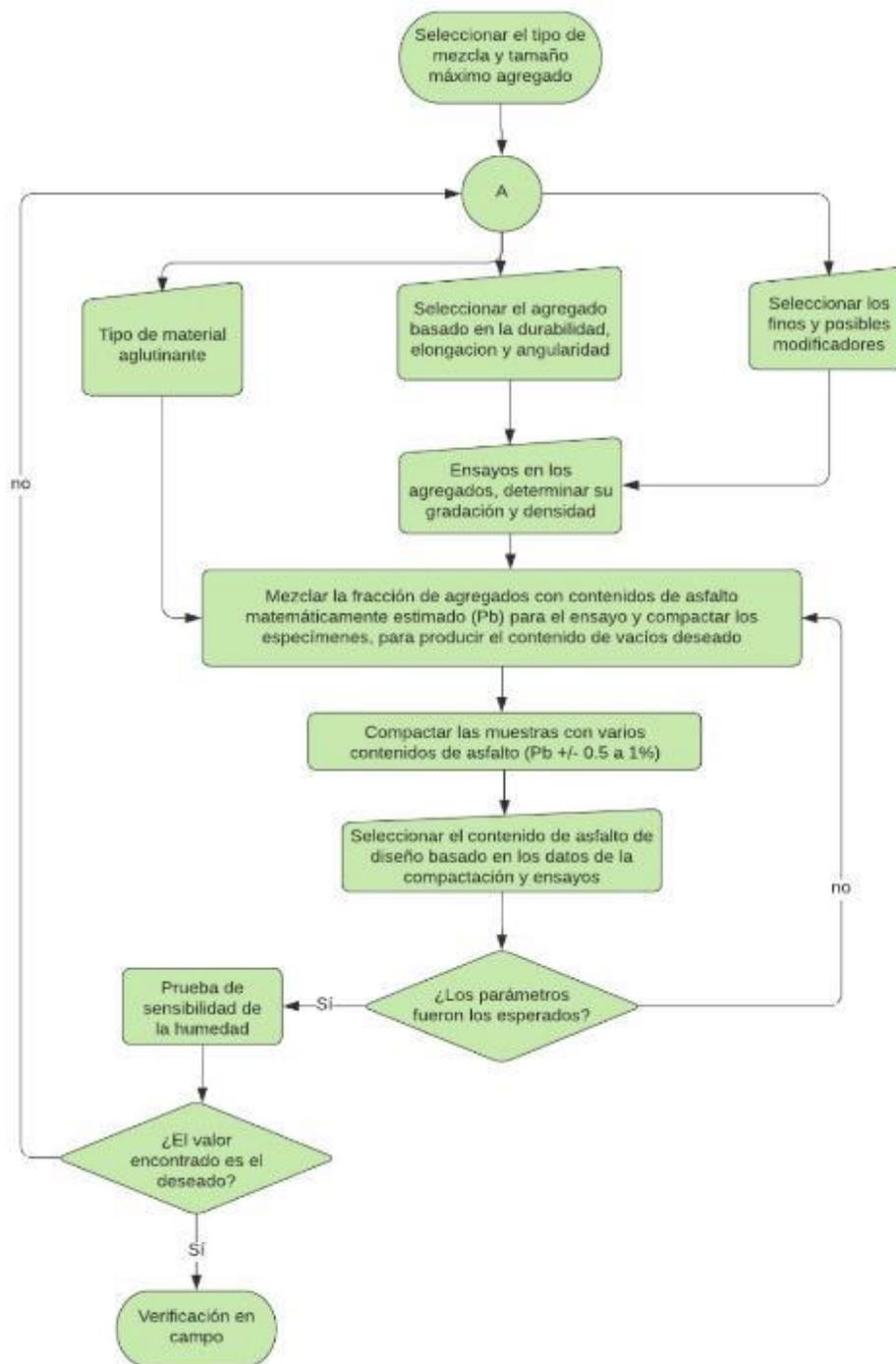


Fuente: (Doré & Zubeck, 2009; como se citó en Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016)

Para el diseño volumétrico de una mezcla asfáltica se selecciona materias primas adecuadas según especificaciones establecidas, se realizan ensayos requeridos para el material a utilizar, los ensayos para las muestras compactadas hasta conseguir una mezcla apropiada según el análisis de los resultados (Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016). En la figura 27 se observa un flujograma de todo el proceso de diseño de las mezclas asfálticas.

Figura 27

Procedimiento para el diseño de mezclas asfálticas



Fuente: (Doré & Zubeck, 2009; como se citó en Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016)

**Fórmula maestra de obra.** La formulación se desarrolla en base al estudio de los materiales que se proponen utilizar en el trabajo. Donde la formula maestra establecerá los siguientes puntos:

- Las cantidades de las diversas fracciones definidas para los agregados
- El porcentaje de material asfáltico para la dosificación, en relación al peso total de todos los agregados, inclusive el relleno mineral y aditivos para el asfalto si se los utilizase.
- La temperatura que deberá tener el hormigón al salir de la mezcladora
- La temperatura que deberá tener la mezcla al colocar en sitio

**Método Marshall para diseño de pavimentos.** El método de dosificación de Marshall es el más utilizado para la obtención de fórmulas de trabajo de mezclas asfálticas elaboradas en caliente, las cuales deben cumplir con requisitos basados en fluencia, estabilidad, densidad y porcentaje de vacíos. La metodología consiste en utilizar el equipo Marshall para la realización de ensayos de estabilidad y fluencia de estas mezclas, que a una temperatura de 60 °C deben ser sometidas a esfuerzos de compresión diametral permite determinar la estabilidad (UMSS, 2012).

Según la Universidad Mayor de San Simón (2012), la estabilidad es la resistencia estructural de la mezcla asfáltica compactada, la cual se ve afectada por el contenido de ligante, el tipo y composición del agregado utilizado, por esta razón se considera a la estabilidad como un índice de calidad de los materiales pétreos. Otra característica que deben tener las mezclas es la fluidez debido a que en el proceso de compactación es más fácil que llegue a la densidad establecida sin afectar la textura de la capa de rodadura.

Uno de los criterios que se deben ajustar al proyecto es el nivel de tráfico que está establecido de acuerdo a la tabla 7.

**Tabla 7**

*Nivel de Tráfico*

Nivel de Tráfico		
Tráfico Liviano	Tráfico Mediano	Tráfico Pesado
ESALs > 10 <sup>4</sup>	ESALs de 10 <sup>4</sup> a 10 <sup>6</sup>	ESALs > 10 <sup>6</sup>

Fuente: (UMSS, 2012)

**Método Cántabro.** En el diseño de mezclas abiertas o drenantes a diferencia del diseño de las mezclas asfálticas tradicionales, no se basa en la Método de Marshall, sino en el Método del Cántabro que fue desarrollado por la Universidad de Cataluña. Consiste en determinar la pérdida por desgaste del material permitiendo conocer las propiedades mecánicas del mismo y la resistencia a la carga de tráfico. (Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016; Castro, 2011).

En la actualidad aún no existe un método propio de la caracterización de materiales que se utilizan para las mezclas asfálticas abiertas, pero según en las especificaciones MOP, se menciona que este tipo de mezclas deben cumplir con todas las especificaciones establecidas para las mezclas asfálticas densas (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002). Las cuales se indica en la tabla 8.

Tabla 8

*Requisitos MOP para mezclas asfálticas*

Tipo de Tráfico	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>No. De Golpes/Cara</b>	75		75		50		50	
<b>Estabilidad (libras)</b>	2200	-	1800	-	1200	-	1000	-
<b>Flujo (pulgada/100)</b>	8	14	8	14	8	16	8	16
<b>% de vacíos en mezcla</b>								
<b>-Capa de rodadura</b>	3	5	3	5	3	5	3	5
<b>-Capa Intermedia</b>	3	8	3	8	3	8	3	8
<b>-Capa de base</b>	3	9	3	9	3	9	3	9
<b>% Vacíos agregados</b>								
<b>Relación filler/betún</b>	0.8	1.2	0.8	1.2				
<b>-Capa de rodadura</b>	70	-	70	-				
<b>-Intermedia o base</b>	60	-	60	-				

Fuente: (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

### **Metodología SUPERPAVE**

En 1987 y durante el año 1993, se realizó un programa llamado SHRP lo que significa Strategic Highway Research Program, el cual estuvo encargado de la investigación de carreteras y se consigue como resultado un método para la especificación de materiales asfálticos conocido ahora como la Metodología SUPERPAVE, lo que quiere decir Superior Performing Asphalt Pavements) (BITUMIX CVV, 2005).

El sistema SUPERPAVE según Silva Friderichsen (2015) cuenta con una nueva especificación por Grado de Desempeño para asfaltos, que tiene como objetivo conocer las propiedades físicas de los ligantes de acuerdo a las temperaturas y a los efectos del envejecimiento a los que están expuestos los pavimentos que por lo general están relaciones a 3 tipo de fallas:

- Agrietamiento por fatiga
- Agrietamiento térmico
- Ahuellamiento

### ***Selección por grado de desempeño***

Según BITUMIX CVV (2005) se selecciona un cemento asfáltico por su grado de desempeño y debe ser considerado de acuerdo a la zona en estudio, la región geográfica y las temperaturas del aire a las cuales estará expuesto el pavimento.

La nueva nomenclatura que permite definir el grado de comportamiento de los asfaltos es **PG XX-YY**, donde

- PG = Performance Grade
- XX = Temperatura Máxima (temperatura máxima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante el servicio)
- YY = Temperatura Mínima (temperatura mínima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante el servicio)

La finalidad de realizar este diseño, es generar mapas de zonificación de cada país donde se logre identificar el grado de desempeño (PG) necesario para cumplir con las especificaciones de las temperaturas máximas, mínimas y las cargas de tránsito que influyen en el pavimento (Miranda Calderón, 2015).

### ***Especificaciones SUPERPAVE para la clasificación de ligantes asfálticos***

Las especificaciones se pueden visualizar en la Tabla 5 que se encuentra en la sección de clasificación de cementos asfáltico y es la adaptación de la Norma ASTM D6376.

## **Sistema electrónico de obtención de datos**

### ***Redes de sensores***

Es un sistema de comunicación compuesto de varios dispositivos en este caso sensores, que son diseñadas con la finalidad de adquirir datos de forma eficiente y se encuentra en un campo específico. Este tipo de red permite el monitoreo constante de parámetros como temperatura, humedad, sonido, presión, entre otros y son implementadas por su costo relativamente bajo, por el fácil manejo, la rápida instalación de estos equipos y porque garantiza una conexión segura en toda la red evitando inconvenientes con la pérdida de información (Abril Olaya & Sánchez Quintero, 2017).

### ***Sensor de temperatura***

**Sensor DS18B20.** Este sensor digital puede tomar valores de temperatura dentro del rango de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$  y es apto para medir en zonas húmedas o incluso dentro del agua, debido a su propiedad impermeable. El sensor a lo igual que otros dispositivos puede generar errores ya sea por el ruido o factores externos en el medio donde fueron instalados, este error va a depender del rango en el que se estén midiendo las temperaturas, entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $85^{\circ}\text{C}$  puede generar un error de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , o si encuentra dentro del rango de  $-55^{\circ}\text{C}$  y  $125^{\circ}\text{C}$  puede generar  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  (Del Valle, 2018).

De acuerdo a las especificaciones técnicas del sensor según Maxim Integrated (2019), el elemento tiene varias aplicaciones como los mencionados a continuación:

- Controles termostáticos
- Sistemas industriales
- Productos de consumo

- Termómetros
- Sistemas térmicos sensibles

### Figura 28

*Sensor de temperatura DS18B20*



Fuente: (Del Valle, 2018)

### ***Sensor de Humedad***

**Sensor SHT10.** Este sensor nos permite medir la humedad relativa y la temperatura de en cualquier tipo de ambiente, los cuales requieren de un sensor capacitivo y un sensor de banda respectivamente para lograr las 2 funciones. La tecnología que utiliza el sensor garantiza una fiabilidad y estabilidad excelente a largo plazo, además ambos sensores están acoplados a un convertidor analógico digital de 14 bits y un circuito de interfaz en serie. Esto da como resultado una calidad de señal superior, un tiempo de respuesta rápido e insensibilidad a las perturbaciones externas (EMC) (Sensiron the Sensor Company, 2010).

**Figura 29**

*Sensor de temperatura y humedad SHT10*



Fuente: (Bricogeek, 2016)

**Sensor Capacitivo de Humedad de Suelo v1.2.** Este sensor tiene la capacidad de medir el nivel de humedad del suelo mediante detección capacitiva. Está elaborado con materiales resistentes a la corrosión lo que mejora sus características de durabilidad y brinda mayor confiabilidad en los datos proporcionados por este dispositivo (Max Electrónica, s. f.).

**Figura 30**

*Sensor Capacitivo de Humedad de Suelo v1.2*



## Metodología

La investigación consiste en el estudio teórico con la adquisición de información puntual y necesaria en las diferentes etapas del proyecto utilizando el método deductivo, perteneciente a la categoría cualitativa, con una metodología documental y técnica basada en el análisis de artículos científicos, libros, manuales y normativas nacionales e internacionales.

Por lo que se inicia con la elaboración de mezclas asfálticas en caliente tanto abiertas como cerradas utilizando el método Marshall basado en las normas ASTM D-1559 y AASHTO T-225, también se considera el método Cántabro basado en la norma INV E 760 (2007) en los cuales se aplica un procedimiento específico para la obtención de la densidad Bulk y el porcentaje de vacíos para cada tipo de muestras asfálticas, mediante el cálculo y análisis de los diferentes pesos y volúmenes, la técnica a utilizar es el control de calidad basado en las normas, especificaciones de materiales, especificaciones de servicios, instrucciones de ensayo y métodos de ensayo para el diseño de mezclas asfálticas.

Para el siguiente paso de esta investigación se considera el modelamiento y análisis computacional aplicando el método sintético de categoría cuantitativa, con metodología evaluativa, basándose en un sistema de control, que nos proporciona datos físicos, exactos y puntuales para determinar los diferentes espectros de temperatura y condiciones de humedad de cada una de las briquetas. Posteriormente, de acuerdo a la recopilación de toda la información se realiza un análisis y comparación de resultados, utilizando el método comparativo de la categoría cuantitativa y metodología analítica con el fin de establecer una recomendación de cuál es la mezcla asfáltica idónea para las condiciones ambientales en el lugar donde se realizaron las mediciones.

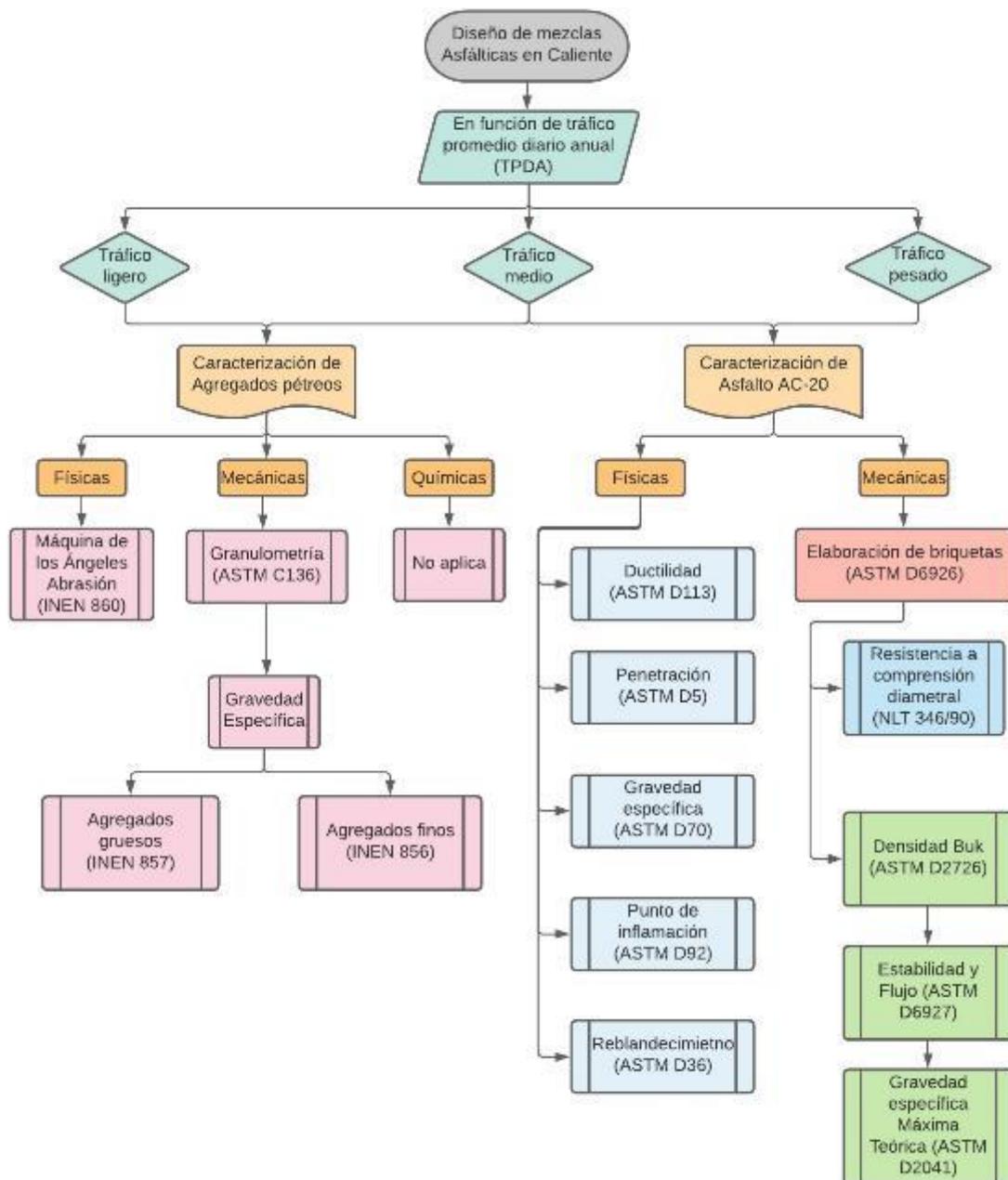
### **Diseño de mezcla asfáltica en caliente**

En el diseño de mezclas asfálticas se requiere del desarrollo de varios ensayos, en los cuales se pueden determinar las características y desempeño del material requerido. La información obtenida a través de la caracterización será la base del diseño de las mezclas debido a que permite la evaluación de su desempeño una vez que se hayan elaborado. La caracterización de los áridos y asfaltos utilizados para la elaboración de las mezclas, se basan en normativas que se encuentran vigentes en el país, tales como: INEN, ASTM, MTOP, AASHTO. La Figura 31 muestra los ensayos requeridos para los materiales y el control ante el cumplimiento de ciertas especificaciones establecidas (Nacevilla Toaquiza, 2018).

El procedimiento para la preparación de mezclas asfálticas densas es similar al diseño de mezclas abiertas, una de las diferencias es el índice de vacíos que requiere la mezcla asfáltica abierta debido a que permite disminuir la presencia de agua mejorando la adherencia entre los neumáticos y el pavimento. Para ello, se deben utilizar los mismos materiales que cumplan con las mismas especificaciones. En este caso, tanto los agregados como el asfalto deben ser caracterizados de la misma manera (Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016).

Figura 31

Ensayos para el diseño de una mezcla asfáltica



Fuente: (Nacevilla Toaquiza, 2018)

### ***Obtención del material pétreo***

Para la elaboración de las mezclas asfálticas abiertas se hizo uso del material que proviene de la mina San Ramón que está ubicada en la provincia de Cotopaxi, dicho material es extraído con la técnica de excavación a cielo abierto y el resto se lo obtiene mediante un proceso de trituración. En el diseño de las mezclas cerradas se utiliza los materiales de la mina de El Colibrí, que de manera similar utiliza la misma tecnología para su extracción.

Hay que considerar que el análisis de temperatura y humedad con sensores, se lo realizó en mezclas asfálticas cerradas elaboradas que son aplicadas en la localidad, lo que nos quiere decir que se obtendrá información sobre mezclas reales y las mezclas asfálticas abiertas se las elaboró con estudios científicos publicados previamente, debido a las restricciones generadas por el acontecimiento mundial dado en 2020. En la tabla 9 se puede observar una descripción breve sobre las minas que han sido consideradas en la elaboración de las mezclas.

**Tabla 9**

*Materiales utilizados en la elaboración de las mezclas*

<b>Materiales Pétreos para las Mezclas Asfálticas</b>		
<b>Mina</b>	El Colibrí	San Ramón
<b>Cantón</b>	Rumiñahui	Latacunga
<b>Provincia</b>	Pichincha	Cotopaxi
<b>Parroquia</b>	Sangolquí	Mulaló
<b>Tipo</b>	Macizo rocoso, magmáticas	Macizo rocoso, sedimentario
<b>Coordenadas</b>	N 788700	N 771088
	E 9960200	E 9916753

Fuente: (Burbano Del Castillo & Salazar Salazar, 2019; Garzón Carvajal & Cárdenas Díaz, 2013)

### ***Especificaciones técnicas para agregados en mezclas abiertas y cerradas***

Para conocer si el agregado tiene las características necesarias y poder ser utilizado en una mezcla asfáltica, esta debe cumplir con ciertas especificaciones ya establecidas las cuales se mencionan en la tabla 10, en caso de que no cumplir con los requerimientos se descarta las muestras de mezclas asfálticas utilizadas en la medición de datos.

**Tabla 10**

#### *Especificaciones para agregados pétreos*

<b>ENSAYO</b>	<b>ESPECIFICACIÓN</b>	<b>NORMA</b>
<b>Granulometría</b>	-	INEN 872
<b>Equivalente de arena</b>	>40%	ASTM D 2419
<b>Ensayo de Abrasión (Máquina de los Ángeles)</b>	40%	INEN 861 ASTM C 131
<b>Materiales deletéreos</b>	< 1%	INEN 698 ASTM C 142
<b>Peso específico</b>	-	INEN 856 / INEN 857 ASTM C 127/ ASTM C 128

Fuente: MOP-001-F 2002 (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

#### ***Caracterización de los Agregados***

Para obtener una mezcla asfáltica con buenas propiedades físicas y mecánicas, es necesario conocer las propiedades de los materiales utilizados en la mezcla, por lo que se debe realizar los ensayos a que continuación se detallan según la MOP-001F-2002 el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (2002):

- Ensayo de granulometría
- Ensayo de equivalente de arena
- Ensayo de Abrasión (desgaste en máquina de los Ángeles)
- Ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso y fino

- Ensayo de determinación del contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables.

**Granulometría según Norma ASTM C 136.** El ensayo de granulometría de acuerdo a la norma ASTM C 136 (2005), es un método que permite clasificar o distribuir a las partículas de acuerdo a sus tamaños y grados mediante el tamizado del material. Esto con el fin de que los datos proporcionados ayuden al desarrollo y al control de producción de las mezclas asfálticas. Para la ejecución del ensayo se requiere de ciertos materiales y equipos que se mencionan en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Materiales y Equipos para el desarrollo del ensayo de Granulometría*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Balanzas</b>	Precisión de 0.1 gr
<b>Tamices</b>	Malla cuadrada
<b>Agitador (Tamizador)</b>	Eléctrico
<b>Horno</b>	Temperatura uniforme 110°C±5°C (230°F ±9°F)
<b>Bandejas y taras</b>	-

Fuente: (ASTM C 136, 2005)

### **Procedimiento**

De acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C 136 (2005), se procede de la siguiente manera:

- Se toma una cantidad establecida de muestra seca de agregado grueso, de acuerdo a la tabla 12 que ha sido especificada en la norma.

**Tabla 12***Cantidad de la muestra requerida para el ensayo*

Tamaño nominal máximo aberturas cuadradas		Masa mínima de la muestra de Ensayo	
mm	pulg	kg	Lb
9.5	3/8	1	2
12.5	1/2	2	4
19.0	3/4	5	11
25.0	1	10	22
37.5	1 1/2	15	33
50.0	2	20	44
63.0	2 1/2	35	77
75.0	3	60	130
90.0	3 1/2	100	220
100	4	150	330
125	5	300	660

Fuente: (ASTM C 136, 2005)

- En el caso del agregado fino la muestra debe de ser secada y la cantidad de la muestra no debe ser inferior a 300 gramos.
- Se eligen los tamices adecuados para la colocación de las muestras de cada material.
- Establecer la cantidad de muestra de acuerdo al tamaño de los agregados.
- Se procede a tamizar el material por un tiempo de 2 minutos hasta que la cantidad de material que pase entre tamices sea menor al 1%.
- Posteriormente, se pesa las cantidades retenidas en cada tamiz para conseguir los datos y elaborar la curva granulométrica de diseño.

Tabla 13

*Resultados del ensayo de granulometría del agregado utilizado en la mezcla asfáltica abierta*

<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>				
<b>TAMICES</b>		<b>GRAVA</b>		<b>FINOS</b>
<b>Pulgadas</b>	<b>Milímetros</b>	<b>3/4"</b>	<b>3/8"</b>	<b>Arena</b>
<b>3"</b>	76.10	100.00	100.00	100.00
<b>2"</b>	51.80	100.00	100.00	100.00
<b>1 1/2"</b>	38.10	100.00	100.00	100.00
<b>1"</b>	25.40	100.00	100.00	100.00
<b>3/4"</b>	19.00	99.17	100.00	100.00
<b>1/2"</b>	12.50	8.06	100.00	100.00
<b>3/8"</b>	9.51	1.16	78.87	100.00
<b>No. 4</b>	4.76	0.74	8.21	99.74
<b>No. 8</b>	2.36	0.58	4.11	87.78
<b>No. 10</b>	2.00	0.00	4.04	83.62
<b>No. 30</b>	0.43	0.00	3.85	54.57
<b>No. 50</b>	0.30	0.00	3.73	37.63
<b>No. 200</b>	0.08	0.00	3.16	13.02
<b>&lt; No. 200</b>	0.01	0.00	0.17	0.42

Tabla 14

*Resultados del ensayo de granulometría del agregado utilizado en la mezcla asfáltica cerrada*

<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>								
<b>TAMICES</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Comb.</b>	<b>Especificación</b>	
<b>Plg</b>	<b>mm</b>						<b>Mín</b>	<b>Máx</b>
<b>3/4"</b>	19.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100	100	100
<b>1/2"</b>	12.50	80.00	100.00	100.00	100.00	96	90	100
<b>3/8"</b>	9.51	23.00	72.60	100.00	100.00	79.4	67	87
<b>No. 4</b>	4.76	2.00	4.78	96.00	100.00	59.9	44	74
<b>No. 8</b>	2.36	1.00	2.34	69.00	100.00	42.7	28	58
<b>No. 50</b>	0.30	0.00	0.00	27.00	100.00	16.5	5	21
<b>No. 200</b>	0.08	0.00	0.00	11.00	100.00	6.71	2	10

**Equivalente de arena según ASTM D 2419.** Según la norma ASTM D 2419 (2002), el ensayo de equivalente de arena permite obtener la proporción relativa de la cantidad de material arcilloso que se encuentra presente en la muestra de agregados, lo más recomendable es realizar al menos dos veces el ensayo para determinar un valor promedio de los resultados obtenidos. En la tabla 15 se especifica los equipos y el material requerido para la ejecución del ensayo.

**Tabla 15**

*Materiales y Equipos para el desarrollo del ensayo de Equivalente de arena*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Tres probetas cilíndricas graduadas</b>	Plástico Diámetro interior 30±1 mm Alto 400 mm
<b>Tapón macizo</b>	Caucho o goma
<b>Tubo irrigador</b>	Acero inoxidable, cobre o bronce Diámetro exterior 6.35 mm Espesor 0.89 mm Longitud 510 mm
<b>Tubo flexible</b>	Plástico o caucho Diámetro 4.37 mm Largo 1.20 m
<b>Recipiente</b>	Metálico Diámetro 57 mm Capacidad 85±5 ml
<b>Embudo de boca ancho</b>	Diámetro 100 mm
<b>Agua</b>	-
<b>Cronómetro</b>	-
<b>Reactivo (Cloruro de Calcio)</b>	454 gr.

Fuente: (ASTM D 2419, 2002)

### **Procedimiento**

Para el desarrollo del ensayo se debe seguir los pasos de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D 2419 (2002):

- Se procede a seleccionar una cantidad aproximada de muestra de 2000 gr que pasen del tamiz No. 4 (4.75mm).
- Colocar en las probetas la mezcla de agua con el reactivo hasta una altura de 101.6 mm.
- Con el recipiente metálico (50 g), tomar la muestra y enrasar.
- Verter la muestra en la probeta con la ayuda del embudo.
- Para liberar de aire a la muestra, se debe golpear la probeta en la parte inferior y dejar en reposo durante  $10 \pm 1$  minuto.
- Pasado el tiempo descrito en el punto anterior, enseguida se coloca el tapón de caucho en la probeta.
- Inclinar y sacudir la probeta para soltar la arena del fondo y una vez realizado este proceso se debe agitar (100 ciclos en 60 segundos) manualmente la probeta en posición horizontal con un desplazamiento de  $230 \pm 25$  mm.
- Se realiza el procedimiento de irrigación, el cual consiste en insertar el tubo irrigador dentro de la probeta y se lava las paredes de la misma para que las partículas adheridas se desprendan a la parte inferior mediante la acción de presión y giro, provocando la decantación del material. Este proceso induce a que el material grueso se mantenga en la parte inferior y el material fino quede en la parte superior.
- Se continúa con el mismo proceso anterior hasta que la probeta se encuentre lleno a una altura de 15" (38 mm), una vez realizado esto se levanta el tubo irrigador sin que deje de fluir la solución de tal manera que el líquido se mantenga al mismo nivel.

- Dejar en reposo la probeta por 20 minutos  $\pm$  15 segundos, inmediatamente después de la irrigación.
- Una vez finalizado el tiempo, se toma la lectura de arcilla que es la medida de la parte superior de la suspensión de arcilla.
- Por último, introducir el conjunto de la barra con el disco y el sobrepeso dentro de la probeta, bajándola de manera suave hasta llegar sobre la arena, una vez haya tocado la arena se toma la lectura de arena.

### Ecuaciones

$$C = A - B \quad (1)$$

$$D = \left(\frac{C}{A}\right) * 100 \quad (2)$$

Donde

- A: Lectura de la arena (plg)
- B: Lectura de Arcilla (plg)
- C: Nivel de arcilla (plg)
- D: Equivalente de arena (%)

**Tabla 16**

*Resultados del ensayo de equivalente de arena para la mezcla asfáltica abierta*

EQUIVALENTE DE ARENA				
<b>Lectura de arena (plg)</b>	A	12.40	12.70	12.80
<b>Lectura de arcilla (plg)</b>	B	3.20	3.50	3.56
<b>Nivel de arcilla (plg)</b>	C=A-B	9.20	9.20	9.24
<b>Equivalente de arena</b>	D=100* C/A	74.00	72.00	72.00
<b>Promedio</b>			73.00	

**Tabla 17**

*Resultados del ensayo de equivalente de arena para la mezcla asfáltica cerrada*

<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>				
<b>Lectura de arena (plg)</b>	A	12.80	11.00	11.10
<b>Lectura de arcilla (plg)</b>	B	3.50	3.40	3.40
<b>Nivel de arcilla (plg)</b>	C=A-B	9.30	7.60	7.70
<b>Equivalente de arena</b>	D=100* C/A	73.00	69.00	69.00
<b>Promedio</b>			71.00	

**Abrasión (Desgaste en máquina de los Ángeles) según INEN 860.** Según la norma NTE INEN 860 (2011), el ensayo permite determinar el desgaste del agregado grueso de tamaño inferior a 37.5 mm, este proceso se lo realiza mediante la pérdida de masa con el uso de esferas de acero y una máquina de los ángeles. Para el desarrollo de una mezcla asfáltica abierta, el agregado grueso debe cumplir con las especificaciones establecidas ya que representa la capacidad de resistencia al desgaste y es lo establece la vida útil del pavimento que se diseñe con este tipo de mezcla. Los materiales y equipos necesarios están detallados en la tabla 18.

**Tabla 18**

*Materiales y Equipos para el desarrollo del ensayo de Desgaste en máquina de los Ángeles*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Agregado grueso</b>	3 / 4 " y 3 / 8 "
<b>Balanza</b>	Precisión de $\pm 0.1$ gr
<b>Horno</b>	Temperatura constante de 110+5°C
<b>Máquina de los Ángeles</b>	-
<b>Esferas de acero</b>	Diámetro de 46.38 mm y peso 390 gr
<b>Bandejas</b>	-
<b>Tamiz N°12</b>	Cumple con requisito INEN 154

Fuente: INEN 860 (NTE INEN 860, 2011)

## Procedimiento

Para el elaboración del ensayo se debe tomar en cuenta el procedimiento según la norma NTE INEN 860 (2011), como se muestra a continuación:

- Lavar el material y secarlo al horno a una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C.
- Dividir en fracciones hasta obtener la gradación indicada en la tabla 14 según los tamaños máximos nominales de los agregados de 3/4" y 3/8".

**Tabla 19**

*Gradación de las muestras de ensayo, para la resistencia a la abrasión*

Abertura de tamices (mm)		Masa (g)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37.5	25.0	1250 ± 25			
25.0	19.0	1250 ± 25			
19.0	12.5	1250 ± 10	2500 ± 10		
12.5	9.5	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5	6.3			2500 ± 10	
6.3	4.75			2500 ± 10	
4.75	2.36				5000 ± 10
	Total	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: INEN 860 (NTE INEN 860, 2011)

- Tomar el dato del peso de la muestra, antes de ser colocado en la máquina de los Ángeles.
- Colocar la muestra del material junto con las bolas de acero en la Máquina de los Ángeles de acuerdo a la tabla 20.

**Tabla 20***Número de esferas para carga de abrasión*

<b>Gradación</b>	<b>N° de esferas</b>	<b>Masa de carga (g)</b>
<b>A</b>	12	5 000 ± 25
<b>B</b>	<b>11</b>	<b>4 584 ± 25</b>
<b>C</b>	8	3 330 ± 20
<b>D</b>	6	2 500 ± 15

Fuente: INEN 860 (NTE INEN 860, 2011)

- Encender la máquina de tal manera que gire el cilindro a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/min hasta completar 500 vueltas.
- Una vez terminado, se procede a la descarga del material y se separa la muestra con la ayuda del tamiz No.12, el material retenido en este tamiz se lava y se seca al horno hasta que el peso de este material sea constante para poder registrar el valor obtenido.

**Ecuaciones**

$$C = A - B \quad (3)$$

$$D = \left(\frac{C}{A}\right) * 100 \quad (4)$$

Donde

- A: Peso del material antes del ensayo (g)
- B: Peso del material no desgastado después del ensayo (g)
- C: Pérdida por desgaste del material (g)
- D: Desgaste del material (%)

**Tabla 21**

*Resultados del ensayo de abrasión de agregados para la mezcla asfáltica abierta*

<b>Desgaste del agregado grueso</b>		
<b>Peso del material antes del ensayo (g)</b>	A	5000.00
<b>Peso del material no desgastado después del ensayo (g)</b>	B	3440.40
<b>Pérdida por desgaste del material (g)</b>	C = A-B	1559.60
<b>Desgaste del material (%)</b>	D = (C/A) *100	31.00

**Tabla 22**

*Resultados del ensayo de abrasión de agregados para la mezcla asfáltica cerrada*

<b>Desgaste del agregado grueso</b>		
<b>Peso del material antes del ensayo (g)</b>	A	5000.30
<b>Peso del material no desgastado después del ensayo (g)</b>	B	3721.00
<b>Pérdida por desgaste del material (g)</b>	C = A-B	1279.30
<b>Desgaste del material (%)</b>	D = (C/A) *100	26.00

**Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso según INEN 857.** Este ensayo permite determinar la densidad de agregado grueso de tamaño igual o mayor a 4.75 mm, la gravedad específica y la absorción de este material pétreo. El material y equipo necesario para la realización del ensayo se puede ver en la tabla 23 y en la tabla 24 indica la cantidad de la muestra mínima para el ensayo (NTE INEN 857, 2010).

Tabla 23

*Materiales y equipos para el desarrollo del ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Agregado grueso de</b>	3/4" y 3/8 "
<b>Balanza</b>	Precisión de $\pm 0.1$ gr.
<b>Horno</b>	Temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$
<b>Tamiz</b>	N°4 /INEN 154
<b>Dispositivo de suspensión</b>	-
<b>Bandejas</b>	Metálica
<b>Canastilla</b>	Metálica Abertura 4.75 mm
<b>Tanque de inmersión</b>	Apreciación de $\pm 0.1$ gr.

Fuente: INEN 857 (NTE INEN 857, 2010)

Tabla 24

*Cantidad de muestra mínima para el ensayo*

<b>Tamaño Máximo Nominal</b>		<b>Cantidad mínima de muestra</b>
<b>(mm)</b>	<b>(pulg.)</b>	<b>(Kg)</b>
<b>12.5 o menos</b>	1/2	2
<b>19.0</b>	3/4	3
<b>25.0</b>	1	4
<b>37.5</b>	1 1/2	5
<b>50.0</b>	2	8
<b>63.0</b>	2 1/2	12
<b>75.0</b>	3	18
<b>90.0</b>	3 1/2	25

Fuente: INEN 857 (NTE INEN 857, 2010)

## Procedimiento

De acuerdo a la norma NTE INEN 857 (2010), se procede de la siguiente manera:

- Tomar la muestra mínima de acuerdo a la tabla 17, en este caso una cantidad mayor a 2 kg del agregado grueso.
- Pasar por el tamiz No. 4 para poder separar todo el agregado fino que pueda contener el material.
- Lavar la muestra y secar al horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C hasta obtener una masa constante de la misma, una vez sacado del horno dejar enfriar aproximadamente 1-3 horas.
- Sumergir la muestra en agua que se encuentre a temperatura ambiente, esto debe permanecer dentro del agua durante aproximadamente  $24 \pm 4$  horas.
- Transcurrido el tiempo de acuerdo al punto anterior, se procede a escurrir el agua de la muestra y con la ayuda de un paño absorbente secarlo de manera superficial.
- Pesar la muestra utilizada en el ensayo en estado saturada superficialmente seca (SSS).
- En el desarrollo de este ensayo se consideró dos muestras de agregado, con tamaños de  $3/4$  " y  $3/8$  ", una vez tomado el peso de la muestra en estado saturada superficialmente seca, en la canastilla metálica colocar la muestra por 15 min y luego tomar el dato del peso sumergido en agua que se encuentra a una temperatura de  $25 \pm 1$  °C (ambiente) en el tanque de inmersión.

**Ecuaciones**

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \left( \frac{A}{B-C} \right) \quad (5)$$

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \left( \frac{B}{B-C} \right) \quad (6)$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \left( \frac{A}{A-C} \right) \quad (7)$$

$$\text{Absorción del agua \%} = \left( \frac{B-A}{A} \right) * 100 \quad (8)$$

Donde:

- A= Peso de la muestra seca al horno (g)
- B= Peso de la muestra superficialmente seca (g)
- C= Peso de la muestra sumergida (g)

**Tabla 25**

*Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de agregados para la mezcla asfáltica abierta*

<b>Gravedad específica y absorción del agregado grueso</b>		
<b>Peso de la muestra secada al horno (g)</b>	A	2073.00
<b>Peso de la muestra superficialmente seca (g)</b>	B	2146.10
<b>Peso de la muestra sumergida (g)</b>	C	1307.00
<b>Gravedad específica BULK</b>	SH	2.47
<b>Gravedad específica saturada</b>	SSS	2.56
<b>Gravedad específica aparente</b>	SA	2.71
<b>Absorción (%)</b>		3.53

**Tabla 26**

*Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de agregados para la mezcla asfáltica cerrada*

<b>Gravedad específica y absorción del agregado grueso</b>		
<b>Peso de la muestra secada al horno (g)</b>	A	4878.00
<b>Peso de la muestra superficialmente seca (g)</b>	B	5000.00
<b>Peso de la muestra sumergida (g)</b>	C	3077.00
<b>Gravedad específica BULK</b>	SH	2.54
<b>Gravedad específica saturada</b>	SSS	2.60
<b>Gravedad específica aparente</b>	SA	2.71
<b>Absorción (%)</b>		2.50

**Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino según INEN 856.** De acuerdo a la norma NTE INEN 856 (2010), el desarrollo de este ensayo permite conocer la densidad promedio, la gravedad específica y la absorción de los agregados finos. Los resultados del ensayo de absorción determinan los cambios en la masa del agregado por la cantidad de agua absorbida por los poros de las partículas del árido. En la tabla 27, se menciona los materiales y el equipo necesario para el desarrollo de este ensayo.

**Tabla 27**

*Materiales y equipos para el desarrollo del ensayo de Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Horno con</b>	Temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$
<b>Balanza con</b>	Precisión de $\pm 0.1 \text{ gr.}$
<b>Picnómetro o matraz aforado</b>	-
<b>Tamiz</b>	N°4
<b>Embudo</b>	Plástico
<b>Bandeja</b>	Metálico
<b>Recipientes</b>	Metálico

Fuente: INEN 856 (NTE INEN 856, 2010)

## Procedimiento

Según la norma NTE INEN 856 (2010), para el procedimiento del ensayo se considera los siguientes pasos:

- Se toma una cantidad de muestra (agregado fino pasante del tamiz No. 4) de aproximadamente de 1,2 kg.
- Se lava el 50 % de la muestra ( $500 \pm 10$  gr) y se deja secar al horno a una temperatura constante de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta conseguir un peso constante.
- Dejar enfriar la muestra para luego ser sumergida en agua a temperatura ambiente durante un periodo de  $24 \pm 4$  horas.
- Transcurrido el tiempo se escurre el agua de manera cuidadosa para evitar la pérdida del material del árido fino.
- Colocar en la bandeja la muestra y se deja secar al ambiente, es recomendable ubicarlo en un sitio donde llegue el sol para controlar el secado uniforme de la muestra.
- Determinar la densidad del agregado, para el cual se utiliza el método gravimétrico que consiste en introducir el material ( $500 \pm 10$  gr) dentro del picnómetro y agregar agua hasta aproximadamente un 90% de su capacidad.
- Para eliminar las burbujas de aire se coloca una bomba de vacíos dentro del picnómetro por unos 10 minutos.
- Por último, se procede a sacar con cuidado todo el material del picnómetro evitando perder la muestra para luego ser secado en el horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta obtener una masa constante y se toma el valor obtenido.

### Ecuaciones

$$\text{Densidad relativa seca al horno (SH)} = \left( \frac{A}{B+S-C} \right) \quad (9)$$

$$\text{Densidad relativa en condición saturada superficialmente seca (SSS)} = \left( \frac{S}{B+S-C} \right) \quad (10)$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \left( \frac{A}{B+A-C} \right) \quad (11)$$

$$\text{Absorción (\%)} = \left( \frac{S-A}{A} \right) * 100 \quad (12)$$

Donde:

- A: Masa de la muestra seca al horno (g)
- B: Masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración (g)
- C: Masa del picnómetro lleno con muestra y agua, hasta la marca de calibración (g).
- S: Masa de la muestra saturada superficialmente seca (g)

### Tabla 28

*Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de agregados para la mezcla asfáltica abierta*

<b>Gravedad específica y absorción del agregado fino</b>		
<b>Masa de la muestra seca al horno (g)</b>	A	478.80
<b>Masa del picnómetro con agua (g)</b>	B	1218.00
<b>Masa del picnómetro con muestra y agua</b>	C	1516.70
<b>Masa de la muestra saturada superficialmente seca (g)</b>	S	500.30
<b>Gravedad específica bulk</b>	SH	2.38
<b>Gravedad específica saturada</b>	SSS	2.48
<b>Gravedad específica aparente</b>	SA	2.66
<b>Absorción (%)</b>		4.49

**Tabla 29**

*Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción de agregados para la mezcla asfáltica cerrada*

<b>Gravedad específica y absorción del agregado fino</b>		
<b>Masa de la muestra seca al horno (g)</b>	A	980.20
<b>Masa del picnómetro con agua (g)</b>	B	1255.80
<b>Masa del picnómetro con muestra y agua</b>	C	1880.10
<b>Masa de la muestra saturada superficialmente seca (g)</b>	S	1000.00
<b>Gravedad específica bulk</b>	SH	2.61
<b>Gravedad específica saturada</b>	SSS	2.66
<b>Gravedad específica aparente</b>	SA	2.75
<b>Absorción (%)</b>		2.02

#### **Determinación del contenido de terrenos de arcilla y partículas desmenuzables según**

**INEN 698.** Este ensayo establece la técnica para obtener el contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables del agregado grueso (NTE INEN 698, 2010). Para el desarrollo del ensayo se requiere los equipos y el material que se muestran en la tabla 30.

**Tabla 30**

*Materiales y equipos para el ensayo de determinación del contenido de terrenos de arcilla y partículas desmenuzables*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Balanza</b>	Precisión de $\pm 0.1$ gr
<b>Tamices</b>	INEN 154
<b>Horno</b>	Temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$
<b>Agua destilada</b>	-
<b>Bandeja</b>	Metálica
<b>Recipientes</b>	Metálicos

Fuente: INEN 698 (NTE INEN 698, 2010)

**Tabla 31***Cantidad de muestra para el ensayo*

<b>Tamaño de las partículas que forman parte de la muestra de ensayo</b>	<b>Masa de la muestra de ensayo, mínimo (gr)</b>
<b>4.75 mm a 9.5 mm (No 4 a 3/8")</b>	1000
<b>9.5 mm a 19.0 mm (3/8" a 3/4")</b>	2000
<b>19.0 mm a 37.5 mm (3/4" a 1 1/2")</b>	3000
<b>Sobre 37.5 mm (1 1/2")</b>	5000

Fuente: INEN 698 (NTE INEN 698, 2010)

**Procedimiento**

Para cada paso que se debe realizar en el ensayo, tomar en cuenta lo establecido en la norma NTE INEN 698 (2010):

- Tomar la muestra de acuerdo a la tabla 20, en este caso se toma una muestra de 2000 gr.
- Separar las muestras de agregado grueso de acuerdo sus tamaños mediante el uso de los tamices: 37.5 mm (1 1/2"), 19 mm (3/4"), 9.5 mm (3/8") y 4.75 mm (No. 4).
- Extender la muestra en una bandeja de tal manera que el material quede uniforme y luego colocar el agua destilada hasta cubrir todo por  $24 \pm 4$  horas. Se procede a desprender los terrones de arcilla y las partículas desmenuzables del agregado, mediante el uso del dedo índice y pulgar sin uñas para poder apretar y rodar las partículas de manera que nos vean afectadas.
- Luego del desprendimiento del material del agregado, se continúa con la separación de los residuos de la muestra mediante el uso del tamiz No. 4 hasta

eliminar todo el material fino, esto se debe a que el tamaño del agregado de la muestra es de 3/8" a 3/4".

- El material retenido en el tamiz es retirado para luego ser secado en el horno a una temperatura de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta tener un peso constante.
- Finalmente, se deja enfriar el material y se procede a la determinación la masa de la muestra.

### Ecuaciones

$$P = \frac{M-R}{M} * 100 \quad (13)$$

Donde:

- P= Porcentaje de terrones arcilla y partículas desmenuzables (%)
- M= Masa de la muestra de ensayo (g)
- R= Masa de las partículas retenidas en el tamiz estipulado (g)

### Tabla 32

*Ensayo de contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables en agregados para la mezcla asfáltica abierta*

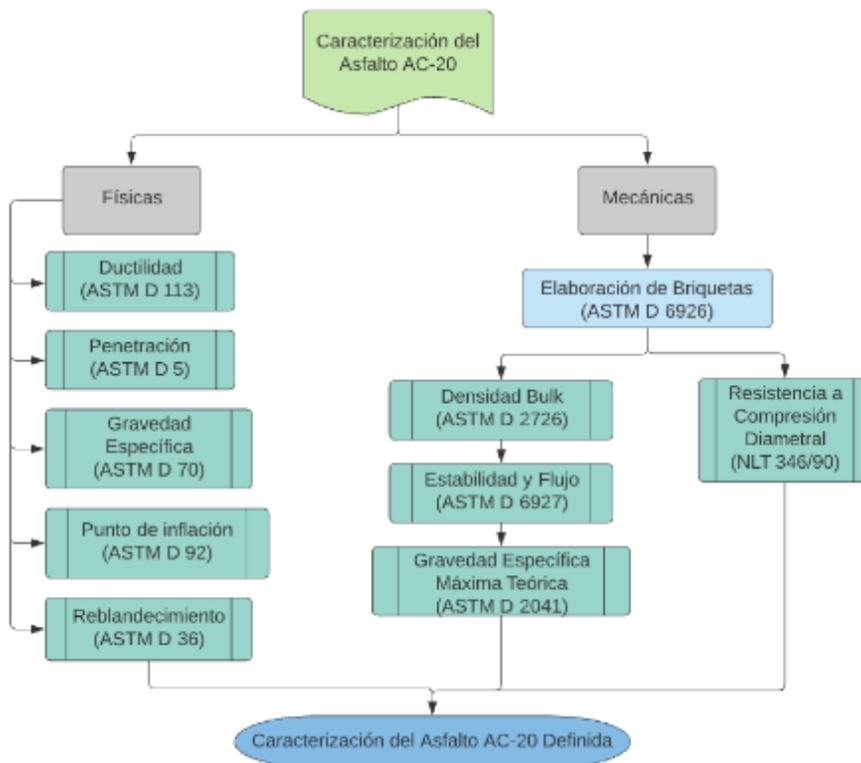
<b>Contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables</b>		
<b>Peso de la muestra de ensayo (g)</b>	M	2000.00
<b>Peso de las partículas retenidas en el tamiz estipulado (g)</b>	R	1989.80
<b>Porcentaje de terrones de arcilla y partículas desmenuzables (%)</b>	P	0.51

### Caracterización del Asfalto

Las especificaciones técnicas de los ligantes asfálticos son requisitos de calidad establecidos a través de procedimientos prescritos para evaluar el desempeño del mismo debido a que serán utilizados en las mezclas de acuerdo a las normas vigentes, los cuales son determinadas por el MTOP que es el Ministerio de Transporte y Obras Públicas. El MTOP determina los requisitos que deben cumplirse para el asfalto y los productos asfálticos en las obras de pavimentación. Se debe considerar que las especificaciones están enfocadas en el asfalto tipo AC-20 debido a que es el único ligante que se produce en el país. (Nacevilla Toaquiza, 2018)

**Figura 32**

*Ensayos requeridos para el asfalto*



Fuente: (Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016)

En la figura 32, se observa los ensayos requeridos para conocer las propiedades del material ligante. Los cuales son mencionados a continuación:

- Penetración a 25 °C.
- Punto de reblandecimiento
- Ductilidad
- Punto de inflamación
- Gravedad específica

El asfalto utilizado en el diseño de las mezclas cerradas y abiertas fue mejorado con el aditivo Kaoamin que permite aumentar la propiedad de adhesión entre el material pétreo y el material ligante. Para la mezcla de estos productos se debe tomar en cuenta la especificación técnica del fabricante con respecto al porcentaje que se requiere para su óptimo funcionamiento que varía entre 0.5% a 1% (Quimikao, 2017). El valor escogido es de 0.75% que se debe considerar de acuerdo a la cantidad de asfalto a utilizar en la mezcla.

**Penetración según INEN 917.** De acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 917 (2013), el desarrollo de este ensayo nos entrega como resultado la consistencia del material asfáltico que nos indicará que mientras más blando sea el material mayor es el valor de la penetración, este proceso se lo realiza mediante la introducción de una aguja bajo ciertas condiciones que se describirán en este punto. Los Materiales y equipos que se requieren para la elaboración de este método se detalla en la tabla 33.

Tabla 33

*Equipos y materiales para el ensayo de penetración*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Asfalto</b>	AC-20 con aditivo
<b>Horno</b>	-
<b>Penetrómetro para asfalto</b>	Precisión de 0,1 mm
<b>Contador eléctrico</b>	Precisión $\pm 0,1$ s
<b>Aguja de penetración, vástago y peso</b>	Acero inoxidable Grado 440-C / dureza 54 - 60 HRC Longitud 50 mm / Diámetro 1 – 1,02 mm
<b>Recipientes</b>	Metálicos cilíndricos y con fondo plano (Diámetro= 55mm, altura= 35mm)
<b>Termómetro</b>	Líquido en vidrio Error 0,1°C
<b>Máquina para baño maría</b>	-

Fuente: (NTE INEN 917, 2013)

### **Procedimiento**

El procedimiento del ensayo de penetración según NTE INEN 917 (2013), se debe realizar como indica a continuación:

- Colocar el asfalto en el horno, dejar calentar sin que exceda los 140°C para evitar cambios en sus propiedades.
- En los recipientes, verter el asfalto previamente calentado hasta una altura que evite desbordamiento para permitir posteriormente la penetración de la aguja, realizar este paso de manera cuidadosa para no crear burbujas de aire.
- Dejar enfriar a la muestra al ambiente hasta aproximadamente una hora y media.

- Previamente preparar el baño maría a una temperatura de 25°C, una vez haya transcurrido el tiempo de enfriamiento del asfalto, lo introducimos al baño maría controlando a que llegue a una temperatura de 25°C.
- Cuando la muestra haya llegado a la temperatura requerida, se procede a retirarlo del baño maría, tratando guardar la temperatura de manera constante.
- En el equipo se coloca la muestra de asfalto y se revisa la precisión y la carga de la aguja a utilizarse.
- Programar el contador para los 5 segundos requeridos.
- La aguja se acerca hasta la superficie sin introducirse a la muestra y se procede a encerrar el marcador para luego aplicar la carga.
- Se toma lectura lee del valor de distancia proporcionado en decimas de milímetros.
- Para cada recipiente con muestra, es recomendable realizar por lo menos 3 penetraciones en diferentes puntos con una separación de 10 mm.

**Tabla 34**

*Resultados del ensayo de penetración del asfalto*

<b>Ensayo de Penetración</b>			
<b>No. Lectura</b>	<b>Unidad</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>
1	1/10mm	73.0	61.0
2	1/10mm	70.0	70.0
3	1/10mm	61.0	54.0
4	1/10mm	55.0	56.0
5	1/10mm	51.0	50.0
6	1/10mm	54.0	55.0
7	1/10mm	58.0	51.0
8	1/10mm	52.0	50.0
<b>Promedio</b>		59.3	55.9
		57.6	

**Punto de reblandecimiento según INEN 920.** La obtención del punto de reblandecimiento en materiales bituminosos ayuda a la clasificación de los mismos e indica la capacidad de fluir que tienen los asfaltos a temperaturas muy altas. Por lo que el ensayo tiene como objeto conocer la susceptibilidad a partir de la temperatura de viscosidad bajo ciertas condiciones ya establecidas (Instituto Ecuatoriano de Normalización NTE INEN 920, 2013). Para la ejecución de este ensayo se necesita de quipo específico como se indica en la tabla 35.

**Tabla 35**

*Equipos y materiales para el ensayo de punto de ablandamiento*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Asfalto</b>	AC-20 con aditivo
<b>Horno</b>	-
<b>Dos anillos</b>	bronce
<b>Guías de centrado</b>	-
<b>Matraz</b>	precipitado de 1000 ml
<b>Esferas metálicas</b>	Peso $3,50 \pm 0,05$ g. Diámetro 9,53 mm
<b>Base de montaje para anillos de bronce</b>	-
<b>Mechero de gas y soporte</b>	-
<b>Agua</b>	
<b>Hielo</b>	-
<b>Cronómetro</b>	-
<b>Termómetro</b>	Digital

Fuente: (NTE INEN 920, 2013)

### **Procedimiento**

Según la norma (NTE INEN 920, 2013), seguir los pasos siguientes:

- Colocar el asfalto en el horno previamente calentado a una temperatura de 110°C y dejarlo hasta tener una consistencia fluida.

- Calentar los anillos a la misma temperatura y luego verter la muestra de asfalto fluida en cada anillo con un ligero exceso de material.
- Dejar enfriar las muestras por aproximadamente 30 minutos
- Para evitar que el material asfáltico se quede adherida a la placa donde se ubican los anillos, se procede a colocar aceite a todo este equipo.
- Una vez que las muestras se hayan enfriado, se prosigue con el montaje del equipo a utilizarse. Dentro del vaso de precipitación se coloca las guías con las esferas sobre los anillos llenos de asfalto.
- Llenar el vaso de precipitación con agua destilada y hielo hasta una altura que se encuentre en el rango de 101.6 mm y 108 mm.
- La temperatura del agua debe permanecer a  $5 \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante un período de 15 minutos y para poder controlar este valor se utiliza un termómetro digital.
- Transcurrido el tiempo, con el mechero se procede a calentar el vaso de precipitación de manera pausada de tal manera que la temperatura aumente progresivamente  $5^{\circ}\text{C}$  por minuto.
- En el instante en que cada esfera rodeada del material bituminoso llega a tocar la placa de bronce, se toma nota de la temperatura que marcó el termómetro.

**Tabla 36**

*Resultados del ensayo del punto de reblandecimiento*

<b>Punto de reblandecimiento</b>		
<b>Esferas</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>Promedio</b>
<b>1</b>	57.90	57.95 °C
<b>2</b>	68.00	

**Índice de penetración según INV E 724.** Dentro de la norma INV E 724 (2006), el valor de índice de penetración determina la susceptibilidad térmica del material asfáltico y se obtiene con los datos del ensayo de punto de ablandamiento y del ensayo de penetración. Para evaluar los valores del índice de penetración se establecen límites y su descripción se basa de acuerdo a la susceptibilidad. A continuación, en la tabla 37 se indica los tres tipos de rangos en función del  $I_p$ .

**Tabla 37**

*Interpretación del  $I_p$  de acuerdo a los valores límites*

<b><math>I_p</math></b>	<b>Descripción</b>
> +1	Denominados tipo gel y son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura.
<-1	Cementos asfálticos ricos en resinas, con mayor susceptibilidad a la temperatura y su comportamiento tiende a ser viscoso.
<b>Entre [+1; -1]</b>	Son utilizados para proyectos viales y tienen características intermedias los cementos asfálticos mencionados anteriormente

Fuente: (INV E 724, 2006)

### **Ecuación**

$$I_p = \frac{20 * T_{RaB} + 500 * \log P - 1952}{T_{RaB} - 50 * \log P + 120} \quad (14)$$

Donde

- $I_p$ : Índice de penetración
- $T_{RaB}$ : Punto de ablandamiento (°C)
- P: Penetración a 25°C

**Tabla 38***Cálculo del índice de penetración*

Índice de Penetración		
Punto de reblandecimiento (°C)	TRaB	57.95
Penetración a 25°C (1/100 mm)	P	57.56
Índice de penetración	Ip	0.97

**Ductilidad según INEN 916.** La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 916 (2013), indica que este ensayo permite determinar la capacidad de deformación del asfalto ante la acción de fuerzas, a esto se lo conoce como la propiedad de ductilidad y consiste en la medición de la distancia alargada de la muestra a una temperatura específica antes de que ocurra la ruptura del material. En la tabla 39 se observa el equipo necesario para el ensayo.

**Tabla 39***Equipos y materiales para el ensayo de ductilidad*

Materiales y Equipos	
Descripción	Características
<b>Molde</b>	Bronce Espesor $10 \pm 0,1$ mm
<b>Asfalto</b>	AC-20 con aditivo
<b>Baño de Agua (acondicionamiento de muestras)</b>	Capaz de mantener la temperatura específica. Variación máxima $0,5^{\circ}\text{C}$
<b>Máquina de ensayo de ductilidad</b>	Variación permisible de $\pm 5\%$
<b>Horno</b>	Capacidad de mantener la temperatura Rango de $5^{\circ}\text{C}$
<b>Sustancia antiadherente</b>	Grasa para los moldes
<b>Agua a una</b>	temperatura de $25^{\circ}\text{C}$
<b>Espátula</b>	Borde recto
<b>Termómetro</b>	ASTM E220 / E644

Fuente: (NTE INEN 916, 2013)

## Procedimiento

Considerar los pasos según la norma NTE INEN 916 (2013):

- Engrasar los moldes que se van a utilizar en el ensayo y dejarlos en una superficie recta.
- Introducir al horno la muestra a una temperatura de 110 °C hasta que adquiera una consistencia fluida.
- Colocar el asfalto diluido dentro de los moldes ya engrasados.
- Dejar a la muestra a temperatura ambiente durante un periodo de 35 minutos hasta que se enfríe.
- Con una espátula se procede a la extracción de material en exceso de los moldes.
- Al equipo de baño de agua colocar el líquido y estabilizar la temperatura a un valor constante de 25 °C.
- Sumergir la muestra de asfalto dentro del equipo aproximadamente hasta 2.5 cm.
- Dejar reposar un periodo de tiempo de  $90 \pm 5$  minutos y verificar que la temperatura de la muestra se estabilice.
- Una vez haya transcurrido el tiempo, se procede a remover completamente la muestra de la placa.
- En los ganchos de la máquina de ensayo se fija los anillos en cada extremo de los sujetadores y a una velocidad de 50 mm por minuto se separa los dos sujetadores, esto se lo realiza hasta que la briqueta se rompa.

- Finalmente, para tomar el valor de ductilidad se toma la medida de la distancia que existe entre los sujetadores hasta producir la rotura.

**Tabla 40**

*Resultados del ensayo de ductilidad del asfalto*

<b>Ensayo de Ductilidad</b>		
<b>No. Muestra</b>	<b>Distancia recorrida (cm)</b>	<b>Promedio</b>
<b>1</b>	115	120.00 cm
<b>2</b>	125	

**Punto de inflamación según ASTM D 92.** Según la norma ASTM D 92 (2009), este método evalúa el riesgo de inflamación del material bajo condiciones de laboratorio controladas, siendo el punto de inflamación una propiedad que debe determinarse a lo igual que el punto de fuego de un producto derivado del petróleo. Para la ejecución del ensayo se debe hacer uso del equipo mencionado en la tabla 41.

**Tabla 41**

*Equipos y materiales para el ensayo de punto de inflamación*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Asfalto</b>	AC-20 con aditivo
<b>Horno</b>	Capacidad de mantener una temperatura constante de 110 °C
<b>Copa abierta de Cleveland</b>	
<b>Termómetro</b>	Digital ASTM E1
<b>Mechero de gas</b>	-
<b>Soporte</b>	-
<b>Guantes</b>	-

Fuente: (ASTM D 92, 2009)

## Procedimiento

El procedimiento se basa en la norma ASTM D 92 (2009):

- Se toma la muestra del material bituminoso para luego ser colocado en el horno a una temperatura de aproximadamente 110°C y mantenerlo dentro hasta que la muestra se vea fluida.
- Verter el material previamente calentado dentro de la copa Cleveland hasta la marca que indica la altura permitida.
- Calibrar el mechero para que el incremento de temperatura por minuto sea de 14 a 17°C.
- Mediante el uso del mechero, calentamos la copa de tal manera que vaya aumentando 15°C por minuto sin que exceda los 56 °C, llegado a este punto se disminuye el incremento de temperatura de modo que el descenso sea de 5 o 6 °C por minuto.
- Cuando el valor de la temperatura alcance los 28 °C, con la ayuda de un mechero auxiliar se aplica la llama cada 2°C de incremento en la temperatura.
- Por último, para la toma del dato del punto de inflamación, se da lectura del termómetro.

### Tabla 42

*Resultados del ensayo del punto de inflamación del asfalto*

Ensayo de Punto de inflamación	
Temperatura °C	245

**Gravedad específica del asfalto según ASTM D 70.** La norma ASTM D 70 (2009), indica el procedimiento del método para la obtención de la gravedad específica del asfalto que es la relación entre el peso de un volumen de asfalto y el peso del mismo volumen de agua la misma temperatura. En la tabla 43 se establece los equipos y materiales necesarios para el ensayo.

**Tabla 43**

*Equipos y materiales para el ensayo de gravedad específica*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Horno</b>	-
<b>Picnómetro con tapón</b>	Vidrio de 25 ml Peso máx. 40 g
<b>Baño de agua</b>	Recipiente de aluminio Capacidad de mantener temperatura Rango 0.1°C
<b>Agua</b>	Destilada
<b>Termómetro</b>	Digital
<b>Balanza</b>	Precisión de $\pm 0.1$ gr

Fuente: (ASTM D 70, 2009)

**Procedimiento:**

Para determinar la gravedad específica se debe realizar el procedimiento establecido de la norma ASTM D 70 (2009):

- Tomar el dato del peso del picnómetro con el tapón de vidrio vacío y limpio.
- Llevar el picnómetro a baño de agua de tal manera que este quede sumergido completamente para calibrar el equipo, esto se debe realizar a una temperatura de 25 °C
- Se procede a colocar el agua destilada hasta el inicio del cuello del picnómetro.

- Seguidamente se coloca la tapa al picnómetro de manera cuidadosa para evitar el ingreso de aire.
- Esperar un lapso de 30 minutos hasta que alcance una temperatura constante de 25 °C.
- Una vez transcurrido el tiempo se retira el picnómetro, quitamos el exceso de agua de alrededor y se toma nota del peso.
- Colocar la muestra de asfalto en el horno (110 °C) hasta que se te tenga una consistencia fluida del material.
- Introducir en el picnómetro sin generar burbujas de aire el material bituminoso hasta el 1/3 de su capacidad, evitando que el material toque las paredes.
- Dejar a temperatura ambiente el picnómetro con el asfalto hasta que se enfríe por unos 40 minutos, una vez se encuentre frío se toma el valor de su peso con el tapón.
- Introducir agua destilada dentro el picnómetro con la muestra de asfalto, taparlo nuevamente sin que entre burbujas de aire.
- Colocar el picnómetro en el baño de agua y dejarlo por aproximadamente 30 minutos para luego ser retirado, secado y pesado.

#### Ecuación

$$\text{Gravedad específica} = \frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)} \quad (15)$$

Donde:

- A: Peso del picnómetro vacío+ tapón (g)
- B: Peso del picnómetro + agua destilada + tapón (g)

- C: Peso del picnómetro + asfalto + tapón (g)
- D: Peso del picnómetro + asfalto + agua destilada + tapón (g)

**Tabla 44**

*Resultado del ensayo de gravedad específica de asfalto*

<b>Gravedad Específica de Asfalto</b>		
<b>Peso del picnómetro más tapa (g)</b>	A	16.20
<b>Peso del picnómetro más agua destilada y tapa (g)</b>	B	41.50
<b>Peso del picnómetro más asfalto y tapa (g)</b>	C	25.00
<b>Peso del picnómetro con asfalto, agua destilada y tapa (g)</b>	D	41.40
<b>Gravedad Específica (g/ml)</b>	$\gamma$	0.99

#### ***Preparación de las probetas***

De acuerdo a la norma INV E 760 (2007) y a la norma INV E 748 (2007), se elaboran las probetas cilíndricas de las mezclas asfálticas abiertas y cerradas, con una cantidad aproximada de 1000 g y 1200 g respectivamente por cada muestra. Las dimensiones de las probetas tendrán un diámetro de  $101.6 \pm 0.1$  mm y una altura  $63.5 \pm 2.5$  mm y para su conformación se debe considerar el procedimiento adecuado tanto para la selección del material como para las condiciones previas antes de ser incorporados. A continuación, se menciona el procedimiento:

- Tomar la muestra de agregado necesaria y colocar en el horno hasta conseguir que el peso del material sea constante.
- Dosificar el material pétreo requerido para la elaboración de las muestras y calentar en el horno para luego ser mezclado con el ligante.
- Calentar el asfalto a de 120 °C para obtener un material viscoso de tal manera que permita adherirse al agregado que ha sido sometido a una temperatura previa.

- Colocar los materiales en un recipiente apropiado para posteriormente ser mezclados, los cuales deben permanecer a una temperatura de 130 a 140 °C.
- En el proceso de compactación para las mezclas asfálticas cerradas se considera la norma INV E 748 (2007), en donde se especifica que los moldes deben previamente calentados a una temperatura de 95° C a 150 ° C y a su vez se debe colocar papel filtro en el fondo. Para este tipo de mezclas el número de golpes por cada cara es de 75 y para las mezclas abiertas según la norma INV E 760 (2007), el número de golpes es de 50.
- Dejar enfriar durante un periodo de 12 horas para proceder a desmoldar las probetas.

### ***Ensayo en briquetas***

Para conocer las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas drenantes se requiere realizar los ensayos y verificar si los resultados se encuentran dentro de lo que se especifican en las normas. Para este tipo de mezclas los ensayos que se requieren son los siguientes:

- Análisis de vacíos
  - Densidad Bulk
  - Densidad RICE
- Ensayo de Permeabilidad
- Ensayo del Cántabro seco y húmedo
- Ensayo Marshall

Para las mezclas asfálticas cerradas se requieren de los siguientes ensayos:

- Densidad Bulk
- Gravedad específica máxima teórica
- Ensayo Marshall

- Resistencia a Compresión Diametral

### **Análisis de vacíos**

Para conocer el porcentaje de vacíos que tiene una muestra de mezcla asfáltica abierta compactada, la norma INV E 736 (2007) describe el proceso de cálculo de obtención de este parámetro. A continuación, se describe el desarrollo de los siguientes ensayos:

**Densidad de Bulk para mezclas asfálticas abiertas según la norma INV E 736.** Según la norma INV E 736 (2007), la densidad específica Bulk del agregado se refiere a la masa de un volumen, dentro de esta variable abarca tanto el volumen de vacíos de la muestra como el volumen de las partículas. El cálculo de la Gravedad Específica consiste en la división de la densidad Bulk para  $0.97707 \text{ g/cm}^3$  que es el valor correspondiente al peso específico del agua a  $25^\circ \text{ C}$ .

### **Procedimiento**

De acuerdo a norma INV E 736 (2007), el procedimiento de la obtención de la densidad bulk para mezclas asfálticas abiertas se lo realiza de la siguiente manera:

- Se procede a la medición de las dimensiones de las briquetas (altura y diámetro) en 4 sitios diferentes de la muestra.
- Obtener un promedio de los datos medidos y calcular el volumen de la muestra correspondiente.
- Tomar el valor del peso de las briquetas y se calcula la densidad.
- Con el valor obtenido anteriormente se divide para el peso específico del agua, el cual nos dará el valor de la Gravedad específica Bulk.

### Ecuaciones

$$\text{Volumen} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} * h \quad (16)$$

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad (17)$$

$$\text{Geb} = \frac{\text{Densidad Bulk}}{0.99707 \text{ gr/cm}^3} \quad (18)$$

**Tabla 45**

*Cálculo de la Gravedad Específica Bulk*

No. Muestra	Altura Prom (cm)	Diámetro Prom (cm)	Peso Muestra Seca (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Gravedad específica Bulk
1	6.72	10.15	1035.6	543.74	1.90	1.910
2	6.67	10.16	1037.2	540.76	1.92	1.924
3	6.68	10.18	1035.2	543.70	1.90	1.910
4	6.68	10.18	1031.8	543.70	1.90	1.903
5	6.66	10.17	1035.5	541.01	1.91	1.920
6	6.68	10.18	1039.1	543.70	1.91	1.917
7	6.68	10.18	1038.2	543.70	1.91	1.915
8	6.64	10.22	1035.3	544.70	1.90	1.906
9	6.74	10.15	1033.4	545.36	1.89	1.900
10	6.75	10.15	1038.4	546.17	1.90	1.907

**Gravedad específica máxima teórica según ASTM D 2041.** El ensayo según la norma ASTM D 2041 (2000), permite obtener la gravedad específica de una muestra de mezcla asfáltica no compactada a una temperatura de 25 °C, para el cual se requiere de equipo y material apropiado como se indica en la tabla 46.

Tabla 46

*Equipos y materiales para el ensayo de gravedad específica máxima teórica*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Contenedores</b>	Recipiente de metal Diámetro: 180-260mm Altura: 160mm
<b>Horno</b>	Temperatura de $110 \pm 5$ °C
<b>Balanza</b>	Precisión de $\pm 0.1$ gr
<b>Picnómetro con tapón</b>	vidrio de 25 ml.
<b>Bomba de vacío</b>	-
<b>Manómetro de presión residual</b>	-
<b>Manómetro o medidor de vacío</b>	-
<b>Termómetros</b>	Margen máximo de error 0.5 °C
<b>Baño de agua</b>	Temperatura constante 20-30 °C

Fuente: (ASTM D 2041, 2000)

### **Procedimiento**

De acuerdo a la norma ASTM D 2041 (2000), el proceso de la siguiente manera:

- Tomar una muestra de mezcla asfáltica y colocarla en el horno hasta que las partículas se puedan disgregar con facilidad sin que ocurra ninguna fractura del material pétreo.
- Colocar la muestra dentro del picnómetro y agregar agua hasta cubrir totalmente.
- Extraer el aire de la muestra con el uso de una bomba de vacíos por aproximadamente 15 min, este paso se lo realiza con el fin de disminuir la presión residual del envase y para esto se requiere del uso de un manómetro de presión residual.
- Una vez haya transcurrido el tiempo mencionado, se procede a llenar con agua destilada, de tal manera que evite la generación de burbujas.

- Tomar nota del peso del picnómetro, sin antes haber secado el exterior del frasco.

### Ecuaciones

$$Gem = \frac{A}{A+D-E} \quad (19)$$

Dónde:

- A = peso de la muestra seca en el horno (g)
- D = peso del recipiente lleno con agua a 25° C (g)
- E = peso del recipiente lleno con agua y muestra a 25° C (g)

**Tabla 47**

*Ensayo de gravedad específica máxima teórica de la muestra asfáltica abierta*

Gravedad específica máxima teórica		
Masa de muestra en aire (g)	A	2050.20
Masa en aire normalizada del picnómetro + agua + tapa (g)	D	8085.70
Masa del picnómetro + muestra + agua + tapa (g)	E	9307.70
Gravedad Específica Máxima Teórica	Gem	2.475
Gmm		2.468

**Tabla 48**

*Ensayo de gravedad específica máxima teórica de la muestra asfáltica cerrada*

Gravedad específica máxima teórica		
Masa de muestra en aire (g)	A	1262.80
Masa en aire normalizada del picnómetro + agua + tapa (g)	D	4845.70
Masa del picnómetro + muestra + agua + tapa (g)	E	5499.40
Gravedad Específica Máxima Teórica	Gem	2.073
Gmm		2.067

**Cálculo de vacíos.** Para obtener el porcentaje de vacíos de una muestra asfáltica abierta compactada se toma como referencia la norma INV E 736 (2007), en donde se requiere de los parámetros de la gravedad específica Bulk obtenidos en los ensayos anteriormente realizados y de la gravedad específica máxima teórica que de igual manera se obtuvo mediante la elaboración de ensayos respectivos. A continuación, con la fórmula especificada se procede al cálculo de esta variable.

### Ecuaciones

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{G_{eb}}{G_{em}} \right) \quad (20)$$

Dónde:

- $V_a$  = Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica.
- $G_{eb}$  = Gravedad específica Bulk.
- $G_{em}$  = Gravedad específica máxima teórica.

**Tabla 49**

*Cálculo del porcentaje de vacíos de la muestra asfáltica abierta*

No. Muestra	Gravedad específica Bulk	Gravedad Específica Máxima Teórica	Porcentaje de Vacíos (%)	Promedio % Vacíos
1	1.910	2.4681	22.60	22.56
2	1.924		22.06	
3	1.910		22.63	
4	1.903		22.88	
5	1.920		22.22	
6	1.917		22.34	
7	1.915		22.40	
8	1.906		22.76	
9	1.900		23.00	
10	1.907		22.74	

**Prueba de Permeabilidad.** Según al artículo 453 -13 de las especificaciones del INVIAS (2013) , para comprobar que la mezcla asfáltica cumple con su función drenante se procede a realizar una prueba de permeabilidad, el equipo necesario para la ejecución de esta prueba se lo visualiza en la tabla 50.

**Tabla 50**

*Materiales y equipos para la prueba de permeabilidad*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Molde Marshall</b>	-
<b>Muestra de Asfalto</b>	Humedecida
<b>Cronómetro</b>	-
<b>Agua</b>	Temperatura ambiente

### **Procedimiento**

De acuerdo al (INVIAS, 2013), procede de la siguiente manera:

- Humedecer la muestra de asfalto dentro del molde Marshall.
- En un envase llenar de agua hasta aproximadamente 100 ml.
- Verter el agua sobre la mezcla asfáltica y tomar el tiempo que demora en filtrarse completamente, este valor no debe superar los 15 segundos.

**Tabla 51**

*Prueba de permeabilidad en las muestras asfálticas abiertas*

<b>Asfalto (%)</b>	<b>Temperatura Agua (°C)</b>	<b>Tiempo de escurrimiento (s)</b>	<b>Promedio (s)</b>
<b>4.3</b>	21	12.12	12.008
	21	11.98	
	20	12.36	
	21	11.71	
	20	11.87	

**Ensayo del Cántabro Seco.** El desarrollo de este ensayo se basa en la norma INV E 760 (2007), que consiste en la determinación de la pérdida del desgaste de mezclas asfálticas abiertas a una temperatura entre 15 a 30° C, mediante la evaluación de ciertos parámetros como la cohesión, la adherencia y la resistencia a la dispersión de los materiales.

**Tabla 52**

*Equipos y materiales para el ensayo de Cántabro Seco*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Equipo de compactación</b>	-
<b>Balanza con</b>	Precisión de $\pm 0.1$ gr y $\pm 1$ gr
<b>Máquina de los Ángeles</b>	-
<b>Termómetros</b>	Escala: 200 °C Sensibilidad: 3 °C
<b>Cámara termostática</b>	-

Fuente: (INV E 760, 2007)

### **Procedimiento**

De acuerdo a la norma INV E 760 (2007), se requieren de los siguientes pasos para la ejecución del ensayo:

- Tomar los pesos de cada una de las briquetas, que para el cálculo posterior se considera como P1
- Introducir una muestra dentro de la máquina de los ángeles sin ninguna esfera.
- Girar el equipo a una durante 300 vueltas a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto, como establece la norma.
- Una vez finalizado el número de vueltas, se retira la muestra de la máquina y se toma su peso a este valor se lo asignara como P2.

- Determinar el valor de pérdida por desgaste de la muestra asfáltica y repetir el proceso con las demás briquetas

**Ecuación:**

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100 \quad (21)$$

Dónde:

- P = valor de la pérdida por desgaste (%)
- P<sub>1</sub> = peso inicial de la biqueta (g)
- P<sub>2</sub> = peso final de la biqueta (g)

**Tabla 53**

*Resultados del Ensayo de Cántabro seco*

<b>Ensayo del Cántabro Seco</b>				
<b>No. Muestra</b>	<b>Peso Inicial (g)</b>	<b>Peso Final (g)</b>	<b>Desgaste (%)</b>	<b>Promedio (%)</b>
<b>3</b>	1035.2	823.6	20.44	19.25
<b>4</b>	1031.8	893.1	13.44	
<b>5</b>	1035.5	788.5	23.85	

**Ensayo del cántabro húmedo.** El procedimiento de este ensayo es parecido al ensayo de cántabro seco con la diferencia en que la muestra debe ser previamente sumergida en agua. Este ensayo nos permite conocer el comportamiento de la mezcla abierta en contacto con el agua y de igual manera la adhesión de los materiales (Carvajal Mora & Chicaiza Fuentes, 2016).

### Procedimiento

- Colocar las briquetas dentro del agua sumergiéndolas completamente a una temperatura de 60 °C, Las muestras deben permanecer en el agua durante un periodo de 24 horas.
- Pasado el tiempo transcurrido se procede a sacar las muestras del agua y dejarlas a temperatura ambiente durante otro periodo de tiempo igual a 24 horas.
- Una vez las muestras hayan pasado por el proceso anterior, se procede con el ensayo tal cual se describe en el ensayo del cántabro seco.

**Tabla 54**

*Resultados del Ensayo de Cántabro Húmedo*

<b>Ensayo del Cántabro Húmedo</b>				
<b>No. Muestra</b>	<b>Peso Inicial (g)</b>	<b>Peso Final (g)</b>	<b>Desgaste (%)</b>	<b>Promedio (%)</b>
<b>6</b>	1039.1	789.6	24.01	22.21
<b>7</b>	1038.2	853.1	17.83	
<b>8</b>	1035.3	778.5	24.80	

**Ensayo Marshall.** Según la AASHTO T 245 (2008), el ensayo Marshall permite conocer la capacidad de resistencia ante la deformación y al desplazamiento de una mezcla asfáltica al ser sometidas a cargas de tráfico mediante el uso del equipo Marshall, para el desarrollo de este ensayo se requiere de 3 muestras con diferente contenido de asfalto según se haya sido establecido anteriormente.

Tabla 55

*Material y equipo requerido para el ensayo Marshall*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Balanza</b>	Precisión de $\pm 0.1$ gr y $\pm 1$ gr
<b>Recipientes</b>	Para el agregado y el ligante
<b>Herramienta de mezcla</b>	-
<b>Termómetros</b>	Digital
<b>Guantes</b>	-
<b>Pala</b>	-
<b>Baño de agua</b>	-

**Fuente:** (AASHTO T 245, 2008)

### **Procedimiento**

Como se establece en la norma AASHTO T 245 (2008), se continúa con los siguientes pasos:

- Colocar las muestras de mezcla asfáltica a un baño de agua a una temperatura de 60 °C, este proceso se lo realiza por un lapso de media hora.
- Colocar los sujetadores dentro del horno a una temperatura de 20 a 40 grados centígrados.
- Comprobar que las barras guía estén engrasadas y completamente libre de residuos.
- Retirar la muestra del baño de agua y enseguida colocar la muestra en el equipo marshall con ayuda de los sujetadores previamente calentados.
- Encerar y colocar el medidor de carga y de flujo para dar inicio al ensayo.
- Una vez que el equipo y la muestra estén listos, se procede la aplicación de la carga a una velocidad establecida.

- Tomar nota de los valores registrados una vez el medidor de carga se haya detenido.

**Tabla 56**

*Ensayo Marshall en mezclas asfálticas abiertas*

<b>Ensayo Marshall</b>			
<b>% Asfalto</b>	Geb	Estabilidad (lb)	Flujo
<b>4.3</b>	1.90046968	1482.38	13.76
	1.90683578	1491.82	14.33

**Tabla 57**

*Ensayo Marshall en mezclas asfálticas cerradas*

<b>Ensayo Marshall</b>		
<b>% Asfalto</b>	Estabilidad (lb)	Flujo
<b>5.9</b>	2128.93	13.76
	2127.12	13.45
	2129.21	13.56

**Densidad de Bulk para mezclas asfálticas cerradas según la norma ASTM D 2726.** La norma ASTM D 2726 (2000) permite determinar la gravedad específica bulk y la densidad bulk en las mezclas asfálticas cerradas. Para el desarrollo de este ensayo se requiere de los equipos que se mencionan en la tabla 58.

**Tabla 58**

*Material y equipo requerido para el ensayo de densidad de bulk*

<b>Materiales y Equipos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Balanza</b>	Precisión de $\pm 0.1$ gr y $\pm 1$ gr
<b>Baño de agua</b>	-

Fuente: (ASTM D 2726, 2000)

### Procedimiento

Según la norma ASTM D 2726 (2000), se procede de la siguiente manera:

- En el baño de agua a una temperatura de 25 °C, sumergir la muestra por aproximadamente 4 minutos y tomar el peso bajo el agua.
- Retirar la muestra del baño de agua, secar el agua superficialmente y tomar el peso de muestra en el aire.
- Colocar la muestra en el horno a una temperatura de 110 °C.
- Una vez que la masa esté constante, se deja enfriar y se toma el valor del peso al aire.

### Ecuaciones

$$\text{Gravedad específica Bulk} = \frac{A}{B-C} \quad (22)$$

Dónde:

- A = peso de la muestra seca en el aire (g)
- B = peso de la muestra superficialmente seca (g)
- C= peso de la muestra sumergido en agua (g)

**Tabla 59**

*Resultados de la Gravedad Específica de Bulk mezcla cerrada*

Gravedad Específica de Bulk		
% Asfalto	Gravedad específica Bulk	Densidad Bulk
5.9	2.023	2.017

**Fórmula de trabajo**

Una vez obtenidas las granulometrías individuales de cada agregado, se las combina en un solo conjunto para obtener la fórmula de trabajo con la cual se elaborarán las mezclas drenantes y que se ajustara con los resultados que arrojen las pruebas realizadas durante la fase de experimentación.

**Tabla 60***Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica Abierta*

<b>Fórmula de trabajo para la mezcla asfáltica abierta</b>					
<b>Descripción del material</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Cantidad a usar</b>	<b>% de Diseño</b>	<b>Lugar de procedencia de los materiales</b>
<b>Árido Grueso</b>	3/4"	kg	260.00	26.00	Mina San Ramón
<b>Árido Grueso</b>	3/8"	kg	580.00	58.00	Mina San Ramón
<b>Árido Fino (Arena)</b>	1/4"	kg	160.00	16.00	Mina San Ramón
<b>Asfalto+ Kaomin 14</b>		kg	43.00	4.30	Refinería Esmeraldas

**Tabla 61***Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica Cerrada*

<b>Fórmula de trabajo para las mezcla asfáltica Cerrada</b>					
<b>Descripción del material</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Cantidad a usar</b>	<b>% de Diseño</b>	<b>Lugar de procedencia de los materiales</b>
<b>Árido Grueso</b>	3/4"	kg	282.30	30.00	Mina Colibrí
<b>Árido Grueso</b>	1/2"	kg	235.25	25.00	Mina Colibrí
<b>Árido Fino (Arena)</b>	1/4"	kg	423.45	45.00	Mina Colibrí
<b>Asfalto+ Kaomin 14</b>		kg	59.00	5.90	Refinería Esmeraldas

## Sistema de Adquisición de Datos

### *Sistema de monitoreo*

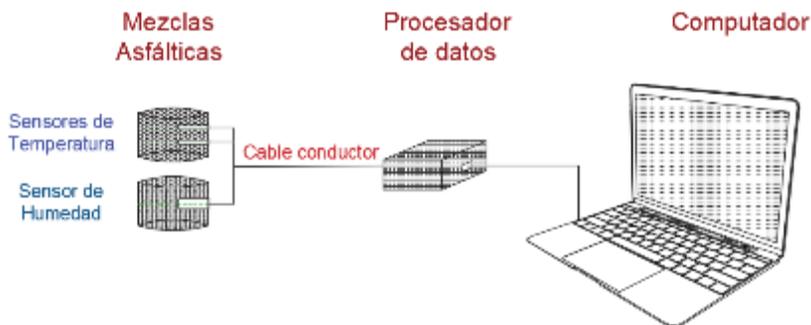
Para el desarrollo del proyecto se implementa un equipo de medición que permite tomar datos de humedad y de temperatura de las mezclas asfálticas abiertas y cerradas a diferentes profundidades.

El equipo consta de una red de sensores conformados como su nombre lo indica por 6 sensores de temperatura y 2 sensores de humedad, una placa Arduino que genera una base de datos y un computador portátil donde se almacena la información recopilada.

El procedimiento consistió en la toma de datos durante un periodo de 6 meses, con la finalidad de obtener información suficiente para analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas mediante los espectros térmicos y la humedad que presentaron las mismas.

### **Figura 33**

*Esquema del sistema de monitorización*

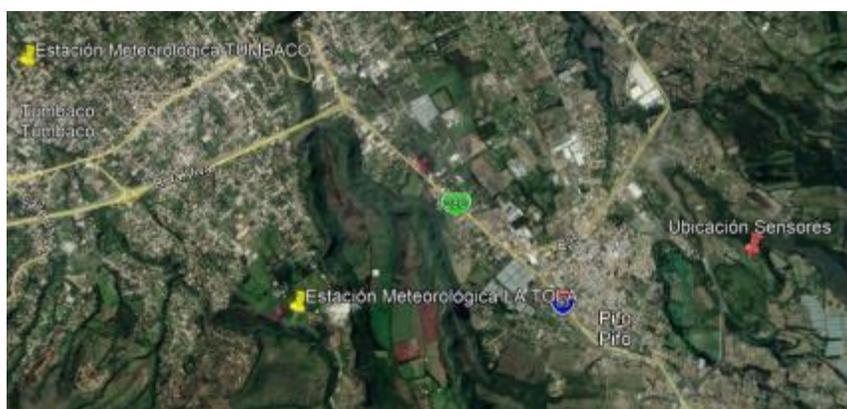


### ***Ubicación de sensores***

El equipo de medición fue instalado en la parroquia de Pifo, cantón Quito en la provincia de Pichincha. A continuación, en la figura 34 se puede observar la ubicación de los sensores y de las estaciones meteorológicas más cercanas al punto.

**Figura 34**

*Ubicación de los sensores en la zona de Estudio*



**Tabla 62**

*Coordenadas de ubicación de los sensores*

<b>SENSORES</b>		
<b>COORDENADAS</b>		
<b>Zona</b>	17	M
<b>UTMX</b>	797943,7	m E
<b>UTMY</b>	9975054,4	m S
<b>Cota</b>	<b>2698</b>	msnm

**Tabla 63***Coordenadas de la Estación LA TOLA M0002*

<b>LA TOLA</b>		
<b>COORDENADAS</b>		
<b>Zona</b>	17	M
<b>UTMX</b>	792709,7	m E
<b>UTMY</b>	9974351,9	m S
<b>Cota</b>	2480	msnm

**Tabla 64***Coordenadas de la Estación TUMBACO M5040*

<b>TUMBACO</b>		
<b>COORDENADAS</b>		
<b>Zona</b>	17	M
<b>UTMX</b>	789413,1	m E
<b>UTMY</b>	9977225,7	m S
<b>Cota</b>	2343	msnm

### ***Instalación y Funcionamiento***

Para la colocación de los sensores de temperatura y de humedad en las briquetas de mezcla asfáltica abierta (porosa) y cerrada, se procedió de la siguiente manera:

1. Limpieza de la zona como se muestra en la Figura 35.

**Figura 35**

*Limpieza de la zona de estudio*



2. Una vez realizada la limpieza del área se procede a la excavación donde serán ubicados los sensores.

**Figura 36**

*Excavación de la zona*



**Figura 37**

*Material reciclado de asfalto en la zona*

**Figura 38**

*Estratos del suelo*



3. Para proteger el sistema de medición de los sensores se realizó una pequeña zanja que permitió soterrar los cables y en la parte más crítica se revistió a los cables con una manguera para evitar que el cableado sufra algún daño y las mediciones dadas de los sensores se vean alterados.

**Figura 39**

*Instalación del cableado*

**Figura 40**

*Colocación de los sensores*



4. Los orificios en las briquetas de las mezclas asfálticas para la colocación de los sensores fueron realizados cuidadosamente con un taladro y una broca de concreto

para evitar que las briquetas se rompan y las muestras sean descartadas por mostrar alteraciones.

5. Los sensores y las mezclas asfálticas fueron enumeradas como se indican en las tablas 65 y 66 para llevar un registro exacto de los datos medidos.

**Tabla 65**

*Asignación y numeración de sensores*

<b>Nombre Sensor</b>	<b>Tipo de Sensor</b>
<b>T1</b>	Sensor de Temperatura
<b>T2</b>	Sensor de Temperatura
<b>T3</b>	Sensor de Temperatura
<b>T4</b>	Sensor de Temperatura
<b>T5 y H5</b>	Sensor de Temperatura y Humedad
<b>T6 y H5</b>	Sensor de Temperatura y Humedad

**Tabla 66**

*Asignación y numeración de mezclas asfálticas*

<b>Nombre</b>	<b>Mezcla Asfáltica</b>
<b>M1</b>	Cerrada
<b>M2</b>	Cerrada
<b>M3</b>	Abierta
<b>M4</b>	Abierta

**Figura 41**

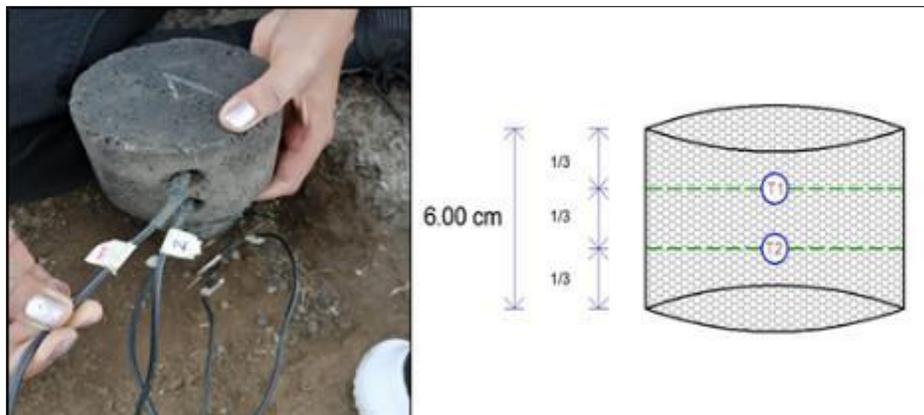
*Numeración de sensores de temperatura y humedad*



6. Los sensores fueron colocados en 4 briquetas, 2 briquetas de mezcla asfáltica abierta y 2 briquetas de mezcla asfáltica cerrada. Cada sensor de temperatura fue ubicado a  $1/3$  de distancia como se muestra en la figura 42 y cada sensor de humedad y temperatura en el centro de cada briqueta (figura 43).

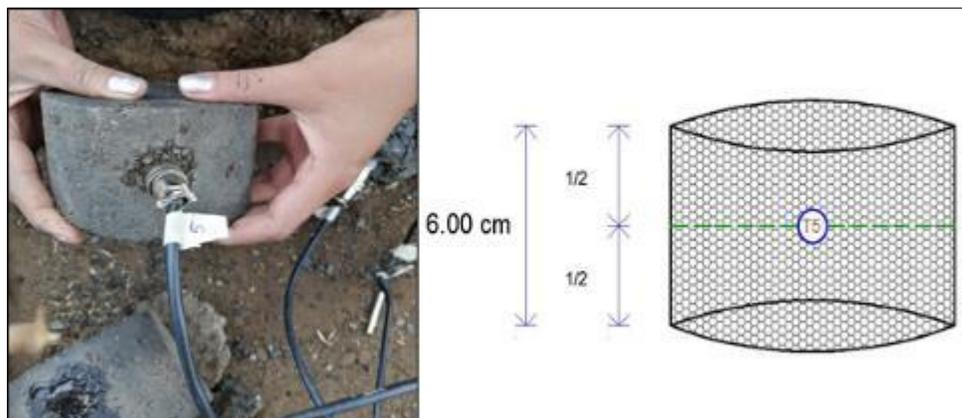
**Figura 42**

*Colocación de sensores de temperatura en la mezcla asfáltica*



**Figura 43**

*Colocación de sensores de humedad y temperatura en la mezcla asfáltica*



7. La distribución de los sensores queda establecida como se indica en la tabla 67.

**Tabla 67**

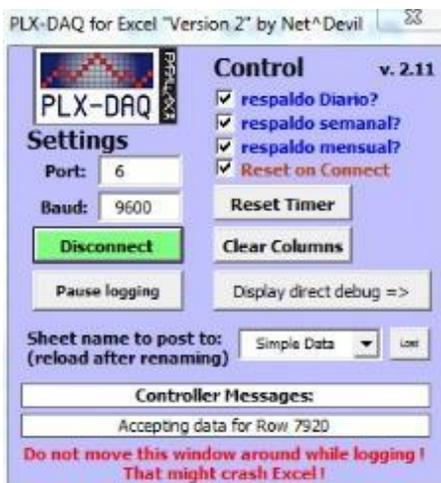
*Distribución de sensores en mezclas asfálticas*

SENSOR	MEZCLA ASFÁLTICA
T1	M1
T2	M1
T3	M3
T4	M3
T5	M2
T6	M4
H5	M2
H6	M4

8. Posteriormente, se procede a la instalación del sistema de control, el cual nos permitirá obtener los datos de los sensores y almacenar toda la información recopilada durante 24 horas con un respaldo diario, semanal y mensual. En la figura 44 se puede observar la interfaz gráfica que permite la toma de datos

Figura 44

Sistema de control de datos



9. Los valores se van almacenando en una hoja de Excel que nos permite ver la fecha y hora en la que se tomó el valor de temperatura y de humedad.

Figura 45

Datos almacenados en el archivo de Excel

FECHA	HORA	T1	T2	T3	T4	T5	T6	H5	H6
22/12/2020	00:04:30	13.02	14.46	13.27	15.27	14.62	13.82	22.79%	13.82%
22/12/2020	00:09:31	12.96	14.40	13.21	15.21	14.55	13.72	22.77%	13.72%
22/12/2020	00:14:32	12.90	14.34	13.15	15.15	14.50	13.67	22.75%	13.67%
22/12/2020	00:19:33	12.84	14.34	13.09	15.15	14.44	13.59	22.76%	13.59%
22/12/2020	00:24:34	12.77	14.27	13.09	15.09	14.38	13.54	22.74%	13.54%
22/12/2020	00:29:35	12.71	14.21	13.02	15.02	14.32	13.48	22.75%	13.48%
22/12/2020	00:34:36	12.65	14.15	13.02	15.02	14.26	13.42	22.73%	13.42%
22/12/2020	00:39:37	12.65	14.09	12.96	14.96	14.20	13.35	22.75%	13.35%
22/12/2020	00:44:38	12.52	14.02	12.90	14.90	14.16	13.30	22.74%	13.30%
22/12/2020	00:49:39	12.52	14.02	12.90	14.90	14.08	13.24	22.74%	13.24%
22/12/2020	00:54:40	12.46	13.96	12.84	14.84	14.04	13.20	22.75%	13.20%
22/12/2020	00:59:41	12.40	13.90	12.84	14.77	14.01	13.15	22.75%	13.15%
22/12/2020	01:04:42	12.34	13.84	12.71	14.71	13.96	13.09	22.74%	13.09%
22/12/2020	01:09:43	12.27	13.84	12.65	14.71	13.88	13.00	22.76%	13.00%
22/12/2020	01:14:44	12.21	13.77	12.59	14.65	13.82	12.96	22.73%	12.96%
22/12/2020	01:19:45	12.15	13.71	12.52	14.59	13.77	12.91	22.75%	12.91%
22/12/2020	01:24:45	12.09	13.65	12.52	14.52	13.71	12.85	22.72%	12.85%
22/12/2020	01:29:46	12.02	13.65	12.52	14.52	13.68	12.79	22.73%	12.79%
22/12/2020	01:34:47	12.02	13.59	12.40	14.46	13.62	12.76	22.75%	12.76%

10. El programa Tera Term permite hacer uso del puerto para la toma de datos.

**Figura 46**

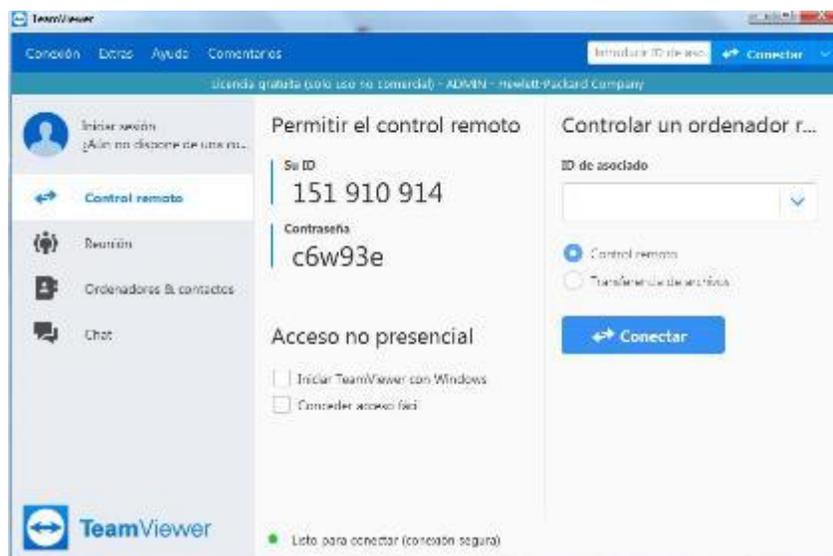
*Activación del puerto para obtención de datos*



11. Finalmente, el programa Team Viewer nos permite monitorear el sistema de control de adquisición de datos para lo cual se requerirá el ID y contraseña para el acceso desde cualquier computador.

**Figura 47**

*ID de acceso a control remoto del computador que toma los datos de los sensores*



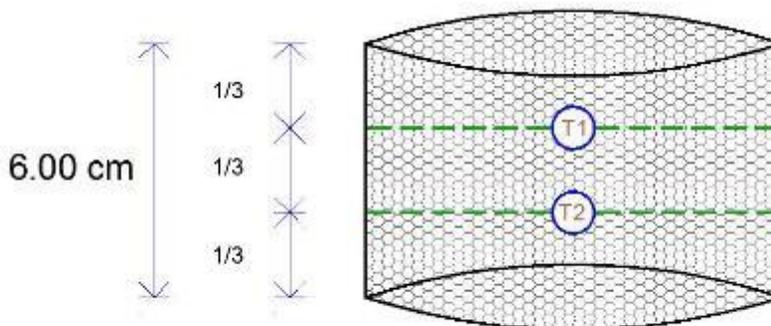
### ***Procesamiento de datos obtenidos de los sensores***

La medición de los sensores se realizó durante los meses de septiembre del 2020, octubre del 2020, noviembre del 2020, diciembre del 2020, enero del 2021 y febrero del 2021 cada sensor tomó datos las 24 horas del día en un período de 5 minutos; lo que significa que se obtuvieron 288 datos diarios y 8.640 datos mensuales para cada uno de los sensores.

Se utilizaron 4 briquetas de asfalto, 2 de mezcla asfáltica cerrada y 2 de mezcla asfáltica abierta. En 2 briquetas de asfalto ( mezcla asfáltica abierta y cerrada) se colocaron 2 sensores en cada una ( para su reconocimiento se los denominó como T1 y T2 para mezcla asfáltica cerrada y T3 y T4 para la mezcla asfáltica abierta) como se muestran el esquema 1 y esquema 2 de la figura 48 y la figura 49 respectivamente; y en las otras 2 briquetas se colocó 1 sensor de temperatura y humedad ( de igual manera se las denominó T5 para la mezcla asfáltica cerrada y T6 para la mezcla asfáltica cerrada) como se muestran el esquema 3 y esquema 4 de la figura 50 y la figura 51 respectivamente.

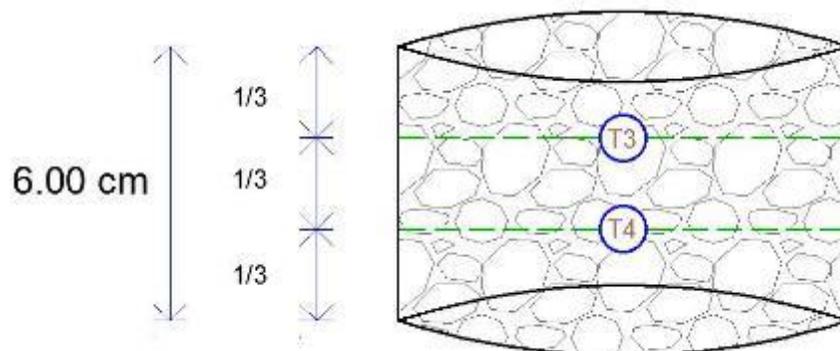
#### **Figura 48**

*Esquema 1 de colocación de sensores en la briqueta de mezcla asfáltica cerrada*

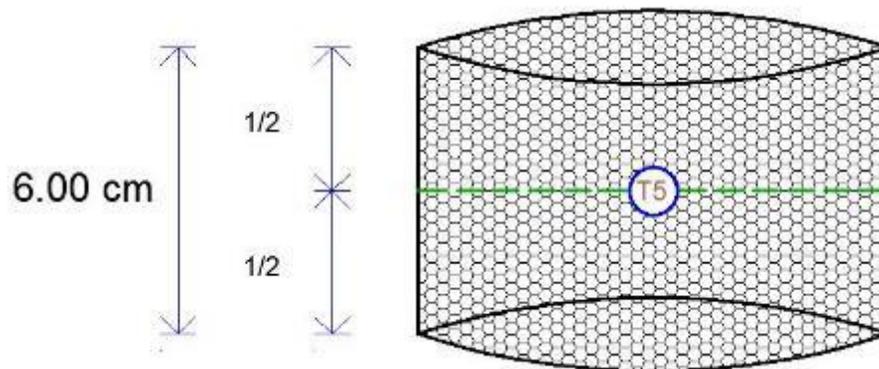


**Figura 49**

*Esquema 2 de colocación de sensores en la briqueta de mezcla asfáltica abierta*

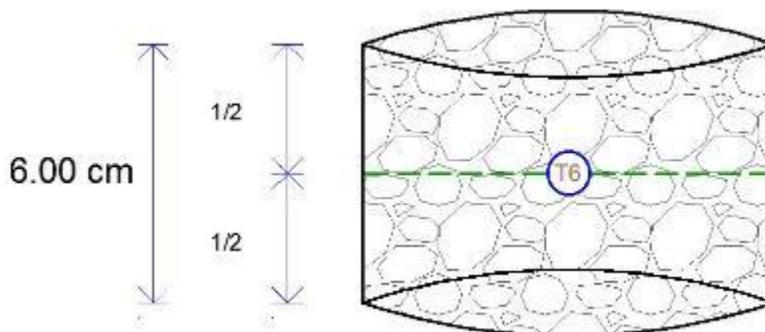
**Figura 50**

*Esquema 3 de colocación de sensores en la briqueta de mezcla asfáltica cerrada*



**Figura 51**

*Esquema 4 de colocación de sensores en la briqueta de mezcla asfáltica abierta*



Para determinar el valor de la temperatura máxima se tomó el valor máximo de toda la base de datos para tener el valor de la Temperatura (T1) de igual manera para tener la temperatura (T2), temperatura 3 (T3), temperatura 4 (T4), temperatura 5 (T5) y temperatura 6 (T6). Para obtener el valor de la temperatura máxima de la mezcla asfáltica cerrada se sacó un promedio entre el valor de T1 y T2 (P T1 y PT2) obtenido este valor se le hizo un promedio con el valor de T5 y de esta forma se obtuvo el valor de temperatura máxima de la briqueta de mezcla asfáltica cerrada; de la misma manera para determinar el valor de la temperatura máxima de la briqueta de la mezcla asfáltica abierta se obtuvo el promedio entre T3 y T4 (P T3 Y PT4) y una vez obtenido este valor se promedió con el valor de T6. Para determinar el valor de la temperatura mínima y promedio se realizó el mismo procedimiento, pero esta vez con la temperatura mínima y promedio respectivamente. La tabla 34 muestra un esquema de cómo se obtuvieron los valores.

**Tabla 68**

*Procedimiento de análisis de datos para la obtención de temperaturas*

<b>Temperatura máxima (°C)</b>									
<b>T1</b>	T2	PT1T2	T3	T4	PT3T4	T5	T6	TMC	TMA
<b>43.46</b>	38.96	41.21	40.09	36.03	38.06	41.36	42.32	41.29	40.19
<b>Temperatura mínima (°C)</b>									
<b>T1</b>	T2	PT1T2	T3	T4	PT3T4	T5	T6	TMC	TMA
<b>11.84</b>	14.34	13.09	13.02	15.84	14.43	14.22	13.38	13.66	13.91
<b>Temperatura promedio (°C)</b>									
<b>T1</b>	T2	PT1T2	T3	T4	PT3T4	T5	T6	TMC	TMA
<b>24.51</b>	24.74	24.63	24.28	24.71	24.49	25.53	25.29	25.08	24.89

**Temperaturas en las mezclas de asfálticas.** Con los datos proporcionados por los sensores, se realiza el procesamiento de la información lo que nos permitió obtener las temperaturas máximas, temperaturas mínimas y las temperaturas promedio de las cuatro mezclas asfálticas (2 abiertas y 2 cerradas) de los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre de 2020, enero y febrero del 2021.

Las siguientes tablas de la 69 a la 74 muestran los resultados de las temperaturas de máxima, mínimas y promedios de las mezclas en los meses analizados.

Tabla 69

*Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de septiembre de 2020*

FECHA	TEMPERATURA					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	T MAX	T MIN	T PROMEDIO	T MAX	T MIN	T PROMEDIO
<b>1</b>	39.06	16.48	24.64	38.43	15.82	24.56
<b>2</b>	38.26	15.94	24.59	37.99	15.67	24.52
<b>3</b>	39.60	15.38	22.85	38.98	15.49	22.60
<b>4</b>	39.99	16.19	24.66	38.84	16.27	24.44
<b>5</b>	38.99	16.70	25.25	38.20	16.70	25.08
<b>6</b>	41.29	13.66	25.08	40.19	13.91	24.89
<b>7</b>	40.41	14.22	25.04	39.60	14.47	24.94
<b>8</b>	37.97	18.10	25.30	37.23	18.20	25.14
<b>9</b>	37.21	18.38	24.91	36.26	18.03	24.73
<b>10</b>	40.03	16.21	24.56	39.11	16.31	24.39
<b>11</b>	25.77	15.79	20.34	26.49	15.17	20.12
<b>12</b>	31.90	13.62	21.27	31.51	13.67	21.24
<b>13</b>	39.06	16.48	24.66	38.43	16.53	24.58
<b>14</b>	30.31	17.43	22.19	29.90	16.97	22.08
<b>15</b>	37.59	16.70	22.45	37.02	8.60	22.31
<b>16</b>	27.08	14.88	18.81	26.65	14.77	18.67
<b>17</b>	24.80	13.85	17.22	24.53	13.90	17.09
<b>18</b>	25.03	13.95	18.52	25.20	7.17	18.47
<b>19</b>	33.36	12.93	20.74	34.40	12.75	20.83
<b>20</b>	30.53	14.82	20.97	29.27	14.40	20.49
<b>21</b>	29.36	12.67	19.85	31.04	12.70	20.25
<b>22</b>	27.48	14.84	18.19	27.02	7.69	18.04
<b>23</b>	28.42	15.05	19.16	28.04	14.98	18.96
<b>24</b>	27.67	16.90	21.64	27.39	16.92	21.54
<b>25</b>	35.03	18.28	23.55	34.54	18.27	23.45
<b>26</b>	38.26	15.94	24.59	37.99	16.08	24.53
<b>27</b>	39.60	15.38	22.86	38.98	15.49	22.61
<b>28</b>	39.99	16.19	24.66	38.84	16.27	24.44
<b>29</b>	38.99	16.70	25.25	38.20	16.61	25.08
<b>30</b>	40.37	17.02	26.14	39.95	17.12	26.05

Tabla 70

*Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de octubre de 2020*

FECHA	TEMPERATURA					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	T MAX	T MIN	T PROMEDIO	T MAX	T MIN	T PROMEDIO
5	24.80	13.85	17.22	26.65	13.90	17.10
6	27.48	14.84	18.19	27.02	7.69	18.04
7	27.08	14.88	18.81	26.65	14.77	18.67
8	36.08	13.47	22.06	35.94	13.44	21.85
9	28.42	15.05	19.15	28.04	14.98	18.95
10	37.59	16.61	22.46	37.02	16.75	22.35
11	27.67	16.90	21.64	27.39	16.92	21.54
12	30.31	17.43	22.19	29.90	17.41	22.08
13	39.52	15.16	24.17	39.47	15.76	24.30
14	35.03	18.28	23.55	34.54	18.27	23.45
15	39.06	16.48	24.67	38.43	16.53	24.59
16	33.42	15.24	22.09	33.16	15.35	22.05
17	36.52	16.54	23.55	36.17	16.64	23.54
18	39.55	16.93	24.32	38.74	17.07	24.21
19	38.26	15.38	24.59	37.99	15.64	24.53
20	38.26	13.47	24.59	37.99	13.70	24.53
21	39.60	15.38	22.85	38.98	15.49	22.60
22	40.03	16.21	24.54	39.11	16.31	24.37
23	39.44	13.58	22.80	38.51	14.01	22.85
24	39.99	16.19	24.66	38.84	16.27	24.44
25	36.51	13.62	21.47	36.40	13.66	21.28
26	37.21	14.97	24.87	36.26	14.96	24.70
27	38.99	16.65	25.26	38.20	16.59	25.09
28	40.32	16.35	25.80	39.19	16.56	25.62
29	36.95	16.48	24.24	34.54	18.27	23.45
30	37.97	18.10	25.30	37.23	18.20	25.14
31	40.37	17.02	26.12	39.95	17.12	26.04

**Tabla 71***Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de noviembre de 2020*

FECHA	TEMPERATURA					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	T MAX	T MIN	T PROMEDIO	T MAX	T MIN	T PROMEDIO
<b>1</b>	40.37	17.02	26.13	39.95	17.12	26.05
<b>2</b>	40.32	16.35	25.81	39.19	16.56	25.64
<b>3</b>	40.41	14.22	25.04	39.60	14.47	24.94
<b>4</b>	41.29	13.66	25.09	40.19	13.91	24.91
<b>5</b>	37.97	18.10	25.30	37.23	18.20	25.14
<b>6</b>	40.41	14.22	25.04	39.60	14.47	24.94
<b>7</b>	37.21	18.38	24.93	36.26	18.45	24.76
<b>8</b>	39.99	16.19	24.66	38.84	16.27	24.44
<b>9</b>	40.03	16.21	24.56	39.11	16.31	24.39
<b>10</b>	39.60	15.38	22.85	38.98	15.49	22.60
<b>11</b>	31.90	13.62	21.27	31.51	13.67	21.24
<b>12</b>	38.26	15.94	24.60	37.99	16.08	24.54
<b>13</b>	39.06	16.48	24.66	38.43	16.53	24.58
<b>14</b>	35.03	18.28	23.55	34.54	18.27	23.45
<b>15</b>	30.31	17.43	22.20	29.90	17.41	22.09
<b>16</b>	27.67	16.90	21.64	27.39	16.92	21.54
<b>17</b>	37.59	16.70	22.45	37.02	8.60	22.31
<b>18</b>	28.42	15.05	19.15	28.04	14.97	18.95
<b>19</b>	27.08	14.88	18.81	26.65	14.77	18.67
<b>20</b>	27.48	14.84	18.19	27.02	7.69	18.04
<b>21</b>	24.80	13.85	17.22	24.53	13.90	17.09
<b>22</b>	26.37	12.16	18.24	26.65	12.06	18.18
<b>23</b>	25.03	13.95	18.52	25.20	7.17	18.47
<b>24</b>	29.36	12.67	19.84	31.04	12.70	20.24
<b>25</b>	33.36	12.93	20.73	34.40	12.75	20.82
<b>26</b>	30.53	14.82	20.97	29.27	14.40	20.49
<b>27</b>	22.52	15.19	18.00	22.65	15.01	18.00

Tabla 72

*Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de diciembre de 2020*

FECHA	TEMPERATURA					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	T MAX	T MIN	T PROMEDIO	T MAX	T MIN	T PROMEDIO
<b>7</b>	37.21	18.34	24.92	36.26	18.28	24.75
<b>8</b>	39.99	16.19	24.66	38.84	16.27	24.44
<b>9</b>	40.03	16.21	24.56	39.11	16.31	24.39
<b>10</b>	39.60	15.38	22.85	38.98	15.49	22.60
<b>12</b>	38.26	15.94	24.60	37.99	16.08	24.54
<b>13</b>	39.06	16.48	24.66	38.43	16.53	24.58
<b>14</b>	37.59	16.70	22.45	37.02	8.60	22.31
<b>15</b>	30.31	17.43	22.20	29.90	17.41	22.09
<b>16</b>	27.67	16.90	21.64	27.39	16.92	21.54
<b>17</b>	37.59	16.70	22.45	37.02	8.60	22.31
<b>18</b>	28.42	15.05	19.15	28.04	14.97	18.95
<b>19</b>	27.08	14.88	18.81	26.65	14.77	18.67
<b>20</b>	27.48	14.84	18.19	27.02	7.69	18.04
<b>21</b>	24.80	13.85	17.22	24.53	13.90	17.09
<b>22</b>	26.37	12.05	18.24	26.65	12.06	18.18
<b>23</b>	25.03	13.95	18.53	25.20	13.85	18.51
<b>24</b>	29.36	12.67	19.84	31.04	12.70	20.24
<b>25</b>	33.36	12.93	20.73	34.40	12.75	20.82
<b>26</b>	30.53	14.82	20.97	29.27	14.40	20.49
<b>27</b>	22.52	15.19	18.00	22.65	15.01	17.99
<b>28</b>	40.32	16.35	25.79	39.19	16.56	25.61
<b>29</b>	40.41	14.22	25.04	39.60	14.47	24.94
<b>30</b>	41.34	13.66	25.09	40.19	13.91	24.91
<b>31</b>	37.97	18.10	25.30	37.23	18.20	25.14

Tabla 73

*Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de enero de 2021*

FECHA	TEMPERATURA					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	T MAX	T MIN	T PROMEDIO	T MAX	T MIN	T PROMEDIO
<b>1</b>	37.59	16.76	22.45	37.02	16.53	22.34
<b>2</b>	28.42	15.05	19.15	28.04	14.93	18.94
<b>3</b>	27.08	14.88	18.45	26.65	14.72	18.24
<b>4</b>	27.48	15.00	18.20	27.02	14.97	18.07
<b>5</b>	24.80	13.85	17.22	24.53	13.90	17.09
<b>6</b>	26.18	13.75	18.33	26.73	12.85	18.19
<b>7</b>	26.37	13.24	18.24	26.65	10.54	18.18
<b>8</b>	25.03	13.95	18.53	25.20	13.85	18.50
<b>9</b>	29.36	13.17	19.84	31.04	12.70	20.24
<b>10</b>	30.31	17.43	22.20	29.90	17.41	22.09
<b>11</b>	35.03	18.28	23.55	34.54	18.27	23.45
<b>12</b>	39.77	16.43	24.65	38.43	16.32	24.56
<b>13</b>	33.36	13.26	20.73	34.40	12.75	20.82
<b>14</b>	30.42	14.78	20.75	30.34	14.45	20.47
<b>15</b>	31.89	15.83	22.41	31.76	15.57	22.12
<b>16</b>	26.89	15.37	19.97	26.78	15.10	19.69
<b>17</b>	26.67	14.47	19.55	26.74	14.07	19.25
<b>18</b>	23.31	13.17	15.68	22.73	12.61	15.26
<b>19</b>	25.26	15.35	20.31	21.86	15.01	18.44
<b>20</b>	26.98	16.76	21.87	23.58	16.42	20.00
<b>21</b>	24.39	16.79	20.59	20.99	16.45	18.72
<b>22</b>	20.81	16.05	18.43	17.41	15.71	16.56
<b>23</b>	22.36	14.86	18.61	18.96	14.52	16.74
<b>24</b>	26.87	16.52	21.70	23.47	16.18	19.83
<b>25</b>	29.36	14.25	21.81	25.96	13.91	19.94
<b>26</b>	26.40	13.52	19.96	23.00	13.18	18.09
<b>27</b>	25.36	14.89	20.13	21.96	14.55	18.26
<b>28</b>	27.89	16.78	22.34	24.49	16.44	20.47
<b>29</b>	30.56	16.85	23.71	27.16	16.51	21.84
<b>30</b>	32.36	14.87	23.62	28.96	14.53	21.75
<b>31</b>	34.50	15.78	25.14	31.10	15.44	23.27

Tabla 74

*Temperaturas de las mezclas asfálticas en el mes de febrero de 2021*

FECHA	TEMPERATURA					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	T MAX	T MIN	T PROMEDIO	T MAX	T MIN	T PROMEDIO
<b>1</b>	28.67	16.76	19.65	28.34	16.53	19.62
<b>2</b>	28.42	15.05	19.15	28.04	14.93	18.94
<b>3</b>	27.08	14.88	18.45	26.65	14.72	18.24
<b>4</b>	27.48	15.00	18.20	27.02	14.97	18.07
<b>5</b>	24.80	13.85	17.22	24.53	13.90	17.09
<b>6</b>	26.18	13.75	18.33	26.73	12.85	18.19
<b>7</b>	26.37	13.24	18.24	26.65	11.05	18.18
<b>8</b>	24.53	15.74	19.78	24.48	15.41	19.80
<b>9</b>	33.23	13.17	21.22	34.50	13.48	21.20
<b>10</b>	30.45	13.72	21.14	32.23	13.28	21.28
<b>11</b>	29.94	16.54	22.13	30.53	16.03	22.06
<b>12</b>	26.03	15.73	20.16	26.57	15.31	20.01
<b>13</b>	35.03	13.26	23.56	35.84	14.86	23.53
<b>14</b>	33.92	17.28	22.81	34.62	16.84	22.66
<b>15</b>	30.30	15.86	21.34	31.48	15.40	21.31
<b>16</b>	35.15	16.07	20.43	36.06	15.51	20.26
<b>17</b>	38.14	13.51	22.85	39.01	12.86	22.64
<b>18</b>	24.68	13.17	17.06	24.57	14.92	16.47
<b>19</b>	21.45	14.34	17.90	18.05	14.00	16.03
<b>20</b>	26.98	13.95	20.47	23.58	13.61	18.60
<b>21</b>	27.48	16.79	22.14	24.08	16.45	20.27
<b>22</b>	21.62	15.39	18.51	18.22	15.05	16.64
<b>23</b>	29.76	14.86	22.31	26.36	14.52	20.44
<b>24</b>	26.87	16.52	21.70	23.47	16.18	19.83
<b>25</b>	29.36	14.25	21.81	25.96	13.91	19.94
<b>26</b>	26.40	13.52	19.96	23.00	13.18	18.09
<b>27</b>	25.36	14.89	20.13	21.96	14.55	18.26
<b>28</b>	27.89	16.78	22.34	24.49	16.44	20.47

**Oscilación térmica.** Una vez obtenidas las diferentes temperaturas (máximas, mínimas y promedio) se calcula la oscilación térmica que es la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas, para poder determinar la variación térmica que sufren las mezclas asfálticas y el gradiente térmico de cada una de las mezclas. La tabla 75 muestra la oscilación térmica en las mezclas.

**Tabla 75**

*Oscilación Térmica*

OSCILACIÓN TÉRMICA (°C)		
FECHA	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA	MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA
SEPTIEMBRE	28.62	33.02
OCTUBRE	26.90	32.26
NOVIEMBRE	29.13	33.02
DICIEMBRE	29.29	32.50
ENERO	26.60	27.89
FEBRERO	24.97	27.96

**Variación de temperatura ( $\Delta T$ ).** Para el cálculo de la variación de temperatura se utilizaron las temperaturas de los sensores T1, T2 y T5, para el caso de la mezcla asfáltica cerrada, para cada uno de los valores obtenidos en los sensores T1, T2 y T5 se procedió a sacar la diferencia de temperaturas obtenidas entre los dos sensores; dichos cálculos se hicieron por día y para determinar el valor mensual se procedió a calcular el valor promedio de todos los días de cada mes. El mismo procedimiento se realizó para los sensores T3, T4 y T5 en la mezcla asfáltica abierta. La variación de temperatura nos sirve para calcular el gradiente térmico.

La tabla 76 nos muestra los valores obtenidos de la variación de temperatura en los meses analizados.

Tabla 76

*Variación de temperatura en las mezclas asfálticas*

FECHA	Variación de Temperatura °C					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	MAX	MIN	PROMEDIO	MAX	MIN	PROMEDIO
SEPTIEMBRE	6.43	0.00	1.83	6.84	0.00	1.88
OCTUBRE	6.82	0.00	2.00	6.20	0.00	2.04
NOVIEMBRE	6.62	0.00	1.81	6.84	0.00	1.86
DICIEMBRE	6.62	0.00	1.78	5.50	0.00	1.84
ENERO	5.32	0.00	1.41	6.84	0.00	1.40
FEBRERO	6.38	0.00	1.55	6.50	0.00	1.68

**Gradiente Térmico.** Una vez obtenido el valor de las variaciones de temperatura para cada una de las mezclas en los diferentes meses analizados, se calculó el valor del gradiente térmico con la ecuación 23:

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (23)$$

Donde:

- $\Delta T$ : Variación de temperatura [°C]
- $\Delta Z$ : Variación de altura [cm]; en este caso 2 cm
- G: Gradiente térmico [°C/cm]

**Condiciones de Humedad.** Los sensores T5 y T6 utilizados en las mezclas asfálticas (cerrada y abierta respectivamente) a parte de medir la temperatura también miden la humedad dentro de cada una de las mezclas; el mismo procesamiento de datos que se hizo para encontrar los valores de las temperaturas se realizó para encontrar los valores del porcentaje de humedad para cada una de las mezclas.

La tabla 77 nos muestra los valores máximos y mínimos del porcentaje de humedad de cada una de las briquetas en cada uno de los meses analizados.

**Tabla 77**

*Porcentajes de Humedad de las mezclas asfálticas*

FECHA	PORCENTAJE DE HUMEDAD			
	MEZCLA ASFÁLTICA CERRADA		MEZCLA ASFÁLTICA ABIERTA	
	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO
<b>Septiembre</b>	40.99	18.17%	26.54%	14.47%
<b>Octubre</b>	50.81	22.96%	38.87%	18.00%
<b>Noviembre</b>	37.06	18.72%	29.34%	11.77%
<b>Diciembre</b>	49.07	22.09	43.09%	16.09%
<b>Enero</b>	40.92	17.33%	42.83%	20.86%
<b>Febrero</b>	36.42	25.33%	26.17%	19.18%

Las siguientes figuras muestran la tendencia de los valores máximos y mínimos del porcentaje de humedad del mes de septiembre los cuales se hicieron la toma de datos con la ayuda de los sensores, las gráficas del resto de meses se encuentran en la sección de Anexos.

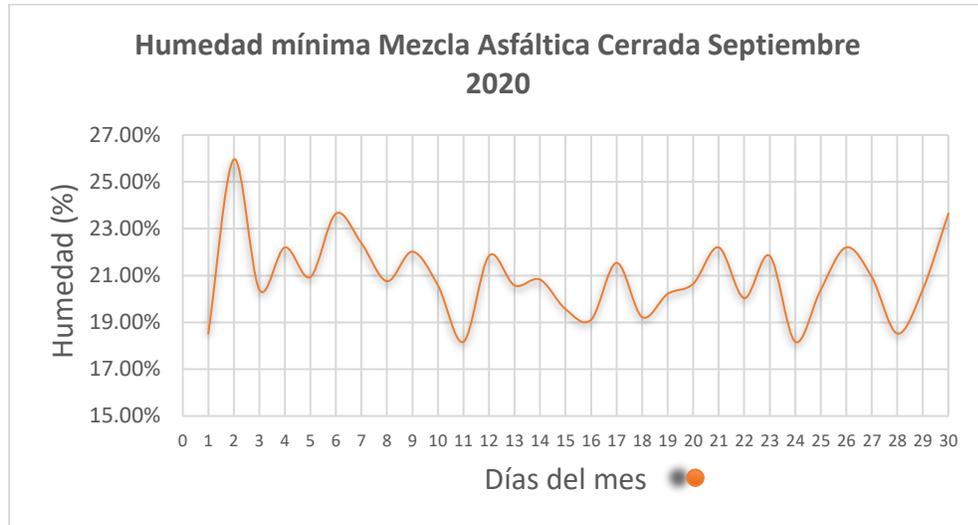
**Figura 52**

*Humedad máxima mezcla asfáltica cerrada mes de septiembre del 2020*



**Figura 53**

*Humedad mínima mezcla asfáltica cerrada mes de septiembre del 2020*

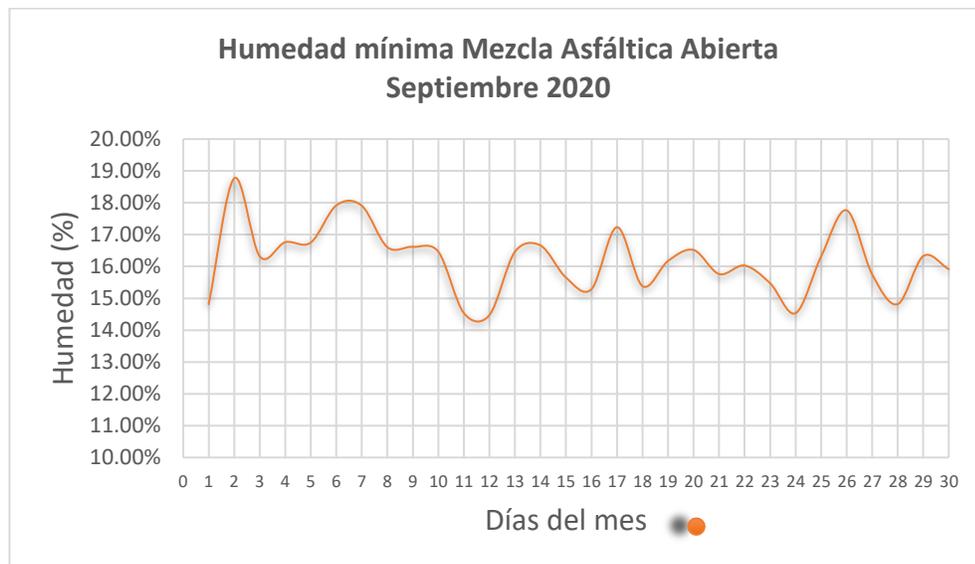
**Figura 54**

*Humedad máxima mezcla asfáltica abierta mes de septiembre del 2020*



**Figura 55**

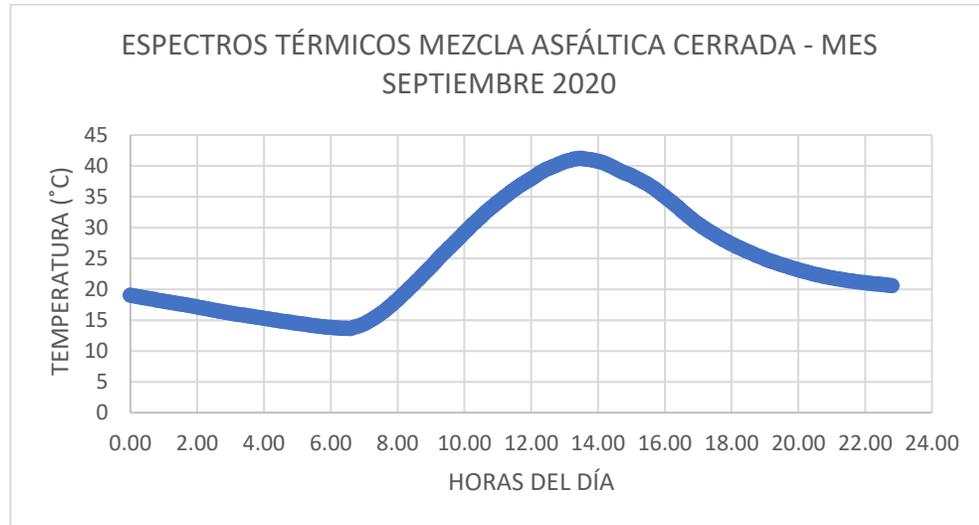
*Humedad mínima mezcla asfáltica abierta mes de septiembre del 2020*



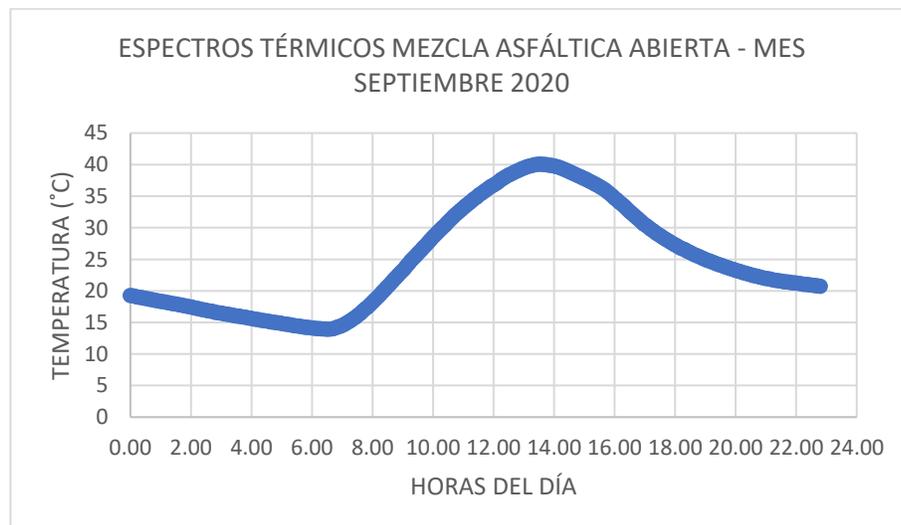
**Espectros térmicos.** Una vez obtenidos y procesados los datos tomados por los sensores se determinaron los espectros térmicos de las mezclas asfálticas los cuales nos indican el comportamiento térmico durante un periodo de tiempo, en el caso de nuestro estudio se tomaron los valores del día donde se tuvo la temperatura máxima registrada en cada mes. Los siguientes gráficos muestran los espectros térmicos de las mezclas asfálticas abiertas y cerradas del mes de septiembre, el resto de los gráficos se encuentran adjuntados en los anexos.

**Figura 56**

*Espectros térmicos de la mezcla asfáltica cerrada mes de septiembre del 2020*

**Figura 57**

*Espectros térmicos de la mezcla asfáltica abierta mes de septiembre del 2020*



Los espectros térmicos nos muestran la tendencia del comportamiento de la temperatura en un intervalo de tiempo (en nuestro caso las 24 horas del día). De acuerdo a las gráficas de espectros térmicos podemos decir que las temperaturas máximas se encuentran en el intervalo de 11:00 horas a 16:00 horas tanto en las mezclas asfálticas abiertas y cerradas; y que los espectros térmicos de las dos mezclas muestran el mismo comportamiento en su tendencia de temperaturas.

**Ecuación de Correlación.** Como la temperatura y la Radiación Solar tienen comportamientos similares, se decide hacer un estudio de correlación entre las dos variables.

La ecuación de Correlación se realizó con los datos de radiación obtenidos de la estación meteorológica de Tumbaco, debido a la cercanía con el lugar donde se plantaron los sensores para la medición de las temperaturas del pavimento. Se consideró el día con mayor radiación solar en cada uno de los meses en el lapso de 6H00 am a 13H00 ya que en este período de tiempo se presenta el valor máximo de radiación promedio. Se utilizó una hoja electrónica de Excel para realizar la ecuación de correlación para cada uno de los meses analizados, excepto para el mes de febrero. Las siguientes tablas muestran los datos a usar para el desarrollo de la ecuación de correlación para el mes de septiembre, el desarrollo de las ecuaciones para el resto de meses se encuentra adjuntada en anexos.

Tabla 78

Valores de Radiación del mes de septiembre

FECHA HORA (GMT-5)	RADIACION SOLAR	TEMPERATURA AIRE
	GLOBAL	( $\text{Å}^{\circ}\text{C}$ )
	( $\text{W}/\text{m}^2$ )	
	PROM	PROM
25/09/2020 11:00	1036.69	22
25/09/2020 10:00	983.74	21.9
25/09/2020 9:00	795.71	20.6
25/09/2020 8:00	545.31	19
25/09/2020 7:00	268.42	14.7
25/09/2020 6:00	59.8	11.7

La ecuación de Correlación se elaboró a partir de la tabla 78

Tabla 79

Procesamiento de datos para la elaboración de la ecuación de correlación

RADIACION SOLAR GLOBAL( $\text{W}/\text{m}^2$ ) PROM	Temperatura promedio Diaria 6:00 a 11:00	n	6
Y	X	$x^2$	xy
1036.69	22	484	22807.18
983.74	21.9	479.61	21543.91
795.71	20.6	424.36	16391.63
545.31	19	361	10360.89
268.42	14.7	216.09	3945.77
59.8	11.7	136.89	699.66
3689.670	109.900	2101.950	75749.040

Para calcular la ecuación de correlación se utiliza la ecuación 24

$$y = ax + b \quad (24)$$

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (25)$$

$$a = 91.81$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

$$(26)$$

$$b = -1066.76$$

Sustituyendo cada uno de los coeficientes la ecuación de correlación para el mes de septiembre es:

$$y = 91.81x - 1066.76$$

### Coefficiente de correlación Lineal

Tabla 80

Valores para la obtención del coeficiente de correlación lineal

RADIACIÓN SOLAR GLOBAL(W/m <sup>2</sup> ) PROM	Temperatura promedio Diaria 6:00 a 11:00	$\bar{x} = 18.3166667$ $\bar{y} = 614.945$				
		Y	X	x- $\bar{x}$	y- $\bar{y}$	(x- $\bar{x}$ ) <sup>2</sup>
1036.690	22.00	22.00	1036.690	484	1074726.16	22807.18
983.740	21.90	21.90	983.740	479.61	967744.39	21543.91
795.710	20.60	20.60	795.710	424.36	633154.4	16391.63
545.310	19.00	19.00	545.310	361	297363	10360.89
268.420	14.70	14.70	268.420	216.09	72049.3	3945.77
59.800	11.70	11.70	59.800	136.89	3576.04	699.66
3689.670	109.900			2101.95	3048613.29	75749.04

$$r = \frac{\sum(x-x)(y-y)}{\sqrt{\sum(x-x)^2} \sqrt{\sum(y-y)^2}} \quad (27)$$

$$r = 0.95$$

$$R^2 = 0.90$$

El mismo procedimiento se lo realiza para cada uno de los meses analizados, los demás cálculos se lo pueden visualizar en anexos.

### **Aplicación de la metodología SUPERPAVE**

#### ***Selección del Ligante Asfáltico Basado en el Grado de Desempeño (PG)***

**Grado de desempeño (PG).** Para la selección de los ligantes asfálticos según Miranda Calderón (2015), el clima es uno de los factores que más se debe considerar. De acuerdo al sistema SUPERPAVE existen 3 métodos para la elección del ligante asfáltico y son considerados por:

- Área geométrica: De acuerdo al clima, se elabora un mapa que indica el grado del ligante que debe usar el constructor.
- La temperatura del pavimento: El diseñador debe tener conocimiento de la temperatura del pavimento a utilizarse en el proyecto.
- La temperatura del aire: A partir de las temperaturas del aire se obtienen las temperaturas de diseño del pavimento.

**Tabla 81**

*Rangos para el grado PG según la especificación SUPERPAVE*

<b>Temperaturas Altas(°C) Intervalos de 6°C</b>	<b>Temperaturas Bajas (°C) Intervalos de 6°C</b>	<b>Temperaturas Promedio (°C) Intervalos de 3°C</b>
<b>PG 46</b>	-34,-40, -46	10, 7, 4
<b>PG 52</b>	-10, -16, -22, -28,-34,-40, -46	25, 22, 19, 16, 13, 10, 7
<b>PG 58</b>	-16, -22, -28, -34, -40	25, 22, 19, 16, 13
<b>PG 64</b>	-10, -16, -22, -28, -34, -40	31, 28, 25, 22, 19, 16
<b>PG 70</b>	-10, -16, -22, -28, -34, -40	34, 31, 28, 25, 22, 19
<b>PG 76</b>	-10, -16, -22, -28, -34	37, 34, 31, 28, 25
<b>PG 82</b>	-10, -16, -22, -28, -34	40, 37, 34, 31, 28

Fuente: Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes de SUPERPAVE. (Instituto del Asfalto como se citó en Miranda Calderón, 2015)

#### ***Efectos de la velocidad de carga en la selección del ligante***

Los pavimentos por lo general están sometidas a cargas vehiculares rápidas, pero las cargas vehiculares lentas o estacionarias pueden generar problemas en la carpeta asfáltica. Por este motivo, el ligante asfáltico deber tener mayor rigidez para evitar los efectos de la velocidad y para darle solución, el sistema SUPERPAVE establece que se debe incrementar 1 o 2 grados a la temperatura alta de manera conjunta con el volumen de tráfico y se debe establecer como estacionaria , baja y estándar a las condiciones de velocidad del vehículo (Bonilla Miranda, 2013).

**Tabla 82**

*Tabla para definir el aumento del PG para la temperatura máxima del pavimento*

Volumen de tránsito ESAL's (millones)	Condiciones de velocidad de vehículo		
	Estacionaria	Baja	Estándar
<0.3	----	----	----
0.3 -3.0	2	1	----
3.0-10.0	2	1	----
10.0-30.0	2	1	----
>30.0	2	1	1

Fuente: Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE (Instituto del Asfalto como se citó en Bonilla Miranda, 2013)

Según la guía AASHTO, como se citó en (Bonilla Miranda, 2013) establece lo siguiente que para el cálculo del ESAL se considera la ecuación 28.

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{día} * 365_{días} * LDF * DS * GF \quad (28)$$

Donde:

- $ESAL_{día}$ : número de ejes diarios de los vehículos totales
- LDF: factor de distribución de carril
- DS: distribución direccional
- GF: factor de crecimiento

El factor de crecimiento (GF) es una manera de predicción futura del tránsito, para determinar el factor se deben involucrar parámetros como el crecimiento vehicular y cambios potenciales en las distribuciones vehiculares; la cual se debe calcular con la ecuación 29.

$$GF = \frac{(1+r)^y - 1}{r} \quad (29)$$

Donde:

- r: razón de crecimiento anual del tránsito
- y: total de años

Para calcular  $ESAL_{día}$  se debe utilizar la ecuación 30

$$ESAL_{día} = TPDA * FC_{tipo\ vehículo} * \%_{tipo\ vehículo} \quad (30)$$

Donde:

- TPDA: es el tráfico promedio diario anual
- FC: factor de camión de cada vehículo

La pendiente del terreno rige el parámetro de velocidad, debido a que el factor de pendiente define el diseño geométrico de la vía, la cual define la velocidad de operación de los vehículos, por lo que la pendiente del terreno debería considerarse para el cálculo. (Yela Quijada, 2017)

### ***Temperatura del aire***

Según las investigaciones de los modelos SHRP Y LTPP, la temperatura del aire es la variable que más peso tuvo en los modelos de estimación para la obtención de la temperatura del pavimento, llegando a ser el factor con mayor correlación. Según investigaciones anteriores lo que más afecta a la variable de temperatura del pavimento es la nubosidad, la cobertura vegetal y la radiación solar por lo que la implementación del sistema SUPERPAVE ha permitido la disminución de la susceptibilidad a la deformación permanente del pavimento que se originan por las altas temperaturas (Bonilla Miranda, 2013).

### ***Base de datos climáticos***

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) cuenta con 519 estaciones meteorológicas, de los cuales se selecciona las estaciones que tengan una base de datos de registros diarios de temperatura ambiente de aproximadamente 20 años. Según Bonilla Miranda (2013), para una adecuada selección de las estaciones se debe considerar lo siguiente:

- Base de datos con registros actuales de los últimos 5 años: Se solicitó al INAMHI los datos diarios correspondientes al período del 2016 a 2020 de las estaciones meteorológicas que se encuentran activas y con información completa.
- Ubicación de las estaciones meteorológicas: Las estaciones deben encontrarse de manera dispersa para abarcar la mayor parte del territorio del país, por esta razón se considera las estaciones ubicadas en cada una de las regiones (Sierra, Costa, Amazonia e Insular), permitiendo garantizar una adecuada zonificación climática del pavimento para el respectivo estudio.
- Variación de Altura de las estaciones meteorológicas: También se debe considerar la altitud en la que se encuentran las estaciones, debido a que entre más rangos de altura se elija, mejor podremos conocer el comportamiento de las vías. En Ecuador se obtuvieron alturas desde los 4 hasta los 3661 m.s.n.m.

En la tabla 83, se muestran las estaciones meteorológicas usadas para el análisis de temperaturas máximas, mínimas y promedio, lo que permite especificar la zonificación climática en el territorio ecuatoriano.

Tabla 83

Estaciones meteorológicas de Ecuador utilizadas

Código	Nombre de Estación Meteorológica	Periodo		Altitud	Este	Norte
<b>REGIÓN COSTA</b>						
<b>Esmeraldas</b>						
<b>M1249</b>	Palesema	2016	2020	45	752410	144448
<b>M0156</b>	Quinindé	2016	2020	115	670148	35321
<b>Manabí</b>						
<b>M1217</b>	Bahía De Caráquez	2016	2020	12	567044	9927115
<b>M1233</b>	Cantagallo-Granja	2016	2020	64	530148	9857760
<b>M1208</b>	Teodomira	2016	2020	60	567865	9871317
<b>M0162</b>	Chone-U. Católica	2016	2020	36	607210	9926582
<b>Santo Domingo</b>						
<b>M0026</b>	Puerto Ila	2016	2020	319	683743	9945486
<b>M0025</b>	La Concordia	2016	2020	379	680259	9997260
<b>Santa Elena</b>						
<b>M1170</b>	Santa Elena-Universidad	2016	2020	13	513885	9753117
<b>Guayas</b>						
<b>M1271</b>	Guayaquil (Facultad Ccnn)	2016	2020	21	620401	9762704
<b>M5090</b>	La Lampada	2016	2020	35	666477	9720406
<b>M1253</b>	Puerto Hondo	2016	2020	4	608512	9757626
<b>M0037</b>	Milagro	2016	2020	23	655664	9765820
<b>M1207</b>	Nobol	2016	2020	7	608748	9789961
<b>Los Ríos</b>						
<b>M0006</b>	Pichilingue	2016	2020	120	667692	9881212
<b>El Oro</b>						
<b>M1246</b>	Las Lajas	2016	2020	435	604278	9580745
<b>REGIÓN SIERRA</b>						
<b>Carchi</b>						
<b>M0103</b>	San Gabriel	2016	2020	2860	186156	66860
<b>M0102</b>	El Ángel	2016	2020	3000	172186	68503
<b>Imbabura</b>						
<b>M0001</b>	Inguincho	2016	2020	3140	788521	28491
<b>M1240</b>	Ibarra	2016	2020	2256	819218	36491
<b>M0105</b>	Otavalo	2016	2020	2550	806122	26927
<b>Pichincha</b>						
<b>M1094</b>	Tomalon-Tabacundo	2016	2020	2790	805562	1235
<b>M0055</b>	Bicentenario	2016	2020	2790	779946	9984511

Continuación tabla

<b>Código</b>	<b>Nombre de Estación Meteorológica</b>	<b>Periodo</b>	<b>Altitud</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	
<b>M1273</b>	Lloa	2016	2020	3042	771001	9974588
<b>M0024</b>	Iñaquito	2016	2020	2789	779642	9980273
Cotopaxi						
<b>M0004</b>	Rumipamba-Salcedo	2016	2020	2685	767702	9887161
<b>M0124</b>	San Juan La Mana	2016	2020	215	695232	9898664
Tungurahua						
<b>M0258</b>	Querochaca(Uta)	2016	2020	2865	766446	9848761
Bolívar						
<b>M1107</b>	Laguacoto	2016	2020	2608	722693	9821453
Chimborazo						
<b>M1036</b>	Riobamba	2016	2020	2850	757542	9817383
Cañar						
<b>M0031</b>	Cañar	2016	2020	3083	728472	9717720
Azuay						
<b>M5089</b>	El Tablón-Las Cuevas	2016	2020	3661	686229	9689099
Loja						
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	2016	2020	1088	633765	9552922
REGIÓN ORIENTE						
Sucumbíos						
<b>M0203</b>	Reventador	2016	2020	1440	218754	9994806
<b>M1203</b>	Lumbaqui	2016	2020	580	240224	4486
Orellana						
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	2016	2020	185	455159	9898307
Napo						
<b>M0188</b>	Papallacta	2016	2020	3150	818218	9957878
Pastaza						
<b>M0008</b>	Puyo	2016	2020	956	170784	9833355
Morona Santiago						
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	2016	2020	1110	819809	9753224

### ***Metodología para la elaboración de mapas de desempeño con ArcGIS***

Para conocer el procedimiento de esta metodología, primero se debe tener en cuenta el concepto de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que como su nombre lo indica son sistemas utilizados para representar y categorizar geografías mediante programas computarizados que permiten visualizar y analizar la información espacial a la que hace referencia (ESRI, s. f.). Dicha información utiliza dos tipos de salida para la representación de los datos, el vectorial que normalmente se representa por medio de puntos, líneas y polígonos y la representación ráster que es por medio de arreglos matriciales. La Figura 58 muestra la representación gráfica de un sistema SIG (Miranda Calderón, 2015).

**Figura 58**

*Ejemplo de una representación geográfica (SIG)*



Fuente: (Corporación Cartográfica, s. f.)

El ráster como se mencionó anteriormente son arreglos matriciales de celdas, en el cual a cada celda se le asigna un valor para ser representado de manera gráfica mediante el uso de ecuaciones que permiten la combinación con otras matrices que tengan la misma ubicación y el mismo tamaño, en la figura 59 se visualiza un ejemplo haciendo uso de la superposición ráster (EERI, s. f.; Miranda Calderón, 2015)

**Figura 59**

*Ejemplo de operación empleando superposición ráster*

RASTER 1 3 X 3			RASTER 2 3 X 3			SUMA RASTER 1 + RASTER 2			RESTA RASTER 1 - RASTER 2		
3	2	5	2	3	5	5	5	10	1	-1	0
1	2	3	2	0	1	3	2	4	-1	2	2
7	1	0	1	2	0	8	3	0	6	-1	0

MÁXIMO (RASTER 1, RASTER 2)			MÍNIMO (RASTER 1, RASTER 2)			PROMEDIO (RASTER 1, RASTER 2)		
3	3	5	2	2	5	2,5	2,5	5
2	2	3	1	0	1	1,5	1	2
7	2	0	1	1	0	4	1,5	0

Fuente: (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, elaborado por el Ing. Jairo Sanabria Sandino; como se citó en Miranda Calderón, 2015)



Tabla 84

Estaciones proyectadas en la Zona 17S

Código	Nombre de Estación Meteorológica	Altitud	Norte	Este
<b>REGIÓN COSTA</b>				
<b>Esmeraldas</b>				
<b>M1249</b>	Palesema	45	10144447.90	752409.90
<b>M0156</b>	Quinindé	115	10035320.80	670147.90
<b>Manabí</b>				
<b>M1217</b>	Bahia De Caraquez	12	9927114.80	567043.70
<b>M1233</b>	Cantagallo-Granja	64	9857759.80	530148.40
<b>M1208</b>	Teodomira	60	9871317.00	567865.10
<b>M0162</b>	Chone-U. Catolica	36	9926581.90	607210.10
<b>Santo Domingo</b>				
<b>M0026</b>	Puerto Ila	319	9945485.90	683743.10
<b>M0025</b>	La Concordia	379	9997260.20	680258.70
<b>Santa Elena</b>				
<b>M1170</b>	Santa Elena-Universidad	13	9753117.00	513885.00
<b>Guayas</b>				
<b>M1271</b>	Guayaquil (Facultad Ccnn)	21	9762703.50	620400.60
<b>M5090</b>	La Lampada	35	9720406.10	666477.00
<b>M1253</b>	Puerto Hondo	4	9757626.30	608512.10
<b>M0037</b>	Milagro	23	9765819.80	655663.90
<b>M1207</b>	Nobol	7	9789961.40	608748.10
<b>Los Ríos</b>				
<b>M0006</b>	Pichilingue	120	9881212.10	667692.40
<b>El Oro</b>				
<b>M1246</b>	Las Lajas	435	9580745.10	604278.40
<b>REGIÓN SIERRA</b>				
<b>Carchi</b>				
<b>M0103</b>	San Gabriel	2860	10066882.34	854079.70
<b>M0102</b>	El Ángel	3000	10068509.66	840104.24
<b>Imbabura</b>				
<b>M0001</b>	Inguincho	3140	10028490.80	788520.90
<b>M1240</b>	Ibarra	2256	10036491.40	819217.60
<b>M0105</b>	Otavalo	2550	10026926.90	806121.80
<b>Pichincha</b>				
<b>M1094</b>	Tomalon-Tabacundo	2790	10001234.50	805561.60
<b>M0055</b>	Bicentenario	2790	9984510.80	779946.20
<b>M1273</b>	Lloa	3042	9974588.20	771001.10
<b>M0024</b>	Iñaquito	2789	9980273.10	779641.60

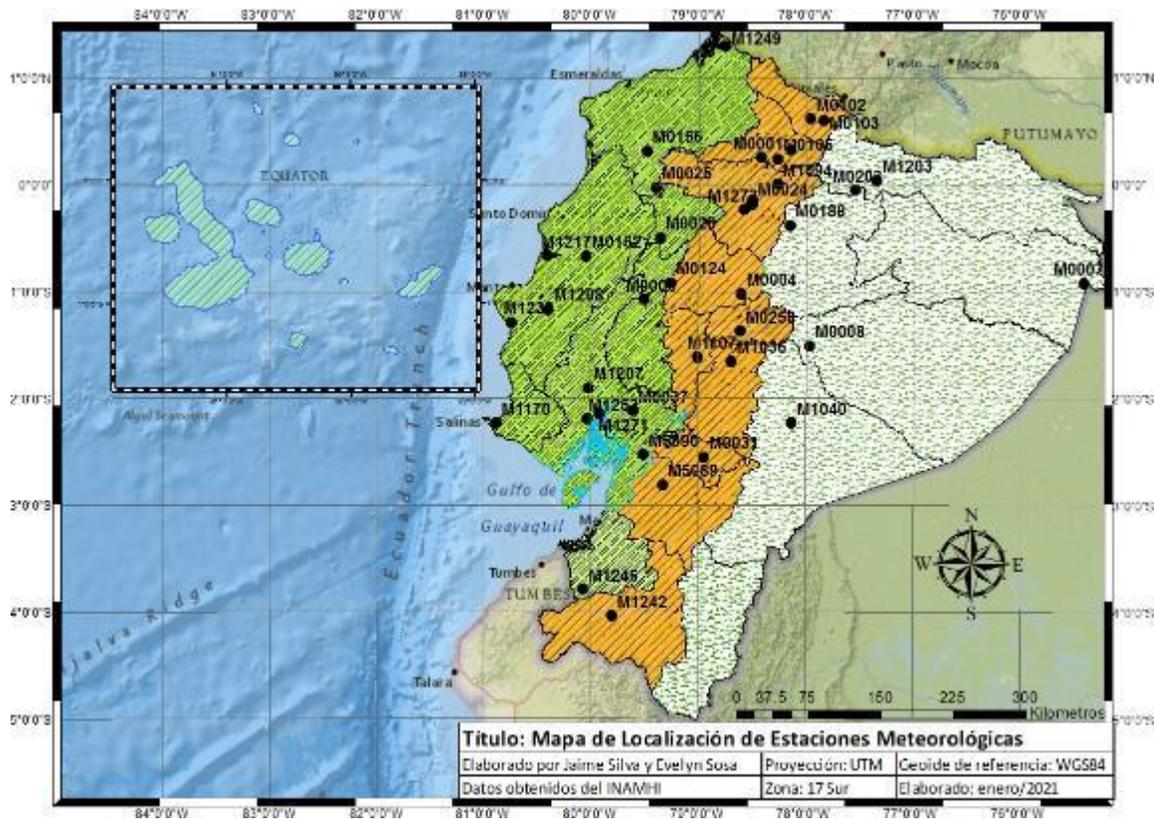
Continuación Tabla 84

<b>Código</b>	<b>Nombre de Estación Meteorológica</b>	<b>Altitud</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>
<b>Cotopaxi</b>				
<b>M0004</b>	Rumipamba-Salcedo	2685	9887161.00	767701.80
<b>M0124</b>	San Juan La Mana	215	9898663.60	695231.60
<b>Tungurahua</b>				
<b>M0258</b>	Querochaca(Uta)	2865	9848761.20	766450.60
<b>Bolívar</b>				
<b>M1107</b>	Laguacoto	2608	9821453	722693
<b>Chimborazo</b>				
<b>M1036</b>	Riobamba	2850	9817382.90	757542.00
<b>Cañar</b>				
<b>M0031</b>	Cañar	3083	9717719.90	728472.20
<b>Azuay</b>				
<b>M5089</b>	El Tablón-Las Cuevas	3661	9689098.90	686229.40
<b>Loja</b>				
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	1088	9552922.10	633764.60
<b>REGIÓN ORIENTE</b>				
<b>Sucumbíos</b>				
<b>M0203</b>	Reventador	1440	9994801.57	886733.48
<b>M1203</b>	Lumbaqui	580	10004491.91	908226.78
<b>Orellana</b>				
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	185	9897818.88	1123722.11
<b>Napo</b>				
<b>M0188</b>	Papallacta	3150	9957878.30	818217.80
<b>Pastaza</b>				
<b>M0008</b>	Puyo	956	9833341.9	838511.38
<b>Morona Santiago</b>				
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	1110	9753224.3	819809

Una vez proyectadas las coordenadas de cada estación a la zona UTM 17 sur, se procede al procesamiento de la información con la ayuda del programa ArcGIS para su representación gráfica, en la figura 61 se puede apreciar la distribución de cada estación en el territorio ecuatoriano.

Figura 61

Mapa de Ubicación de las Estaciones Meteorológicas

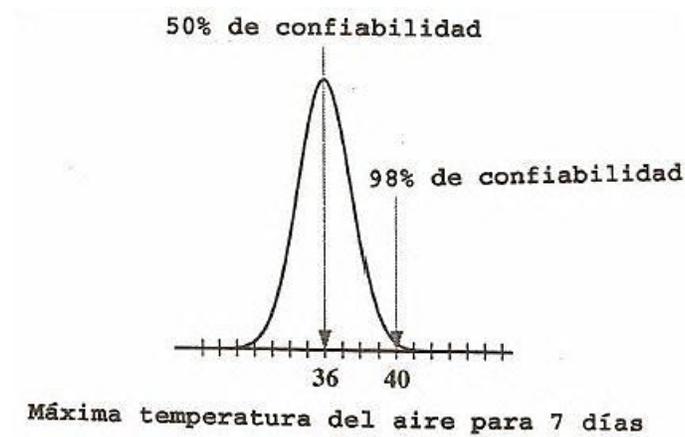


**Confiabilidad.** Dentro del sistema SUPERPAVE, se considera un porcentaje de confiabilidad a los valores de la temperatura del aire, con el objeto de que el diseñador pueda definir la probabilidad para un año establecido el cual no debe exceder la temperatura de diseño. La confiabilidad se basa en la desviación estándar como se muestra en el ejemplo de la figura 62 siendo una temperatura máxima de 36°C y una desviación estándar de 2°C. Si se escoge una confiabilidad de 50% existe una probabilidad de 50% de que la temperatura real supere los 36°C, pero también se puede

visualizar que existe una probabilidad del 2% de que la temperatura supere los 40°C (Crespin et al., 2012).

**Figura 62**

*Curva de distribución de frecuencias de datos de temperatura*



Fuente: (Instituto del Asfalto; como se citó en Crespin et al., 2012)

Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta según el sistema SUPERPAVE, es que el porcentaje de confiabilidad que está relacionado con las cargas vehiculares o de tráfico, el estado de la red vial, los costos y la disponibilidad del cemento asfáltico a utilizarse. Existen países donde se ha utilizado la confiabilidad para el desarrollo de mapas de grado de desempeño, pero no se ha considerado uno de los factores más importantes como es el tránsito haciendo que adopten un valor de 98% de confiabilidad, lo cual con lleva a la selección de ligantes asfálticos con grado de desempeño altos. Esto provoca que haya una pérdida de flexibilidad a la hora de escoger un ligante, debido a que pueden existir zonas en las que los requerimientos no necesitan de grado de desempeño muy alto, esto puede darse por lo general en urbanizaciones en donde la carga de tráfico es baja (Bonilla Miranda, 2013).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, es recomendable trabajar con los valores de confiabilidad del 50% debido a que está asociado con un nivel bajo y medio de tránsito y a una confiabilidad del 85% que representa el nivel alto de tránsito. En la tabla 102 se define la desviación estándar de acuerdo a la confiabilidad.

**Tabla 85**

*Valores de desviación estándar según el porcentaje de confiabilidad*

<b>Confiabilidad (%)</b>	<b>Desviación normal estándar (Z)</b>
<b>50</b>	0
<b>85</b>	1.037

Fuente: (Bonilla Miranda, 2013)

Para el cálculo de los valores de distribución normal estándar se utiliza la ecuación

$$X = \bar{X} \pm Z * \sigma \quad (31)$$

Donde:

- $\bar{X}$ : valor promedio de la variable
- Z: desviación normal estándar
- $\sigma$ : valor de la desviación estándar del conjunto de datos
- X: valor que se desea conocer de la confiabilidad

#### **Obtención Temperaturas del aire a diferentes niveles de confiabilidad**

Para el procesamiento de datos de toda la información otorgada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), se requiere hacer uso del programa Excel, el cual nos va a permitir realizar el reordenamiento de los datos y los cálculos necesarios para las 39 estaciones meteorológicas y de esta forma definir los

valores de temperaturas máximas, mínimas y promedios del aire a diferentes porcentajes de confiabilidad en este caso para el 50% y 85%.

**Temperatura Máxima del aire.** Según Bonilla Miranda (2013), para calcular la temperatura máxima por año de cada estación meteorológica, se debe obtener un promedio de las temperaturas de los siete días consecutivos más calientes. A este cálculo se implementa la media móvil, debido a que los datos se encuentran ordenados y se puede calcular el promedio de temperatura máxima de todos los subgrupos de siete días obtenidos en un año. El método SUPERPAVE recomienda utilizar la Ecuación

$$T_{m\acute{a}x_{aire}} = \frac{\sum_{i=1}^{i+6} T_i}{7} = \frac{T_i + T_{i+1} + T_{i+2} + T_{i+3} + T_{i+4} + T_{i+5} + T_{i+6}}{7} \quad (32)$$

Donde:

- $T_{m\acute{a}x_{aire}}$ : serie sobre la cual se obtiene el promedio de los siete días consecutivos de temperatura.
- $T_i$ : registro diario de temperatura máximo de la estación meteorológica

Una vez obtenido el valor anterior, con la ecuación 33 se calcula la desviación estándar de los siete días más calientes.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{T} - T)^2}{n-1}} \quad (33)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\bar{T} - T_1)^2 + (\bar{T} - T_2)^2 + (\bar{T} - T_3)^2 + (\bar{T} - T_4)^2 + (\bar{T} - T_5)^2 + (\bar{T} - T_6)^2 + (\bar{T} - T_7)^2}{6}} \quad (34)$$

Donde:

- $T_i$ : registro diario individual de los siete días más calientes del año.
- $n$ : registro total de registros diarios a considerar, en este caso son 7
- $\bar{T}$ : mayor de los promedios obtenidos de la ecuación 32

La tabla 86 muestra los valores obtenidos de la temperatura máxima a los diferentes porcentajes de confiabilidad.

**Tabla 86**

*Valores de Temperatura máxima a diferentes porcentajes de confiabilidad*

Código	Nombre Estación Meteorológica	$\Sigma$ Desviación Estándar 7 días	Máx. Temperatura Aire °C MAX	Máx. Temperatura Aire °C MAX
			50.00%	85.00%
M1249	Palesema	0.62	31.86	32.50
M0156	Quinindé	0.82	33.57	34.42
M1217	Bahía De Caráquez	0.83	32.44	33.30
M1233	Cantagallo-Granja	0.87	32.19	33.09
M1208	Teodomira	0.39	33.46	33.86
M0162	Chone-U. Católica	0.80	33.30	34.13
M0026	Puerto Ila	1.17	31.24	32.46
M0025	La Concordia	2.04	31.71	33.83
M1170	Santa Elena-Universidad	0.90	31.71	32.65
M1271	Guayaquil (Facultad Ccnn)	0.89	35.39	36.31
M5090	La Lampada	0.75	35.39	36.16
M1253	Puerto Hondo	0.86	35.34	36.23
M0037	Milagro	0.89	31.29	32.21
M1207	Nobol	0.86	34.86	35.75
M0006	Pichilingue	1.03	31.97	33.04
M1246	Las Lajas	0.13	29.63	29.76
M0103	San Gabriel	0.82	21.59	22.44
M0102	El Ángel	0.96	21.10	22.10
M0001	Inguincho	0.49	19.04	19.54
M1240	Ibarra	0.77	27.77	28.57
M0105	Otavalo	0.96	25.67	26.67
M1094	Tomalon-Tabacundo	0.86	26.86	27.75
M0055	Bicentenario	1.08	23.16	24.28
M1273	Lloa	0.76	19.63	20.42
M0024	Iñaquito	0.81	28.71	29.56
M0004	Rumipamba-Salcedo	1.31	25.54	26.90
M0124	San Juan La Mana	0.86	33.87	34.76

Continuación de la tabla 86

<b>M0258</b>	<b>Querochaca</b>	<b>0.96</b>	<b>22.70</b>	<b>23.70</b>
<b>M1107</b>	Laguacoto	0.81	24.03	24.87
<b>M1036</b>	Riobamba	0.74	25.29	26.05
<b>M0031</b>	Cañar	0.87	19.29	20.19
<b>M5089</b>	El Tablón-Las Cuevas	0.76	16.64	17.43
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	0.55	30.20	30.77
<b>M0203</b>	Reventador	0.53	28.74	29.29
<b>M1203</b>	Lumbaqui	0.84	35.90	36.77
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	0.95	34.33	35.31
<b>M0188</b>	Papallacta	0.70	17.74	18.47
<b>M0008</b>	Puyo	0.78	31.54	32.35
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	0.61	30.37	31.00

Con cada uno de los datos de temperatura máxima tabulados, se procede a digitalizar cada uno de los valores en el programa ArcGIS para tener una representación gráfica de todos los datos obtenidos, y de esta forma elaborar el mapa de temperaturas viales máximas a diferentes porcentajes de confiabilidad.

Figura 63

Mapa de Temperaturas Viales Máximas al 50% de confiabilidad

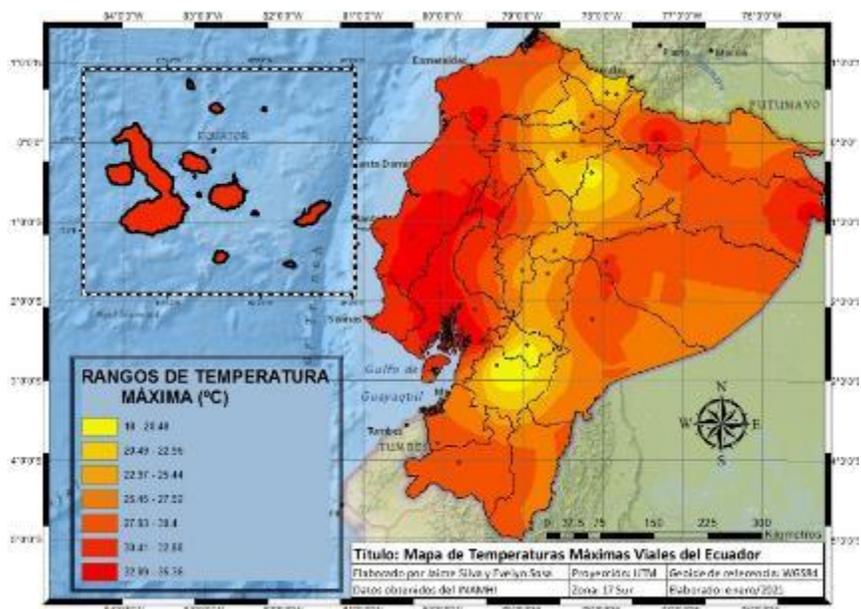
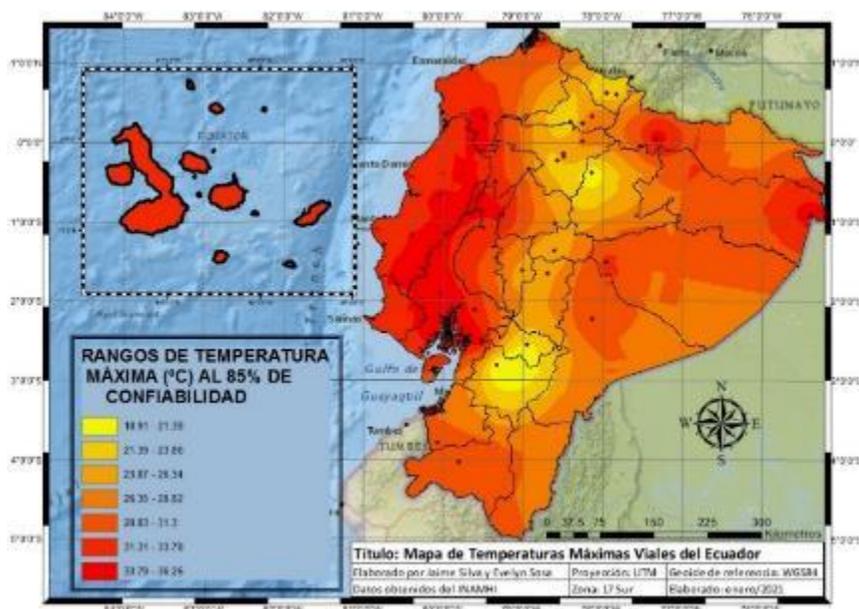


Figura 64

Mapa de Temperaturas Viales Máximas al 85% de confiabilidad



**Temperatura mínima y Temperatura promedio del aire.** De acuerdo a Bonilla Miranda (2013), el método SUPERPAVE establece un procedimiento más simple para el cálculo de estas dos temperaturas, debido que solo se debe calcular la temperatura mínima, la temperatura promedio y la desviación estándar para cada año de registro. La ecuación 35 indica como se obtiene el promedio y la ecuación 36 la desviación estándar.

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (35)$$

Donde:

- $\bar{T}$ : temperatura promedio (temperatura mínima o promedio del aire)
- $\sum_{i=1}^n T_i$ : sumatoria del total de los registros de temperatura
- $n$ : número total de registros de la base de datos

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{T} - T)^2}{n-1}} \quad (36)$$

Donde:

- $T_i$ : registro diario individual de la base de datos de cada estación meteorológica
- $n$ : número total de registros de la base de datos
- $\bar{T}$ : temperatura promedio, obtenida en la ecuación 35

De igual manera obtenido cada uno de los datos de temperatura mínima y promedio tabulados, se procede a digitalizar cada uno de los valores en el programa ArcGIS para tener una representación gráfica de todos los datos obtenidos, y de esta forma elaborar el mapa de temperaturas viales mínimas diferentes porcentajes de confiabilidad. La temperatura promedio solo se la realizó a un nivel de confiabilidad del 50%.

Tabla 87

Valores de Temperatura máxima a diferentes porcentajes de confiabilidad

Código	Nombre Estación Meteorológica	$\sigma$ Desviación Estándar	Mín.	Mín.
			Temperatura Aire °C	Temperatura Aire °C
			50.00%	85.00%
M1249	Palesema	0.48	19.02	18.52
M0156	Quinindé	0.71	14.54	13.80
M1217	Bahía De Caráquez	0.73	17.56	16.80
M1233	Cantagallo-Granja	0.4	14.04	13.62
M1208	Teodomira	0.68	17.06	16.35
M0162	Chone-U. Católica	0.97	12.35	11.35
M0026	Puerto Ila	0.88	18.64	17.73
M0025	La Concordia	1.38	12.43	11.00
M1170	Santa Elena-Universidad	0.8	17.96	17.13
M1271	Guayaquil (Facultad Ccnn)	0.45	19.00	18.53
M5090	La Lampada	0.29	18.66	18.36
M1253	Puerto Hondo	0.58	17.94	17.34
M0037	Milagro	0.46	19.56	19.08
M1207	Nobol	0.85	14.71	13.83
M0006	Pichilingue	0.71	17.58	16.84
M1246	Las Lajas	0.65	14.70	14.03
M0103	San Gabriel	0.84	1.22	0.35
M0102	El Ángel	0.53	4.24	3.69
M0001	Inguincho	0.58	2.58	1.98
M1240	Ibarra	0	1.00	1.00
M0105	Otavalo	0.84	1.80	0.93
M1094	Tomalon-Tabacundo	0.54	4.88	4.32
M0055	Bicentenario	0.95	3.90	2.91
M1273	Lloa	0	1.00	1.00
M0024	Iñaquito	0.53	6.82	6.27
M0004	Rumipamba-Salcedo	0.09	0.96	0.87
M0124	San Juan La Mana	0.36	18.04	17.67

Continuación de tabla 87

<b>M0258</b>	Querochaca	1.61	12.76	11.09
<b>M1107</b>	Laguacoto	0	2.00	2.00
<b>M1036</b>	Riobamba	0	1.00	1.00
<b>M0031</b>	Cañar	0	3.00	3.00
<b>M5089</b>	El Tablón-Las Cuevas	0.89	2.84	1.92
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	0.61	12.50	11.87
<b>M0203</b>	Reventador	0	9.00	9.00
<b>M1203</b>	Lumbaqui	0.83	14.04	13.18
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	0.28	17.78	17.49
<b>M0188</b>	Papallacta	0.25	0.67	0.41
<b>M0008</b>	Puyo	1.14	13.54	12.36
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	0.48	11.32	10.82

De la misma forma, una vez obtenido cada uno de los datos de temperatura mínima tabulados, se procede a digitalizar cada uno de los valores en el programa ArcGIS para tener una representación gráfica de todos los datos obtenidos, y de esta forma elaborar el mapa de temperaturas viales mínimas a diferentes porcentajes de confiabilidad.

Figura 65

Mapa de Temperaturas Viales Mínimas al 50% de confiabilidad

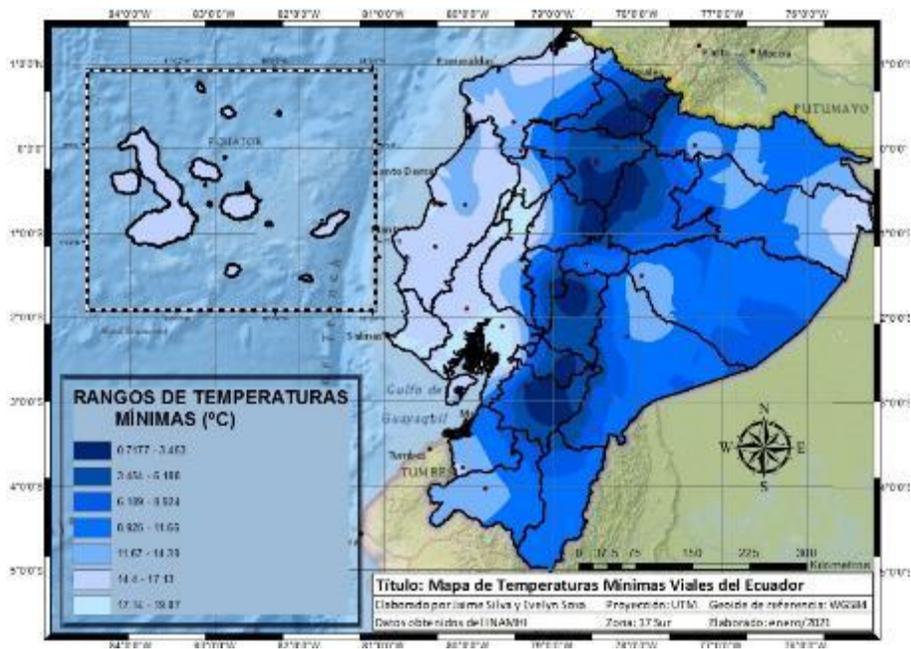


Figura 66

Mapa de Temperaturas Viales Mínimas al 85% de confiabilidad

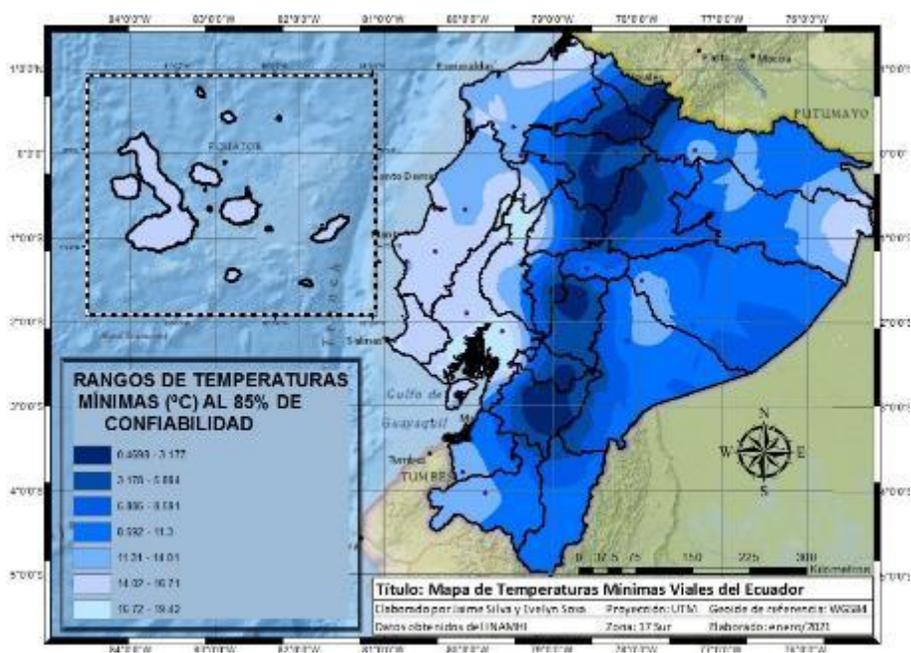


Tabla 88

*Valores de Temperatura promedio a diferentes porcentajes de confiabilidad*

<b>Código</b>	<b>Nombre Estación Meteorológica</b>	<b>Promedio de Temperatura Aire °C Prom</b>
<b>M1249</b>	Palesema	25.51
<b>M0156</b>	Quinindé	25.29
<b>M1217</b>	Bahía De Caráquez	25.04
<b>M1233</b>	Cantagallo-Granja	22.48
<b>M1208</b>	Teodomira	19.86
<b>M0162</b>	Chone-U. Católica	24.63
<b>M0026</b>	Puerto Ila	24.16
<b>M0025</b>	La Concordia	24.28
<b>M1170</b>	Santa Elena-Universidad	20.78
<b>M1271</b>	Guayaquil (Facultad Ccn)	26.53
<b>M5090</b>	La Lampada	25.36
<b>M1253</b>	Puerto Hondo	25.51
<b>M0037</b>	Milagro	25.84
<b>M1207</b>	Nobol	25.66
<b>M0006</b>	Pichilingue	24.16
<b>M1246</b>	Las Lajas	24.38
<b>M0103</b>	San Gabriel	12.07
<b>M0102</b>	El Ángel	10.37
<b>M0001</b>	Inguincho	10.83
<b>M1240</b>	Ibarra	16.34
<b>M0105</b>	Otavalo	15.03
<b>M1094</b>	Tomalón-Tabacundo	14.79
<b>M0055</b>	Bicentenario	14.10
<b>M1273</b>	Lloa	9.43
<b>M0024</b>	Iñaquito	15.00
<b>M0004</b>	Rumipamba-Salcedo	13.66
<b>M0124</b>	San Juan La Mana	24.32
<b>M0258</b>	Querochaca	3.60
<b>M1107</b>	Laguacoto	13.85
<b>M1036</b>	Riobamba	13.71
<b>M0031</b>	Cañar	11.41
<b>M5089</b>	El Tablón-Las Cuevas	8.14

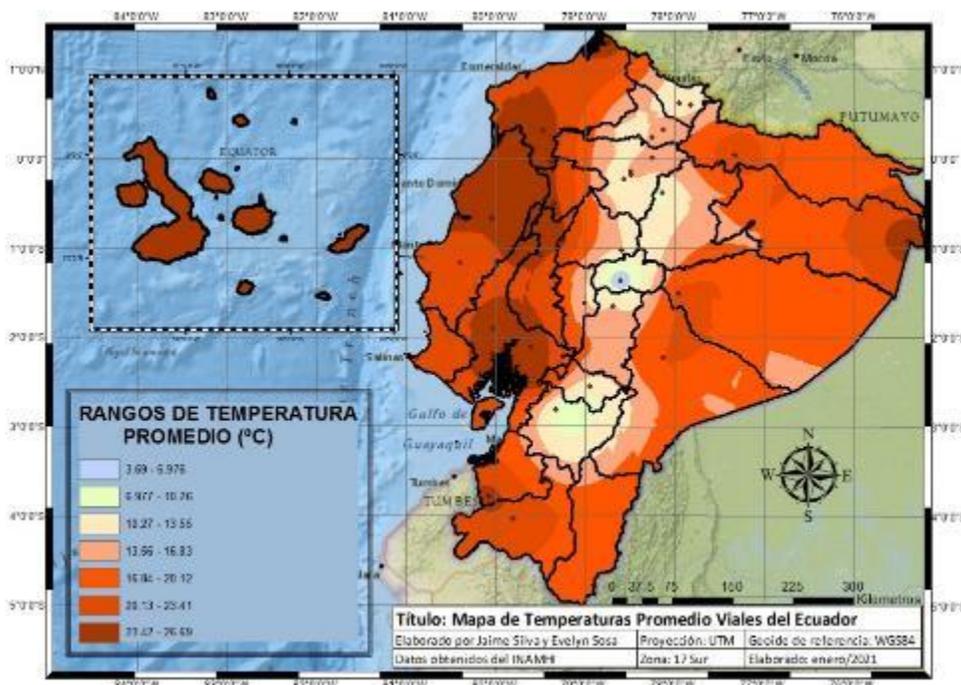
Continuación de tabla 88

<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	<b>22.37</b>
<b>M0203</b>	Reventador	19.85
<b>M1203</b>	Lumbaqui	23.65
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	25.51
<b>M0188</b>	Papallacta	9.52
<b>M0008</b>	Puyo	20.93
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	19.99

Finalmente, obtenido cada uno de los datos de temperatura promedio tabulados, se procede a digitalizar cada uno de los valores en el programa ArcGIS para tener una representación gráfica de todos los datos obtenidos, y de esta forma elaborar el mapa de temperaturas viales promedio a un porcentaje de confiabilidad del 50%.

**Figura 67**

*Mapa de Temperaturas Viales Promedio al 50% de confiabilidad*



### ***Modelos de Predicción de La Temperatura del Pavimento***

Para poder definir el grado de desempeño se debe partir de los datos de temperatura máxima y mínima del pavimento. El sistema SUPERPAVE en sus investigaciones para clasificar el grado de desempeño, elaboró modelos para estimar la temperatura máxima y mínima del pavimento a partir de la temperatura del aire y la ubicación geográfica (Miranda Calderón, 2015).

El modelo denominado SHRP fue desarrollado por SUPERPAVE, el cual consiste la selección del ligante asfáltico a partir de la temperatura máxima pavimento obtenido de los siete días más calientes de la temperatura del aire, y la temperatura mínima del pavimento que se calcula a partir de la temperatura mínima del aire (Bonilla Miranda, 2013).

Según Miranda Calderón (2015), se creó una base de datos con las temperaturas del aire y temperaturas del pavimento a partir de las estaciones meteorológicas de Estados Unidos, lo que ayudó al desarrollo de nuevos modelos LTPP para la predicción de las temperaturas del pavimento, esto permitirá poder cuantificar las diferencias con los modelos SHRP ya existentes y comparar los valores de grado de desempeño calculados por los modelos SHRP y LTPP.

Estos nuevos modelos elaborados por LTPP definieron tres características importantes al evaluar la temperatura del pavimento según Bonilla Miranda (2013):

- Validación de nuevos modelos para la relación entre condiciones ambientales y condiciones de los materiales del pavimento.
- Unión de la información adquirida de puntos de respuesta del pavimento en diferentes condiciones críticas de diseño.
- Conocimiento del impacto que provocaron los cambios ejecutados con los nuevos modelos creados por el LTPP.

Dentro del modelo LTPP se adiciona información de localización geográfica, de elevación las estaciones meteorológicas, el espesor del pavimento y la base de datos climáticos de estaciones que se encuentran cerca de las estaciones de registro (Bonilla Miranda, 2013).

**Modelo desarrollado por SRHP.** Por medio de las mediciones realizadas en campo, se logra encontrar un modelo para determinar la temperatura de la superficie del pavimento y, consecutivamente, un modelo para establecer igualmente la temperatura del pavimento, pero en este caso en función de la profundidad. Se consideran situaciones evaluadas en modelos teóricos. Se toma un coeficiente de absorción solar de 0.9, transmisión de radiación en el aire de 0.81, radiación atmosférica de 0.7 y velocidad del viento de 45 m/s. De esta manera, la ecuación elaborada por el modelo SHRP es descrita a continuación (Alonso Aenlle et al., s. f.):

Ecuación 37 para el cálculo de la temperatura máxima del pavimento (modelo SHRP)

$$T_{20mm} = (T_{aire} - 0.00618 \text{ lat}^2 + 0.22890 \text{ lat} + 42.2)(0.9545) - 17.78 + Z\sigma \quad (37)$$

Donde:

- $T_{20mm}$ : temperatura máxima de diseño a una profundidad de 20 mm.
- $T_{aire}$ : temperatura máxima promedio en el período de siete días (°C)
- $lat$ : latitud geográfica de la ubicación del proyecto en grados

Para la temperatura mínima de diseño, se considera igual a la temperatura mínima media del aire que corresponde con la temperatura de la superficie. Sin embargo, se utiliza la siguiente ecuación para obtener la temperatura mínima de diseño en función de la profundidad: (Alonso Aenlle et al., s. f.)

Ecuación 38 para el cálculo de la temperatura mínima del pavimento (modelo SHRP)

$$T_{pav} = T_{aire} + 0.051H - 0.000063 H^2 - Z\sigma \quad (38)$$

Donde:

- $T_{pav}$ : temperatura mínima del pavimento bajo la superficie.
- $T_{aire}$ : temperatura mínima del aire (°C)
- H: profundidad desde la superficie (mm)
- Z: coeficiente de la distribución normal, Z=0 para un 50% de confiabilidad y Z=1.037 para un 85% de confiabilidad

**Desviación estándar de la temperatura máxima (°C).** Las variables Z y  $\sigma$ , simbolizan la desviación estándar de las temperaturas y el coeficiente de distribución normal, las cuales están relacionadas con la confiabilidad que les otorgó a los cálculos. Estas dos variables no intervienen cuando el porcentaje de confiabilidad es del 50%, tanto para temperaturas máximas como mínimas. Por otro lado, si se utiliza el valor de 85% de confiabilidad el método SUPERPAVE, recomienda para determinar la temperatura mínima (YY) restarle 1.036 la desviación estándar (Z=1.036) y sumar este mismo valor cuando se va a obtener el valor de temperatura máxima. (Alonso Aenlle et al., s. f.)

**Modelo desarrollado por FHWA (LTPP).** The Federal Highway Administration o FHWA (por sus siglas en inglés) desarrolló el software llamado Long Term Pavement Performance también conocido por LTPP (por sus siglas en inglés) Bind SUPERPAVE, el cual integra variables más significativas como el área geográfica, la profundidad, la

temperatura del pavimento y la temperatura del aire; dichos factores logran la correcta elección de un asfalto. (Alonso Aenlle et al., s. f.)

La tabla 89 muestra las características de cada una de las variables que integran el modelo LTPP

**Tabla 89**

*Variables más significativas del modelo LTPP*

Variable	Característica
<b>Temperatura del aire</b>	Esta variable tiene la mayor correlación con la temperatura del pavimento, su relación es lineal.
<b>Profundidad</b>	Es la última variable en tener una correlación considerable con la temperatura del pavimento; su relación es no lineal, se utiliza una variable logarítmica para su ajuste
<b>Latitud</b>	Esta variable cuenta con una alta correlación con la temperatura del pavimento; su relación es no lineal, por lo que se utiliza una relación cuadrática para su ajuste

Fuente: BONILLA MIRANDA, Elías. Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país. P.105 (Yela Quijada, 2017)

La ecuación 39 es la fórmula establecida por el modelo LTPP para encontrar la temperatura máxima de diseño del pavimento.

Ecuación 39 para el cálculo de la temperatura máxima del pavimento (modelo LTPP)

$$T_{pav,h} = 54.32 + 0.78T_{aire} - 0.00025 lat^2 - 15.14 \log_{10}(H + 25) + Z(9 + 0.61\sigma_{aire}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

Donde:

- $T_{pav,h}$ : temperatura máxima del pavimento.
- $T_{aire}$ : temperatura máxima del aire (°C)
- lat: latitud geográfica de la ubicación del proyecto en grados
- H: profundidad desde la superficie (mm)
- Z: coeficiente de la distribución normal, Z=0 para un 50% de confiabilidad y Z=1.037 para un 85% de confiabilidad

La ecuación 40 es la fórmula establecida por el modelo LTPP para encontrar la temperatura mínima de diseño del pavimento.

$$T_{pav,h} = -1.56 + 0.72T_{aire} - 0.004 \text{ lat}^2 + 6.26 \log_{10}(H + 25) - Z(4.4 + 0.52\sigma_{aire}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

Donde:

- $T_{pav,h}$ : temperatura máxima del pavimento.
- $T_{aire}$ : temperatura máxima del aire (°C)
- lat: latitud geográfica de la ubicación del proyecto en grados
- H: profundidad desde la superficie (mm)
- Z: coeficiente de la distribución normal, Z=0 para un 50% de confiabilidad y Z=1.037 para un 85% de confiabilidad

Con la utilización de los modelos SHRP y LTPP mencionados anteriormente, se puede obtener las temperaturas del pavimento con información de variables ya obtenidas, las cuales son:

- Las temperaturas del aire (máximos o mínimas), con su respectiva desviación estándar
- Confiabilidad del 50% y 85%
- La latitud de la estación meteorológica
- La profundidad se define a 20mm, este valor de profundidad es establecido por los modelos SHRP y LTPP.

Es importante saber que para el valor de la temperatura promedio del pavimento, se usan los valores obtenidos de la temperatura promedio del aire.

### ***Temperaturas del pavimento obtenidas a partir de los modelos SHRP y LTPP***

**Temperatura máxima del pavimento (SHRP y LTPP).** Utilizando las ecuaciones establecidas por los modelos de SHRP y LTPP se obtuvieron las temperaturas máximas del pavimento, para cada una de las provincias donde se encuentran las estaciones meteorológicas facilitadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INHAMI). Para obtener las temperaturas del pavimento por el modelo SHRP se utilizaron los valores de altitud y los valores obtenidos de las temperaturas máximas del aire a niveles de confiabilidad del 50% y 85%. Para el modelo LTPP se utilizaron las mismas variables y los mismos niveles de confiabilidad que en el modelo SHRP, cabe recalcar que la profundidad especificada para los dos modelos es de 20mm.

A partir de las coordenadas proyectadas (Norte y Este) se realizó un cambio de coordenadas geográficas (Latitud y longitud), debido a que los dos modelos integran el valor de latitud en sus fórmulas. La tabla 90 muestra los valores de Latitud y Longitud de cada una de las estaciones meteorológicas.

Tabla 90

*Estaciones Meteorológicas*

<b>CÓDIGO</b>	<b>Estación Meteorológica</b>	<b>ALTITUD</b>	<b>LONGITUD</b>	<b>LATITUD</b>
<b>M1249</b>	Palesema	45	78G 43' 54.00" W	1G 18' 21.00" N
<b>M0156</b>	Quinindé	115	79G 28' 15.90" W	0G 19' 09.99" N
<b>M1217</b>	Bahía De Caráquez	12	80G 23' 50.88" W	0G 39' 37.7608" S
<b>M1233</b>	Cantagallo-Granja	64	80G 43' 44.38" W	1G 17' 12.75" S
<b>M1208</b>	Teodomira	60	80G 23' 24.00" W	1G 09' 51.0012" S
<b>M0162</b>	Chone-U. Catolica	36	80G 02' 11.44" W	0G 39' 50.91" S
<b>M0026</b>	Puerto Ila	319	79G 20' 56.10" W	0G 29' 34.80" S
<b>M0025</b>	La Concordia	379	79G 22' 49.00" W	0G 01' 29.20" S
<b>M1170</b>	Santa Elena- Universidad	13	80G 52' 30.45" W	2G 14' 01.00" S
<b>M1271</b>	Guayaquil (Facultad Ccnn)	21	79G 55' 02.28" W	2G 08' 47.405" S
<b>M5090</b>	La Lampada	35	79G 30' 09.49" W	2G 31' 43.2804" S
<b>M1253</b>	Puerto Hondo	4	80G 01' 27.00" W	2G 11' 33.00" S
<b>M0037</b>	Milagro	23	79G 36' 01.00" W	2G 07' 5.0016" S
<b>M1207</b>	Nobol	7	80G 01' 20.00" W	1G 54' 0.00" S
<b>M0006</b>	Pichilingue	120	79G 29' 34.45" W	1G 04' 27.61" S
<b>M1246</b>	Las Lajas	435	80G 03' 39.15" W	3G 47' 33.2304" S
<b>M0103</b>	San Gabriel	2860	77G 49' 10.00" W	0G 36' 15.00" N
<b>M0102</b>	El Angel	3000	77G 56' 41.46" W	0G 37' 08.19" N
<b>M0001</b>	Inguincho	3140	78G 24' 28.80" W	0G 15' 27.00" N
<b>M1240</b>	Ibarra	2256	78G 07' 56.75" W	0G 19' 47.0388" N
<b>M0105</b>	Otavalo	2550	78G 15' 00.00" W	0G 14' 36.00" N
<b>M1094</b>	Tomalon- Tabacundo	2790	78G 15' 18.19" W	0G 00' 40.16" N
<b>M0055</b>	Bicentenario	2790	78G 29' 06.00" W	0G 08' 24" S
<b>M1273</b>	Lloa	3042	78G 33' 55.08" W	0G 13' 46.92" S
<b>M0024</b>	Iñaquito	2789	78G 29' 15.83" W	0G 10' 41.89" S
<b>M0004</b>	Rumipamba- Salcedo	2685	78G 35' 40.43" W	1G 01' 11.94" S
<b>M0124</b>	San Juan La Mana	215	79G 14' 44.00" W	0G 54' 59.00" S
<b>M0258</b>	Querochaca(Uta)	2865	78G 36' 19.94" W	1G 22' 01.56" S
<b>M1107</b>	Laguacoto	2608	78G 59' 54.02" W	1G 36' 51.76" S
<b>M1036</b>	Riobamba	2850	78G 41' 06.77" W	1G 39' 0.30" S

Continuación de la tabla 90

<b>M0031</b>	<b>Cañar</b>	<b>3083</b>	<b>78G 56' 42.70" W</b>	<b>2G 33' 07.95" S</b>
<b>M5089</b>	El Tablon-Las Cuevas	3661	79G 19' 28.70" W	2G 48' 41.72" S
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	1088	79G 47' 42.00" W	4G 02' 38.00" S
<b>M0203</b>	Reventador	1440	77G 31' 36.00" W	0G 2' 49" S
<b>M1203</b>	Lumbaqui	580	77G 20' 02.00" W	0G 02' 26" N
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	185	75G 24' 10.90" W	0G 55' 12.10" S
<b>M0188</b>	Papallacta	3150	78G 08' 29.00" W	0G 22' 50.20" S
<b>M0008</b>	Puyo	956	77G 57' 29.80" W	1G 30' 20.40" S
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	1110	78G 07' 30.02" W	2G 13' 47.35" S

La tabla 91 muestra los valores de las temperaturas máximas del pavimento de cada una de las estaciones de acuerdo al modelo SHRP y LTPP a niveles de confiabilidad del 50% y 85%

**Tabla 91**

*Temperaturas máximas del pavimento modelos SHRP y LTPP*

Código	Nombre Estación Meteorológica	T MAX	T MAX	T MAX	T MAX
		SHRP	SHRP	LTPP	LTPP
		50.00%	85.00%	50.00%	85.00%
<b>M1249</b>	Palesema	53.18	54.22	54.13	57.29
<b>M0156</b>	Quinde	54.61	55.65	55.47	58.66
<b>M1217</b>	Bahía De Caraquez	53.61	54.65	54.59	57.78
<b>M1233</b>	Cantagallo-Granja	53.51	54.55	54.39	57.58
<b>M1208</b>	Teodomira	54.68	55.72	55.38	58.51
<b>M0162</b>	Chone-U. Católica	54.43	55.46	55.26	58.44
<b>M0026</b>	Puerto Ila	52.43	53.46	53.66	56.91
<b>M0025</b>	La Concordia	52.78	53.81	54.03	57.55
<b>M1170</b>	Santa Elena-Universidad	53.23	54.27	54.02	57.21
<b>M1271</b>	Guayaquil (Facultad Ccnn)	56.72	57.75	56.88	60.07
<b>M5090</b>	La Lampada	56.79	57.83	56.88	60.04
<b>M1253</b>	Puerto Hondo	56.69	57.72	56.85	60.03
<b>M0037</b>	Milagro	52.80	53.84	53.68	56.88
<b>M1207</b>	Nobol	56.16	57.20	56.47	59.66
<b>M0006</b>	Pichilingue	53.24	54.28	54.23	57.45

Continuación de la tabla 91

<b>M1246</b>	Las Lajas	51.52	52.56	52.36	55.48
<b>M0103</b>	San Gabriel	43.23	44.27	46.13	49.31
<b>M0102</b>	El Ángel	42.77	43.81	45.75	48.95
<b>M0001</b>	Inguincho	40.73	41.77	44.14	47.28
<b>M1240</b>	Ibarra	49.08	50.12	50.95	54.12
<b>M0105</b>	Otavalo	47.06	48.09	49.31	52.52
<b>M1094</b>	Tomalon-Tabacundo	48.14	49.17	50.24	53.43
<b>M0055</b>	Bicentenario	44.63	45.67	47.35	50.58
<b>M1273</b>	Lloa	41.29	42.32	44.60	47.77
<b>M0024</b>	Iñaquito	49.95	50.98	51.69	54.87
<b>M0004</b>	Rumipamba-Salcedo	47.10	48.13	49.21	52.50
<b>M0124</b>	San Juan La Mana	55.03	56.06	55.71	58.90
<b>M0258</b>	Querochaca	43.86	44.89	46.99	50.20
<b>M1107</b>	Laguacoto	45.77	46.81	48.03	51.21
<b>M1036</b>	Riobamba	46.98	48.02	49.01	52.17
<b>M0031</b>	Cañar	41.43	42.46	44.32	47.51
<b>M5089</b>	El Tablón-Las Cuevas	38.95	39.99	42.25	45.42
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	52.11	53.15	52.81	55.95
<b>M0203</b>	Reventador	49.95	50.98	51.71	54.85
<b>M1203</b>	Lumbacqui	56.78	57.81	57.29	60.48
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	55.46	56.50	56.06	59.27
<b>M0188</b>	Papallacta	39.52	40.55	43.13	46.29
<b>M0008</b>	Puyo	52.92	53.96	53.89	57.06
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	51.95	52.98	52.97	56.12

De la misma forma, una vez obtenido cada uno de los datos de temperatura máxima del pavimento tabulados en los diferentes modelos y a diferentes niveles de confiabilidad, se procede a digitalizar cada uno de los valores en el programa ArcGIS para tener una representación gráfica de todos los datos obtenidos, y de esta forma elaborar el mapa de temperaturas máximas del pavimento en las diferentes regiones del Ecuador.

Figura 68

Mapa de temperaturas máximas del pavimento, modelo SHRP al 50% de confiabilidad

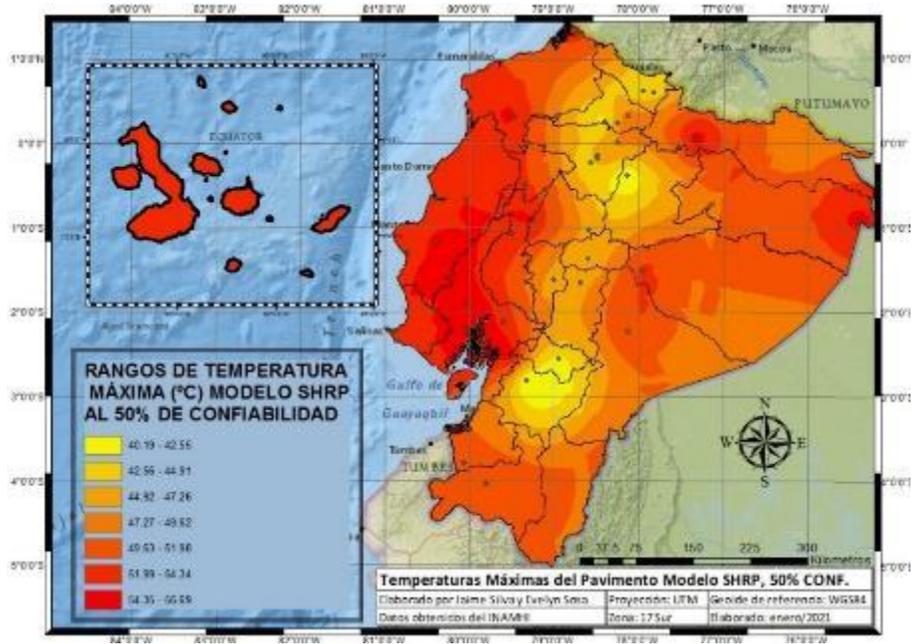
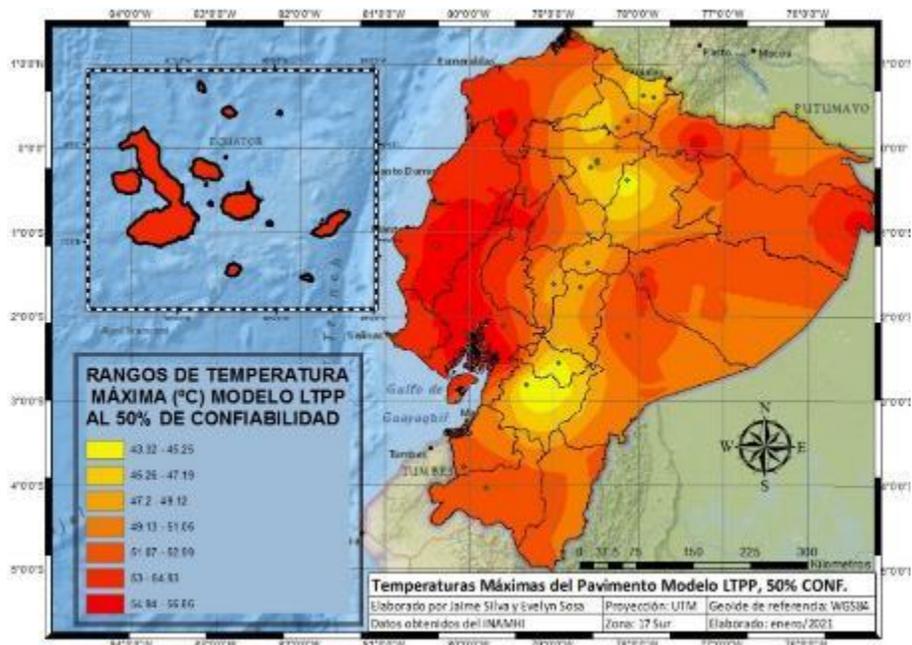


Figura 69

Mapa de temperaturas máximas del pavimento, modelo LTPP al 50% de confiabilidad



Como se puede apreciar en la figura 68 y la figura 69 la distribución de las temperaturas en todo el territorio ecuatoriano, se observa que la temperatura máxima del pavimento desarrollado por el modelo SHRP a un nivel de confiabilidad del 50% está en el rango de 54.35°C a 56.69°C en la Región Costa e Insular (Galápagos), la temperatura del pavimento en la Región Sierra ronda entre los 40.19 °C a 44.91°C y en la región Amazónica se encuentra entre los 47.27°C y 51.98°C; por otro lado el modelo LTPP a un nivel de confiabilidad del 50% nos presenta rangos de temperaturas máximas en la Región Costa e Insular (Galápagos) de 54.94°C y 56.86°C , en la Región Sierra temperaturas máximas que van desde los 43.32°C a los 45.25°C y en la Región Amazónica temperaturas máximas de 49.13°C a 52.99 °C.

**Figura 70**

*Mapa de temperaturas máximas del pavimento, modelo SHRP al 85% de confiabilidad*

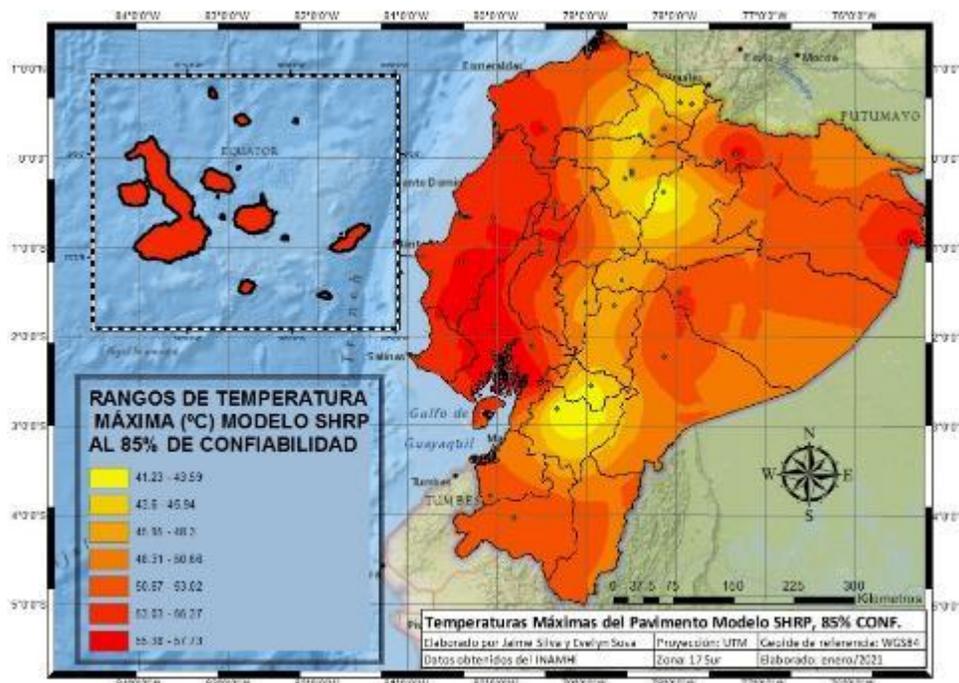
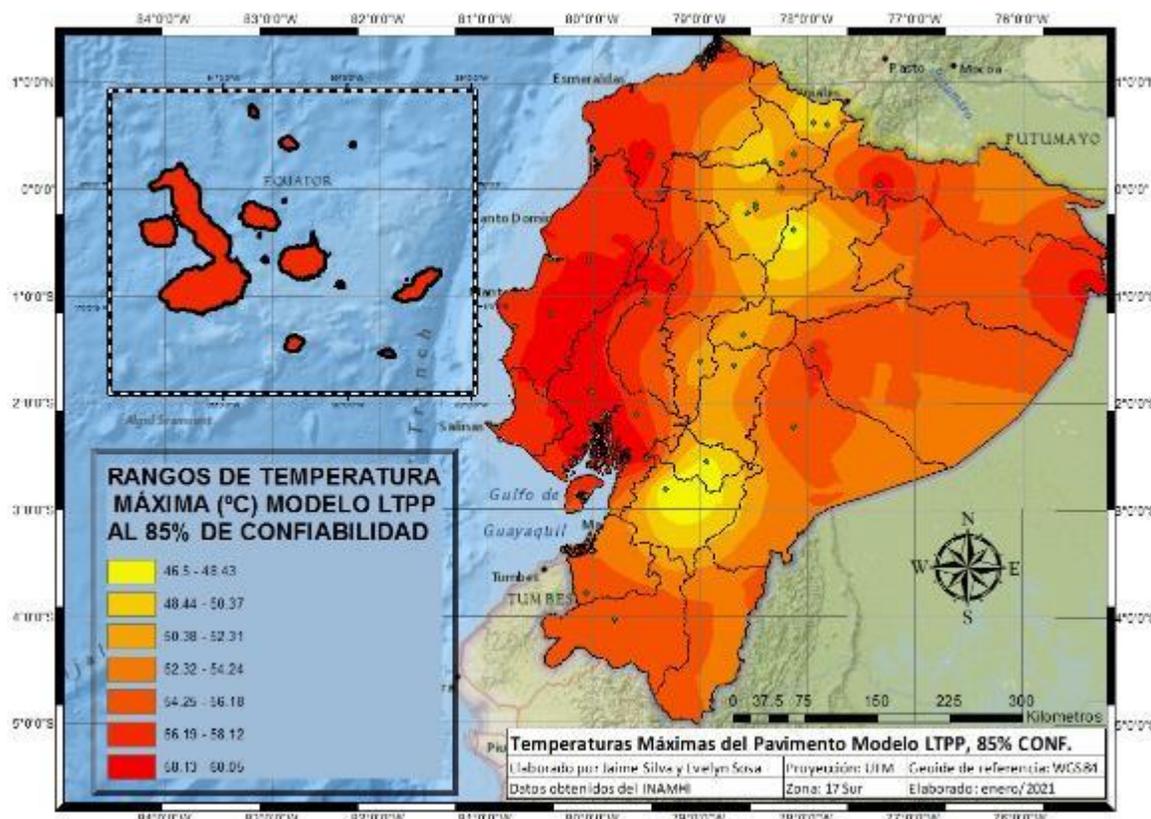


Figura 71

Mapa de temperaturas máximas del pavimento, modelo LTPP al 85% de confiabilidad



De igual manera en la figura 70 y la figura 71 se puede observar la distribución de las temperaturas máximas del pavimento en todo el territorio ecuatoriano, elaborado por el modelo SHRP a un nivel de confiabilidad del 85% las temperaturas máximas del pavimento están en el rango de 55.38°C a 57.73°C en la Región Costa e Insular (Galápagos), la temperatura del pavimento en la Región Sierra ronda entre los 41.23 °C a 45.94°C y en la región Amazónica se encuentra entre los 48.31°C y 53.02°C; por otro lado el modelo LTPP a un nivel de confiabilidad del 85% nos presenta rangos de temperaturas máximas en la Región Costa e Insular (Galápagos) de 58.13°C y 60.05°C ,

en la Región Sierra temperaturas máximas que van desde los 46.50°C a los 48.43°C y en la Región Amazónica temperaturas máximas de 52.32°C a 56.18°C.

**Temperatura mínima del pavimento (SHRP y LTPP).** Utilizando las ecuaciones establecidas por los modelos de SHRP y LTPP se obtuvieron las temperaturas mínimas del pavimento, para cada una de las provincias donde se encuentran las estaciones meteorológicas facilitadas por el (INHAMI). Para obtener las temperaturas del pavimento por el modelo SHRP se utilizaron los valores obtenidos de las temperaturas mínimas del aire a niveles de confiabilidad del 50% y 85%. Para el modelo LTPP se utilizaron los valores obtenidos de las temperaturas mínimas del aire y la latitud, a los mismos niveles de confiabilidad que en el modelo SHRP, cabe recalcar que la profundidad especificada para los dos modelos es de 20mm.

La tabla 92 muestra los valores de las temperaturas mínimas del pavimento de cada una de las estaciones de acuerdo al modelo SHRP y LTPP a niveles de confiabilidad del 50% y 85%.

**Tabla 92**

*Temperaturas mínimas modelos SHRP y LTPP*

Código	Nombre Estación Meteorológica	T MIN	T MIN	T MIN	T MIN
		SHRP	SHRP	LTPP	LTPP
		50.00%	85.00%	50.00%	85.00%
<b>M1249</b>	Palesema	20.01	18.98	22.48	20.28
<b>M0156</b>	Quinindé	15.53	14.50	19.26	17.02
<b>M1217</b>	Bahía De Caráquez	18.55	17.52	21.43	19.19
<b>M1233</b>	Cantagallo-Granja	15.03	14.00	18.90	16.70
<b>M1208</b>	Teodomira	18.05	17.02	21.07	18.84
<b>M0162</b>	Chone-U. Católica	13.35	12.31	17.68	15.39
<b>M0026</b>	Puerto Ila	19.64	18.60	22.21	19.94
<b>M0025</b>	La Concordia	13.43	12.39	17.74	15.33

Continuación de la tabla 92

<b>M1170</b>	Santa Elena-Universidad	18.95	17.92	21.72	19.46
<b>M1271</b>	Guayaquil (Facultad Ccnn)	19.99	18.96	22.47	20.27
<b>M5090</b>	La Lampada	19.65	18.62	22.22	20.04
<b>M1253</b>	Puerto Hondo	18.93	17.90	21.70	19.49
<b>M0037</b>	Milagro	20.55	19.52	22.87	20.67
<b>M1207</b>	Nobol	15.71	14.67	19.38	17.11
<b>M0006</b>	Pichilingue	18.57	17.54	21.45	19.21
<b>M1246</b>	Las Lajas	15.69	14.66	19.37	17.14
<b>M0103</b>	San Gabriel	2.21	1.18	9.67	7.40
<b>M0102</b>	El Ángel	5.23	4.20	11.84	9.63
<b>M0001</b>	Inguincho	3.57	2.54	10.65	8.43
<b>M1240</b>	Ibarra	1.99	0.96	9.51	7.33
<b>M0105</b>	Otavalo	2.79	1.76	10.09	7.82
<b>M1094</b>	Tomalon-Tabacundo	5.87	4.84	12.30	10.09
<b>M0055</b>	Bicentenario	4.89	3.86	11.60	9.31
<b>M1273</b>	Lloa	1.99	0.96	9.51	7.33
<b>M0024</b>	Iñaquito	7.81	6.78	13.70	11.49
<b>M0004</b>	Rumipamba-Salcedo	1.95	0.92	9.48	7.30
<b>M0124</b>	San Juan La Mana	19.03	18.00	21.78	19.59
<b>M0258</b>	Querochaca	13.75	12.72	17.98	15.49
<b>M1107</b>	Laguacoto	2.99	1.96	10.23	8.05
<b>M1036</b>	Riobamba	1.99	0.96	9.51	7.33
<b>M0031</b>	Cañar	3.99	2.96	10.95	8.77
<b>M5089</b>	El Tablon-Las Cuevas	3.83	2.80	10.83	8.56
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	13.49	12.46	17.78	15.56
<b>M0203</b>	Reventador	9.99	8.96	15.27	13.09
<b>M1203</b>	Lumbaqui	15.03	14.00	18.90	16.64
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	18.77	17.74	21.59	19.41
<b>M0188</b>	Papallacta	1.66	0.63	9.27	7.09
<b>M0008</b>	Puyo	14.53	13.50	18.54	16.20
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	12.31	11.28	16.94	14.73

Como en las temperaturas máximas del pavimento, una vez obtenido cada uno de los datos de temperatura mínima del pavimento tabulados en los diferentes modelos y a diferentes niveles de confiabilidad, se procede a digitalizar cada uno de los valores en el programa ArcGIS

para tener una representación gráfica de todos los datos obtenidos, y de esta forma elaborar el mapa de temperaturas mínimas del pavimento en las diferentes regiones del Ecuador.

**Figura 72**

*Mapa de temperaturas mínimas del pavimento, modelo SHRP al 50% de confiabilidad*

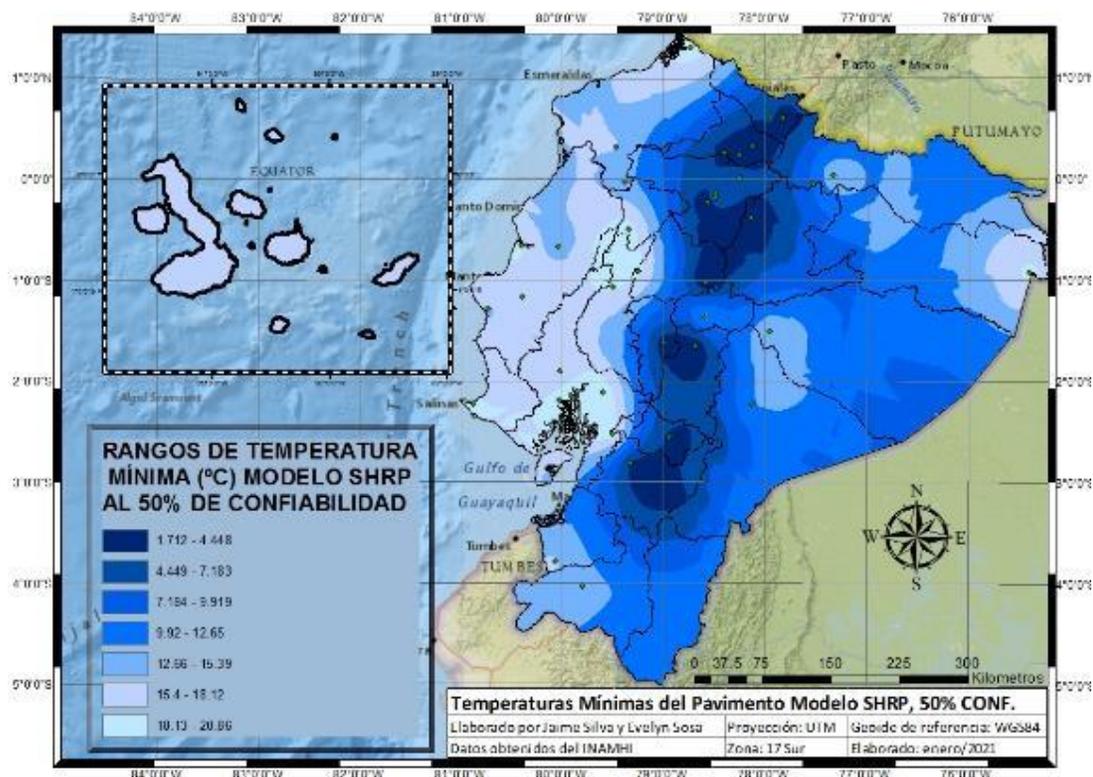
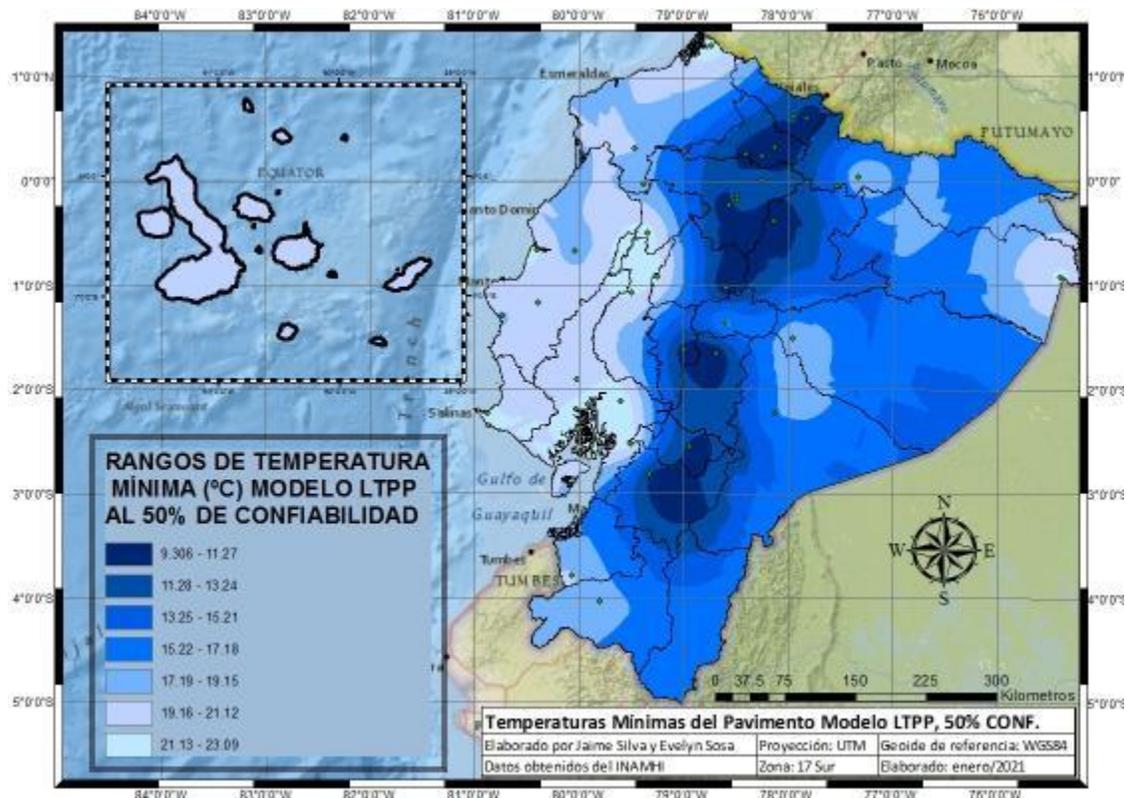


Figura 73

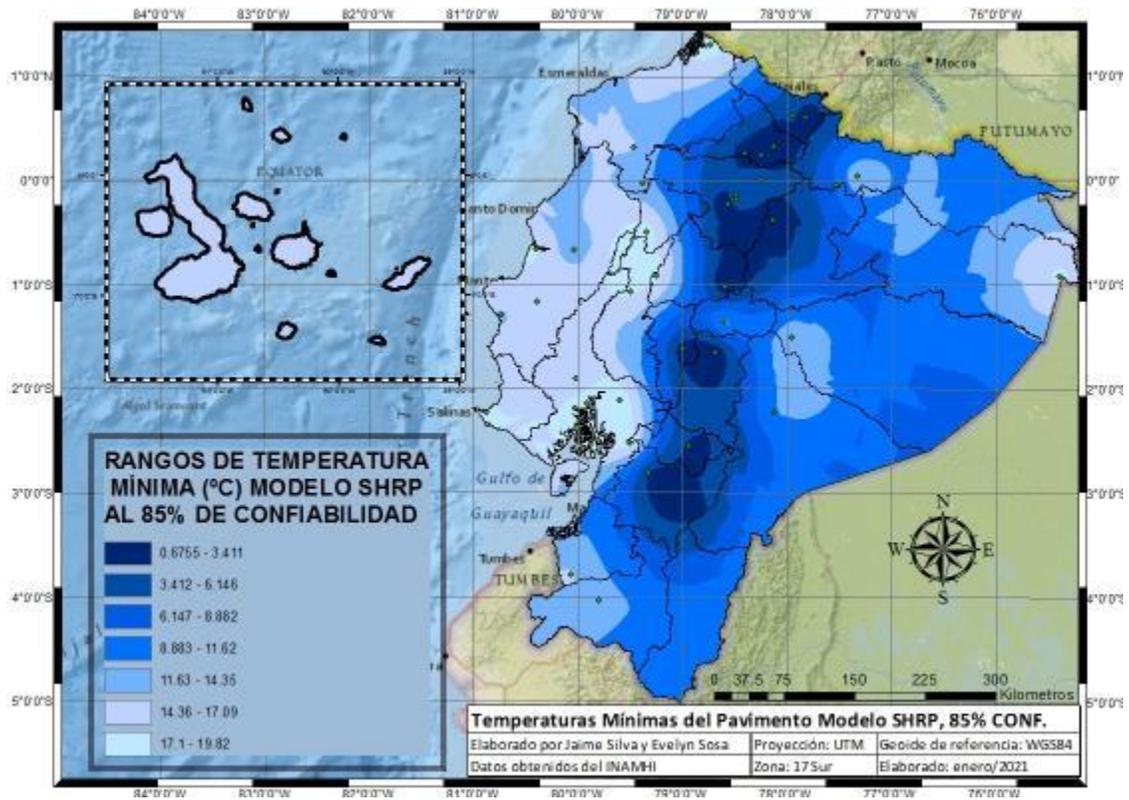
Mapa de temperaturas mínimas del pavimento, modelo LTPP al 50% de confiabilidad



De la misma manera en la figura 72 y la figura 73 se puede observar la distribución de las temperaturas mínimas del pavimento en todo el territorio ecuatoriano, elaborado por el modelo SHRP a un nivel de confiabilidad del 50% las temperaturas mínimas del pavimento están en el rango de 18.13°C a 20.86°C en la Región Costa e Insular (Galápagos), la temperatura del pavimento en la Región Sierra ronda entre los 1.71 °C a 7.18°C y en la región Amazónica se encuentra entre los 9.92°C y 15.39°C; por otro lado el modelo LTPP a un nivel de confiabilidad del 85% nos presenta rangos de temperaturas máximas en la Región Costa e Insular (Galápagos) de 21.13°C y 23.09°C , en la Región Sierra temperaturas máximas que van desde los 9.306 a los 13.24°C y en la Región Amazónica temperaturas máximas de 15.22°C a 19.15°C.

Figura 74

Mapa de temperaturas mínimas del pavimento, modelo SHRP al 85% de confiabilidad

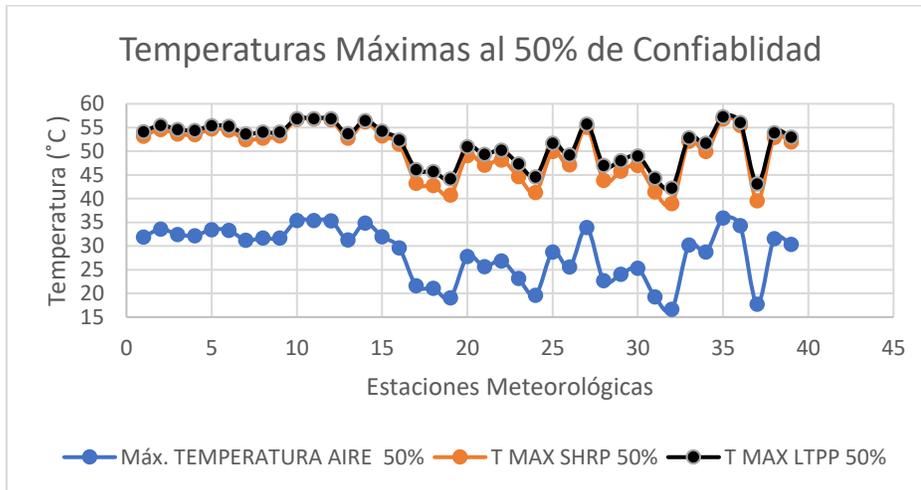




Las siguientes figuras muestran las tendencias de las temperaturas del aire comparada con las temperaturas del pavimento.

**Figura 76**

*Tendencia de temperaturas máxima a una confiabilidad del 50%*



**Figura 77**

*Tendencia de temperaturas máxima a una confiabilidad del 85%*

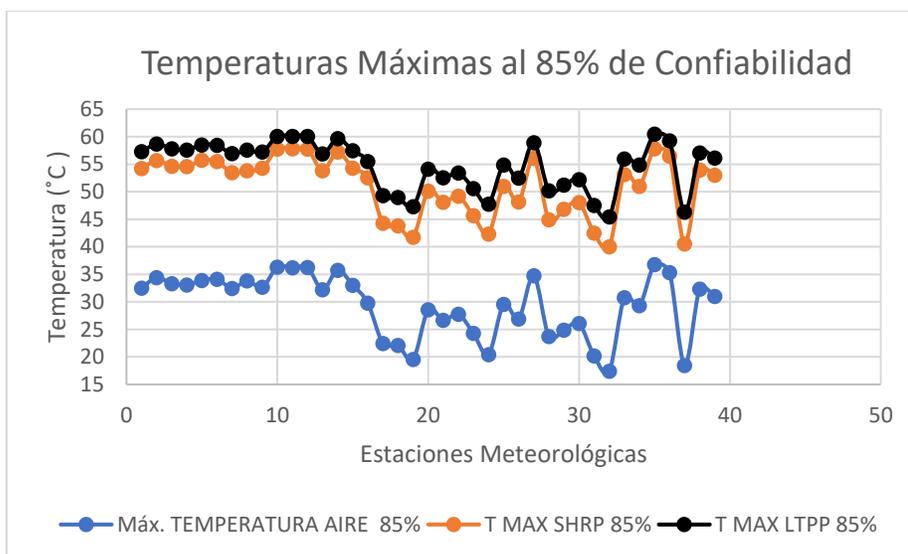


Figura 78

*Tendencia de temperaturas mínima a una confiabilidad del 50%*

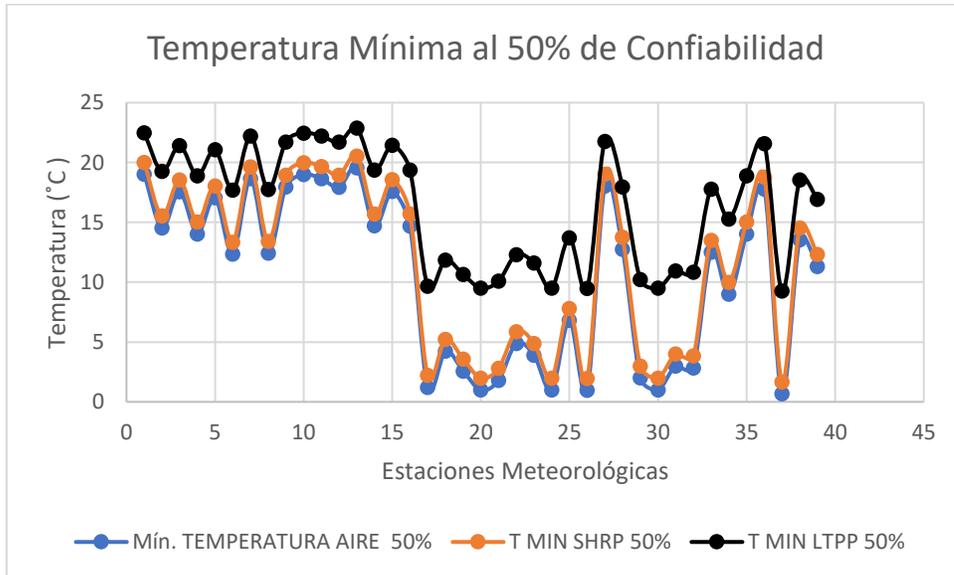
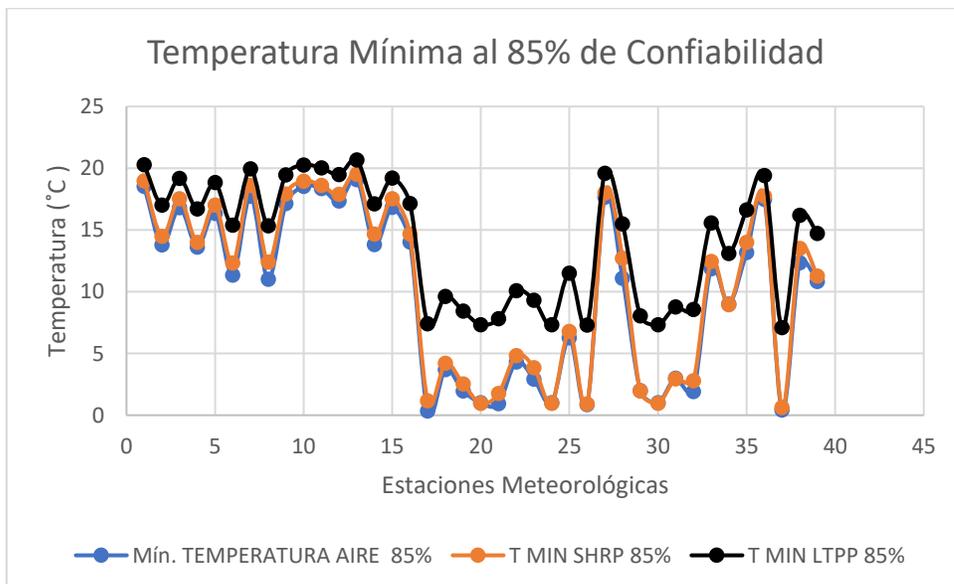


Figura 79

*Tendencia de temperaturas mínima a una confiabilidad del 85%*



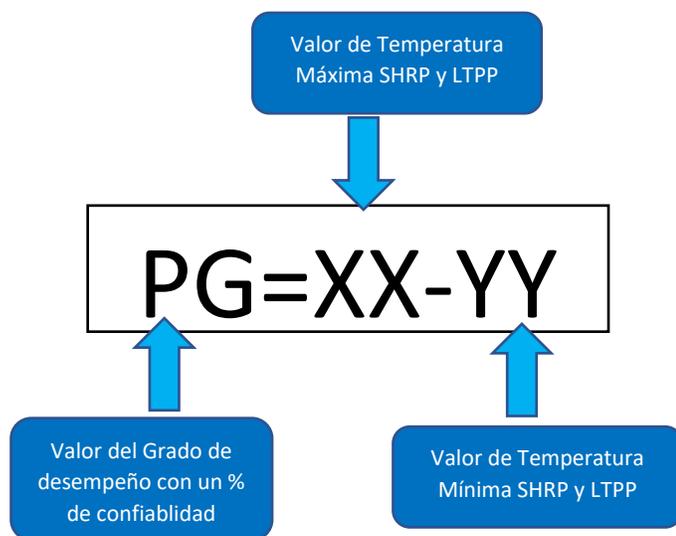
De acuerdo a los siguientes gráficos se observa que las tendencias de las temperaturas del aire (temperatura máxima y mínima) y de las temperaturas del pavimento (temperaturas máximas y mínimas) a diferentes porcentajes de confiabilidad y calculados con diferentes modelos, presentan la misma tendencia, por lo que se puede asegurar que la temperatura del aire y la temperatura del pavimento (puede ser máxima o mínima); presentan una correlación lineal.

### **Grado de desempeño PG**

Las especificaciones del sistema SUEPERPAVE se basa en específicamente en las propiedades físicas del ligante y el comportamiento que este tenga. El grado de desempeño del ligante o performance grade (PG) es seleccionado en base a la temperatura máxima y mínima al cuál el pavimento fue diseñado. (Arias Sanchez et al., 2017)

### **Figura 80**

#### *Parámetros de Grado de Desempeño*



### **Zonificación del grado de desempeño del país**

De acuerdo al esquema 1, el sistema SUPERPAVE establece que se requiere tener las temperaturas máximas y mínimas del pavimento para establecer el grado de desempeño (PG). De acuerdo a los valores obtenidos en las 93 y 94, 60.05°C es la temperatura máxima que va a soportar el pavimento, por lo que el grado 64 se establece para el valor máximo del grado PG; por otro lado, la menor temperatura que se registra es de 0.68°C, en este caso no se obtuvieron temperaturas bajo cero, por lo que se opta por definir el grado -22 como el valor mínimo para el grado PG, debido a que este valor cubre con las condiciones requeridas como temperatura mínima.

La tabla 93 nos muestra de mejor manera, la distribución del grado PG para cada una de las provincias donde se localizan las estaciones meteorológicas analizadas para el presente estudio.

**Tabla 93**

*Valores de Grado PG Máximos para las diferentes Estaciones Meteorológicas*

<b>Código</b>	<b>Nombre Estación Meteorológica</b>	<b>T MAX SHRP</b>	<b>T MAX LTPP</b>	<b>GRADO PG MAX</b>	<b>T MAX SHRP</b>	<b>T MAX LTPP</b>	<b>GRADO PG MAX</b>
		<b>50%</b>	<b>50%</b>	<b>XX</b>	<b>85%</b>	<b>85%</b>	<b>XX</b>
<b>M1249</b>	Palesema	53.18	54.13	64	54.22	57.29	64
<b>M0156</b>	Quinindé	54.61	55.47	64	55.65	58.66	64
<b>M1217</b>	Bahía De Caráquez	53.61	54.59	64	54.65	57.78	64
<b>M1233</b>	Cantagallo-Granja	53.51	54.39	64	54.55	57.58	64
<b>M1208</b>	Teodomira	54.68	55.38	64	55.72	58.51	64
<b>M0162</b>	Chone-U. Católica	54.43	55.26	64	55.46	58.44	64
<b>M0026</b>	Puerto Ila	52.43	53.66	64	53.46	56.91	64
<b>M0025</b>	La Concordia	52.78	54.03	64	53.81	57.55	64
<b>M1170</b>	Santa Elena-Universidad	53.23	54.02	64	54.27	57.21	64
<b>M1271</b>	Guayaquil (Facultad Ccn )	56.72	56.88	64	57.75	60.07	64
<b>M5090</b>	La Lampada	56.79	56.88	64	57.83	60.04	64

Continuación de la tabla 93

<b>Código</b>	<b>Nombre Estación Meteorológica</b>	<b>T MAX SHRP</b>	<b>T MAX LTPP</b>	<b>GRADO PG MAX</b>	<b>T MAX SHRP</b>	<b>T MAX LTPP</b>	<b>GRADO PG MAX</b>
		<b>50.00%</b>	<b>50.00%</b>	<b>XX</b>	<b>85.00%</b>	<b>85.00%</b>	<b>XX</b>
<b>M1253</b>	Puerto Hondo	56.69	56.85	64	57.72	60.03	64
<b>M0037</b>	Milagro	52.80	53.68	64	53.84	56.88	64
<b>M1207</b>	Nobol	56.16	56.47	64	57.20	59.66	64
<b>M0006</b>	Pichilingue	53.24	54.23	64	54.28	57.45	64
<b>M1246</b>	Las Lajas	51.52	52.36	64	52.56	55.48	64
<b>M0103</b>	San Gabriel	43.23	46.13	58	44.27	49.31	58
<b>M0102</b>	El Angel	42.77	45.75	58	43.81	48.95	58
<b>M0001</b>	Inguincho	40.73	44.14	58	41.77	47.28	58
<b>M1240</b>	Ibarra	49.08	50.95	64	50.12	54.12	64
<b>M0105</b>	Otavales	47.06	49.31	58	48.09	52.52	64
<b>M1094</b>	Tomalon-Tabacundo	48.14	50.24	64	49.17	53.43	64
<b>M0055</b>	Bicentenario	44.63	47.35	58	45.67	50.58	64
<b>M1273</b>	Lloa	41.29	44.60	58	42.32	47.77	58
<b>M0024</b>	Iñaquito	49.95	51.69	64	50.98	54.87	64
<b>M0004</b>	Rumipamba-Salcedo	47.10	49.21	58	48.13	52.50	64
<b>M0124</b>	San Juan La Mana	55.03	55.71	64	56.06	58.90	64
<b>M0258</b>	Querochaca	43.86	46.99	58	44.89	50.20	64
<b>M1107</b>	Laguacoto	45.77	48.03	58	46.81	51.21	64
<b>M1036</b>	Riobamba	46.98	49.01	58	48.02	52.17	64
<b>M0031</b>	Cañar	41.43	44.32	58	42.46	47.51	58
<b>M5089</b>	El Tablón-Las Cuevas	38.95	42.25	58	39.99	45.42	58
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	52.11	52.81	64	53.15	55.95	64
<b>M0203</b>	Reventador	49.95	51.71	64	50.98	54.85	64
<b>M1203</b>	Lumbaqui	56.78	57.29	64	57.81	60.48	64
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	55.46	56.06	64	56.50	59.27	64
<b>M0188</b>	Papallacta	39.52	43.13	58	40.55	46.29	58
<b>M0008</b>	Puyo	52.92	53.89	64	53.96	57.06	64
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	51.95	52.97	64	52.98	56.12	64

Tabla 94

Valores de Grado PG Mínimos para las diferentes Estaciones Meteorológicas

Código	Nombre Estación Meteorológica	T MIN SHRP	T MIN LTPP	GRADO PG MIN	T MIN SHRP	T MIN LTPP	GRADO PG MIN
		50.00%	50.00%	YY	85.00%	85.00%	YY
M1249	Palesema	20.01	22.48	-22	18.98	20.28	-22
M0156	Quininde	15.53	19.26	-22	14.50	17.02	-22
M1217	Bahia De Caraquez	18.55	21.43	-22	17.52	19.19	-22
M1233	Cantagallo-Granja	15.03	18.90	-22	14.00	16.70	-22
M1208	Teodomira	18.05	21.07	-22	17.02	18.84	-22
M0162	Chone-U. Catolica	13.35	17.68	-22	12.31	15.39	-22
M0026	Puerto Ila	19.64	22.21	-22	18.60	19.94	-22
M0025	La Concordia	13.43	17.74	-22	12.39	15.33	-22
M1170	Santa Elena-Universidad	18.95	21.72	-22	17.92	19.46	-22
M1271	Guayaquil (Facultad Ccnn)	19.99	22.47	-22	18.96	20.27	-22
M5090	La Lampada	19.65	22.22	-22	18.62	20.04	-22
M1253	Puerto Hondo	18.93	21.70	-22	17.90	19.49	-22
M0037	Milagro	20.55	22.87	-22	19.52	20.67	-22
M1207	Nobol	15.71	19.38	-22	14.67	17.11	-22
M0006	Pichilingue	18.57	21.45	-22	17.54	19.21	-22
M1246	Las Lajas	15.69	19.37	-22	14.66	17.14	-22
M0103	San Gabriel	2.21	9.67	-22	1.18	7.40	-22
M0102	El Angel	5.23	11.84	-22	4.20	9.63	-22
M0001	Inguincho	3.57	10.65	-22	2.54	8.43	-22
M1240	Ibarra	1.99	9.51	-22	0.96	7.33	-22
M0105	Otavalo	2.79	10.09	-22	1.76	7.82	-22
M1094	Tomalon-Tabacundo	5.87	12.30	-22	4.84	10.09	-22
M0055	Bicentenario	4.89	11.60	-22	3.86	9.31	-22
M1273	Lloa	1.99	9.51	-22	0.96	7.33	-22
M0024	Iñaquito	7.81	13.70	-22	6.78	11.49	-22
M0004	Rumipamba-Salcedo	1.95	9.48	-22	0.92	7.30	-22
M0124	San Juan La Mana	19.03	21.78	-22	18.00	19.59	-22
M0258	Querochaca	13.75	17.98	-22	12.72	15.49	-22
M1107	Laguacoto	2.99	10.23	-22	1.96	8.05	-22
M1036	Riobamba	1.99	9.51	-22	0.96	7.33	-22
M0031	Cañar	3.99	10.95	-22	2.96	8.77	-22
M5089	El Tablon-Las Cuevas	3.83	10.83	-22	2.80	8.56	-22

Continuación Tabla 94

<b>Código</b>	<b>Nombre Estación Meteorológica</b>	<b>T MIN SHRP</b>	<b>T MIN LTPP</b>	<b>GRADO PG MIN</b>	<b>T MIN SHRP</b>	<b>T MIN LTPP</b>	<b>GRADO PG MIN</b>
		<b>50.00%</b>	<b>50.00%</b>	<b>YY</b>	<b>85.00%</b>	<b>85.00%</b>	<b>YY</b>
<b>M1242</b>	El Almendral-Granja Almendral	13.49	17.78	-22	12.46	15.56	-22
<b>M0203</b>	Reventador	9.99	15.27	-22	8.96	13.09	-22
<b>M1203</b>	Lumbaqui	15.03	18.90	-22	14.00	16.64	-22
<b>M0007</b>	Nuevo Rocafuerte	18.77	21.59	-22	17.74	19.41	-22
<b>M0188</b>	Papallacta	1.66	9.27	-22	0.63	7.09	-22
<b>M0008</b>	Puyo	14.53	18.54	-22	13.50	16.20	-22
<b>M1040</b>	Macas San Isidro-Pns	12.31	16.94	-22	11.28	14.73	-22

De acuerdo a la tabla 93 donde se encuentran las temperaturas máximas del pavimento calculadas por los modelos SHRP y LTPP a diferentes porcentajes de confiabilidad, se escoge el grado 64 y grado 58; los cuales son valores que cubren las necesidades de temperatura máxima para el valor XX del grado de desempeño PG; de la misma manera la tabla tal muestra los valores de temperaturas mínimas del pavimento calculados por los modelos SHRP y LTPP a diferentes porcentajes de confiabilidad, en el cual se optó por el grado -22 debido a que este valor cumple con las condiciones de temperatura mínima para el valor YY del grado de desempeño PG.

Por lo tanto, los grados PG 64-22 y PG 58-22, son los recomendados para cada una de las provincias donde se localizan cada una de las estaciones meteorológicas analizadas; la tabla tal nos representa los grados PG recomendados para cada una de las provincias del Ecuador, basados en la localización de cada una de sus Estaciones Meteorológicas. Para la provincia de Zamora Chinchipe no cuenta con datos de Estaciones Meteorológicas, se tomó los valores de sus provincias fronterizas; en el caso de Galápagos se tomaron los valores de la Región Costa debido

a que el ráster digitalizado en ArcGIS de temperaturas máximas y mínimas de la Región Costa son aplicadas a la Región Insular (Galápagos).

### ***Zonificación de acuerdo al grado de asfalto***

El Instituto Mexicano del Transporte, realizó una publicación técnica en la cual clasifica a los grados de asfalto acuerdo al tipo de clima, esta clasificación se la realizó a tres diferentes temperaturas dependiendo la región donde se vaya a tender el pavimento; climas fríos con temperaturas menores o iguales a 7°C; climas templados donde se presenten temperaturas de 7°C a 24°C y climas calientes en cuales se presenten temperaturas de mayores a 24°C; empleando cementos asfálticos desde el AC-5 hasta el AC-40. (Rico Rodriguez et al., 1998).

El Instituto Mexicano del Transporte recomienda la siguiente clasificación:

**Tabla 95**

*Grados de asfalto de acuerdo al tipo de clima*

<b>Clima</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Grados De Asfalto</b>
<b>Frío</b>	Menor O Igual A 7c	AC-5; AC-10
<b>Templado</b>	Entre 7c Y 24	AC-10; AC20
<b>Caliente</b>	Mayor A 24 C	AC-20; AC40

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. (Rico Rodriguez et al., 1998)

## Resultados y Discusión

### Caracterización de los materiales

Para la medición de los espectros térmicos y las condiciones de humedad, las mezclas asfálticas utilizadas en el proyecto, fueron elaboradas con materiales que se manejan en la producción masiva de proyectos de ingeniería de la localidad, los cuales deben ser analizados para verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas de acuerdo a normas que están vigentes en el país.

### Resultados de ensayos Agregados

Tabla 96

*Caracterización de los agregados utilizados en la mezcla asfáltica abierta*

Norma	Característica	Unidad	Especificación	Resultados	Observación
<b>ASTM D2419/ INV E 133</b>	Equivalente de Arena	%	45 -	73.00	OK
<b>INEN 861 / ASTM C 131</b>	Desgaste en máquina de los Ángeles	%	- 40	31	OK
<b>INEN 698 / ASTM C 142</b>	Materiales deletéreos	%	- 1	0.51	OK
<b>INEN 857 / ASTM C 127</b>	Gravedad Específica del Agregado Grueso		NE	2.71	OK
	Absorción del Agregado Grueso	%	NE	3.53	OK
<b>INEN 856 / ASTM C 128</b>	Gravedad Específica del Agregado Fino		NE	2.66	OK
	Absorción del Agregado Fino	%	NE	4.49	OK

Nota: Material de la mina San Ramón

De acuerdo a la tabla 96 se puede comprobar que el origen de los materiales utilizados en estas mezclas cumple los parámetros necesarios para su uso, el cual garantiza que tienen propiedades.

**Tabla 97**

*Caracterización de los agregados utilizados en la mezcla asfáltica cerrada*

<b>Norma</b>	<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificación</b>		<b>Resultados</b>	<b>Observación</b>
<b>ASTM D2419/ INV E 133</b>	Equivalente de Arena	%	45	-	71.00	OK
<b>INEN 861 / ASTM C 131</b>	Desgaste en máquina de los Ángeles	%	-	40	26	OK
<b>INEN 857 / ASTM C 127</b>	Gravedad Específica del Agregado Grueso	-	NE		2.71	OK
	Absorción del Agregado Grueso	%	NE		2.50	OK
<b>INEN 856 / ASTM C 128</b>	Gravedad Específica del Agregado Fino	-	NE		2.75	OK
	Absorción del Agregado Fino	%	NE		2.02	OK

Nota: Material de la mina El Colibrí

Los materiales pétreos que fueron utilizados en las mezclas asfálticas cerradas, de acuerdo a las normas y a las especificaciones de igual manera se encuentran en el rango adecuado para garantizar el buen desempeño de las mismas, los cuales son aceptados para su uso en el diseño de mezclas.

### **Resultados de ensayos de Asfalto**

**Tabla 98**

*Caracterización del asfalto utilizado en las mezclas asfálticas*

<b>Norma</b>	<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>Especificación</b>		<b>Resultado</b>	<b>Observaciones</b>
<b>INEN 917 /ASTM D-5</b>	Penetración a 25°C	1/10mm	40	-	57.56	Cumple
<b>INEN 920 /ASTM D-36</b>	Punto de Reblandecimiento	°C	55	-	57.95	Cumple
<b>INEN 916 /ASTM D-113</b>	Ductilidad	cm	50	-	120	Cumple
<b>ASTM D-92</b>	Punto de Inflamación	°C	232	-	245	Cumple
<b>ASTM D-70</b>	Gravedad Específica	g/ml	0.9	-	0.99	Cumple

El material ligante de acuerdo a las normas que se detallan en la tabla, se encuentra en óptimas condiciones para su uso en mezclas. Los materiales utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas abiertas y cerradas cumplen con todos los lineamientos establecidos, lo que nos quiere decir que las propiedades físicas de los materiales anteriormente detallados ayudarán a la elaboración de mezclas asfálticas eficientes.

Otro aspecto que se debe considerar son las propiedades mecánicas que poseen de los dos tipos de mezclas, esto está relacionado con la cantidad de material pétreo y de material ligante utilizado para la composición de las mismas, en este caso también se procede con la verificación de cumplimiento de acuerdo a normativas de diseño según el tipo de mezcla debido a que en el proceso de su elaboración se requieren de metodologías diferentes como el Método de Marshall para mezclas cerradas y el Método Cántabro para mezclas abiertas.

En la tabla se verifica que las mezclas asfálticas abiertas que fueron utilizadas en la investigación cumplen con las especificaciones INVIAS, las cuales han sido utilizadas debido a que el país no

hay normas que se enfoquen específicamente en el diseño de mezclas drenantes. Por lo tanto, según lo obtenido las muestras son aceptadas para la medición de espectros térmicos y condiciones de humedad.

**Tabla 99**

*Verificación de cumplimiento de las propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas abiertas*

Características	Unidad	Especificación INVIAS		Resultado	Observaciones
<b>Cántabro Seco</b>	%	-	25	19.25	Cumple
<b>Cántabro Húmedo</b>	%	-	35	22.21	Cumple
<b>Permeabilidad</b>	s	-	15	12.008	Cumple
<b>Porcentaje de vacíos</b>	%	15	-	22.56	Cumple
<b>Densidad de Bulk máxima</b>	g/ml	-	-	2.067	-
<b>Asfalto óptimo</b>	%	3	6	4.3	Cumple

**Tabla 100 Verificación de cumplimiento de las propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas cerradas**

*Verificación de cumplimiento de las propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas cerradas*

Porcentaje óptimo de Asfalto	Parámetros	Unidad	Especificación MOP		Valor	Observación
<b>5.9</b>	Vacíos en la mezcla	%	3	5	3	OK
	Estabilidad	lb	1000	-	2128.42	OK
	Flujo	mm	8	16	13.59	OK
	Relación filler/betún	%	0.8	1.2	1.2	OK
	VAM	%	13	-	80.95	OK

### **Temperaturas máximas y mínimas registradas por los sensores**

La tabla 101 muestra los valores de las temperaturas máximas, mínimas y promedios registradas en cada uno de los meses analizados.

**Tabla 101 Resumen de temperaturas de las mezclas asfálticas***Resumen de temperaturas de las mezclas asfálticas*

MES	TEMPERATURA					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	T MAX	T MIN	T PROMEDIO	T MAX	T MIN	T PROMEDIO
<b>SEPTIEMBRE</b>	41.29	12.67	22.66	40.19	7.17	22.54
<b>OCTUBRE</b>	40.37	13.47	23.01	39.95	7.69	22.86
<b>NOVIEMBRE</b>	41.29	12.16	22.20	40.19	7.17	22.09
<b>DICIEMBRE</b>	41.34	12.05	21.91	40.19	7.69	21.80
<b>ENERO</b>	39.77	13.17	20.58	38.43	10.54	19.72
<b>FEBRERO</b>	38.14	13.17	20.32	39.01	11.05	19.57

**Gradiente térmico de las mezclas asfálticas**

La tabla 102 muestra los valores del gradiente térmico para cada mezcla asfáltica

**Tabla 102***Gradiente Térmico de las mezclas asfálticas*

FECHA	GRADIENTE TÉRMICO (° C/cm)					
	MEZCLA ASFÁTICA CERRADA			MEZCLA ASFÁTICA ABIERTA		
	MAX	MIN	PROMEDIO	MAX	MIN	PROMEDIO
SEPTIEMBRE	3.22	0.00	0.91	3.42	0.00	0.94
OCTUBRE	3.41	0.00	1.00	3.10	0.00	1.02
NOVIEMBRE	3.31	0.00	0.91	3.42	0.00	0.93
DICIEMBRE	3.31	0.00	0.89	2.75	0.00	0.92
ENERO	2.66	0.00	0.70	3.42	0.00	0.70
FEBRERO	3.19	0.00	0.78	3.25	0.00	0.84

**Porcentaje de humedad**

La tabla 103 nos muestra los valores máximos y mínimas del porcentaje de humedad de cada una de las briquetas en cada uno de los meses analizados.

**Tabla 103**

*Porcentajes de humedad de las mezclas asfálticas*

FECHA	PORCENTAJE DE HUMEDAD			
	MEZCLA ASFÁLTICA CERRADA		MEZCLA ASFÁLTICA ABIERTA	
	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO
Septiembre	40.99	18.17%	26.54%	14.47%
Octubre	50.81	22.96%	38.87%	18.00%
Noviembre	37.06	18.72%	29.34%	11.77%
Diciembre	49.07	22.09	43.09%	16.09%
Enero	40.92	17.33%	42.83%	20.86%
Febrero	36.42	25.33%	26.17%	19.18%

#### **Ecuaciones de correlación**

La tabla 104 muestra cada una de las ecuaciones de correlación lineal (Radiación Temperatura) y su respectivo coeficiente de correlación lineal para cada uno de los meses analizados.

**Tabla 104**

*Ecuaciones de correlación lineal con su respectivo coeficiente de correlación lineal*

Mes	Ecuación	Coefficiente de correlación lineal (R <sup>2</sup> )
Septiembre	$y = 91.81x - 1066.76$	0.90
Octubre	$y = 46.621x - 23.23$	1.00
Noviembre	$y = 59.05x - 427.57$	0.98
Diciembre	$y = 117.82x - 1602.35$	0.76
Enero	$y = 129.213x - 1578.86$	0.72

La tabla 104 muestra que se tiene una ecuación distinta para cada uno de los meses analizados, lo que significa que el clima está en constante cambio y hay otras variables que

influyen en el comportamiento de la temperatura y la radiación; como el número de horas de sol, la nubosidad, viento, altitud, entre otras.

Cada ecuación desarrollada sirve para estimar la radiación que se produjo en el intervalo de tiempo analizado y específicamente para la ubicación geográfica en la que se encuentra la estación meteorológica analizada.

### Espectros térmicos y radiación

Una vez obtenidas cada una de las ecuaciones de correlación de radiación solar para cada uno de los meses analizados, se procede a calcular la radiación emitida por cada una de las briquetas de asfalto (mezcla asfáltica abierta y promedio), la tabla 105 nos muestra cada uno de los valores obtenidos.

**Tabla 105**

*Ecuaciones de correlación*

Mes	Ecuación	T.Promedio Mezcla asfáltica cerrada (°C)	T.Promedio Mezcla asfáltica abierta (°C)
Septiembre	$y = 91.81x - 1066.76$	22.66	22.54
Octubre	$y = 46.621x - 23.23$	23.01	22.86
Noviembre	$y = 59.05x - 427.57$	22.20	22.09
Diciembre	$y = 117.82x - 1602.35$	21.91	21.80
Enero	$y = 129.213x - 1578.86$	19.99	19.86

Una vez obtenidos los valores de temperaturas promedio de las mezclas asfálticas de la tabla 104, se reemplazan los valores de temperatura en las ecuaciones para obtener los valores de radiación emitida por las briquetas de asfalto. La tabla 106 nos muestra los valores de radiación obtenidos.

Tabla 106

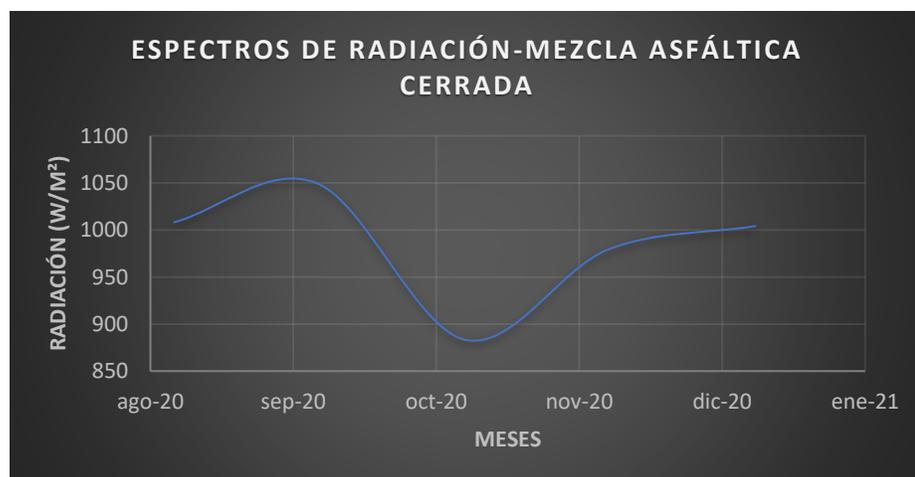
*Radiación emitida por las muestras*

Mes	Radiación Mezcla asfáltica cerrada (W/m <sup>2</sup> )	Radiación Mezcla asfáltica abierta (W/m <sup>2</sup> )	T.Promedio Mezcla asfáltica cerrada (°C)	T.Promedio Mezcla asfáltica abierta (°C)
<b>Septiembre</b>	1008.17	1002.64	22.66	22.54
<b>Octubre</b>	1049.52	1042.53	23.01	22.86
<b>Noviembre</b>	883.34	876.84	22.2	22.09
<b>Diciembre</b>	979.09	966.126	21.91	21.8
<b>Enero</b>	1004.11	987.31	19.99	19.86

Las figuras 81 y 82 muestran los espectros de radiación de cada una de las briquetas de mezcla asfáltica

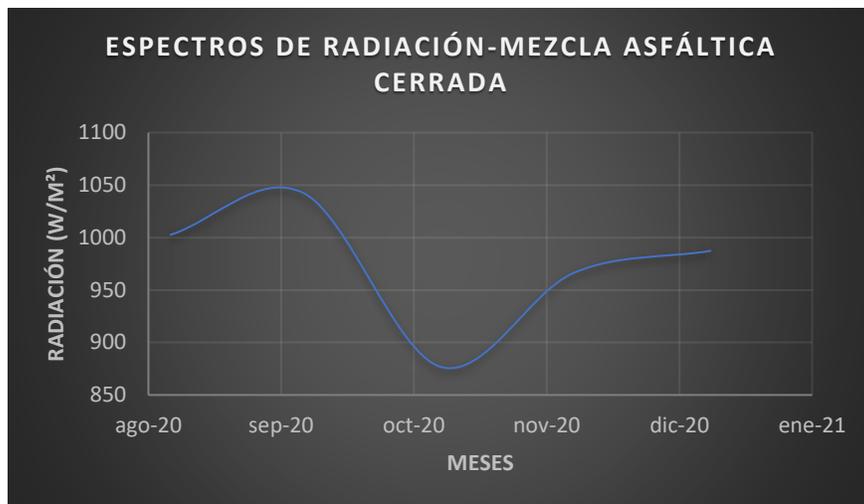
Figura 81

*Espectros de radiación de briqueta de mezcla asfáltica cerrada*



**Figura 82**

*Espectros de radiación de briqueta de mezcla asfáltica abierta*



## Grados de desempeño PG para cada provincia del Ecuador

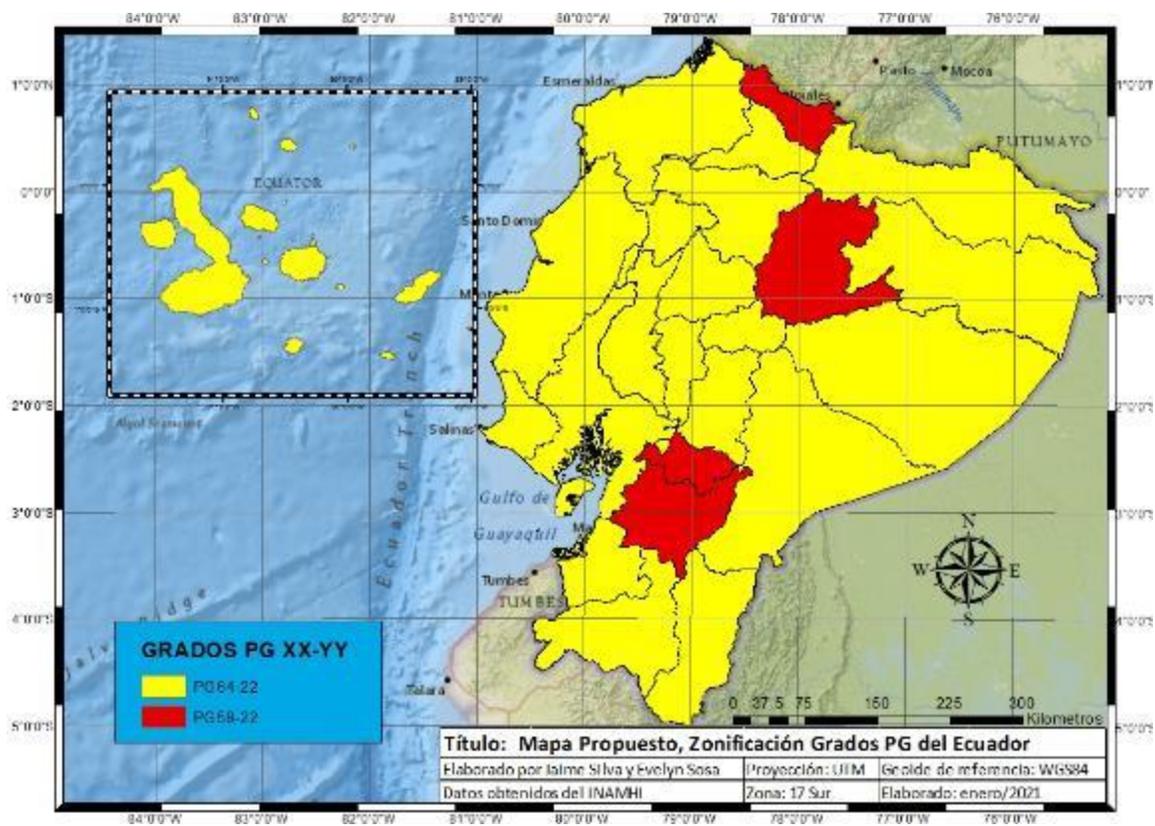
Tabla 107

Valores PG recomendados para cada provincia del Ecuador

Provincia	GRADO PG RECOMENDADO PG=XX-YY
ESMERALDAS	PG64-22
MANABI	PG64-22
STO DOMINGO DE LOS TSACHILAS	PG64-22
SANTA ELENA	PG64-22
GUAYAS	PG64-22
LOS RIOS	PG64-22
EL ORO	PG64-22
CARCHI	PG58-22
IMBABURA	PG64-22
PICHINCHA	PG64-22
COTOPAXI	PG64-22
TUNGURAHUA	PG64-22
BOLIVAR	PG64-22
CHIMBORAZO	PG64-22
CAÑAR	PG58-22
AZUAY	PG58-22
LOJA	PG64-22
SUCUMBIOS	PG64-22
ORELLANA	PG64-22
NAPO	PG58-22
PASTAZA	PG64-22
MORONA SANTIAGO	PG64-22
ZAMORA CHINCHIPE	PG64-23
GALÁPAGOS	PG64-24

Figura 83

Zonificación del grado de desempeño (PG)



### Grados de asfalto del Ecuador de acuerdo al tipo de clima

La tabla 108, proyecta la recomendación de los grados de asfalto del Instituto Mexicano del Transporte en la región del Ecuador.

**Tabla 108**

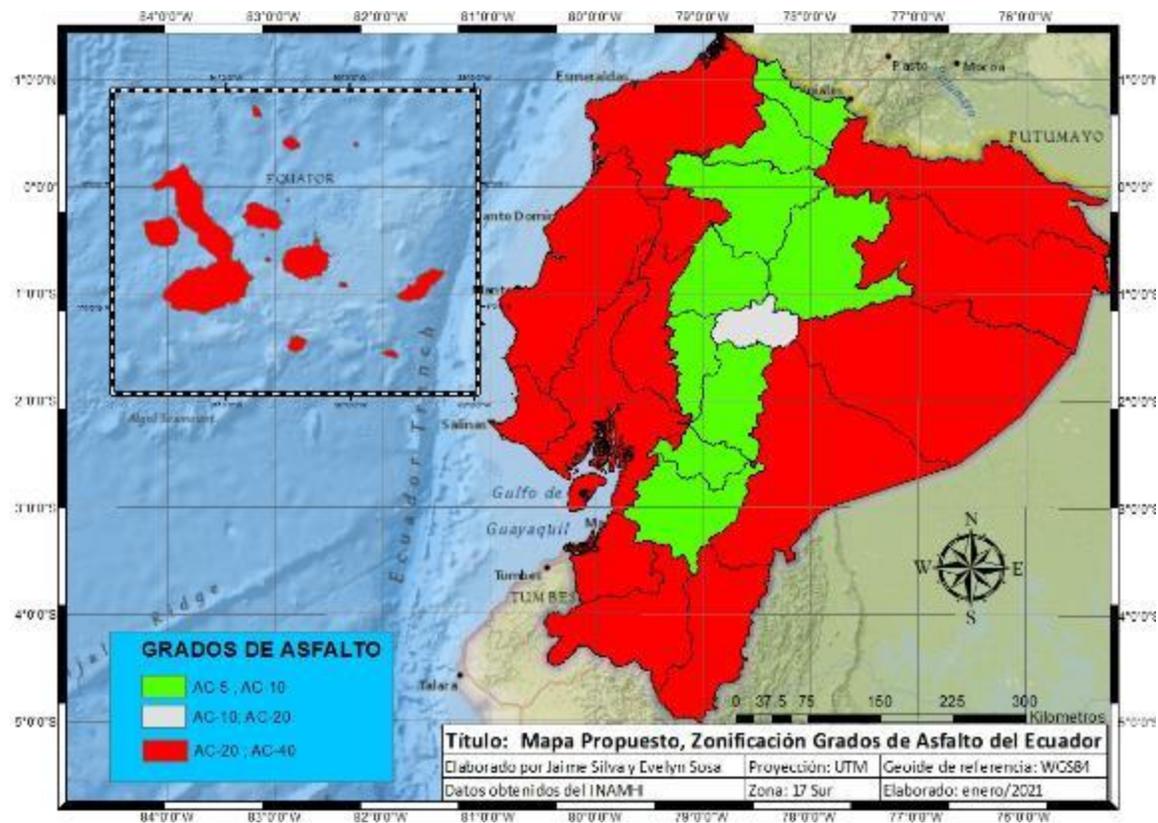
*Grados de Asfalto de acuerdo al tipo de clima*

<b>Provincias</b>	<b>Grados De Asfalto</b>
<b>Esmeraldas</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Manabi</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Sto Domingo De Los Tsachilas</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Santa Elena</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Guayas</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Los Rios</b>	AC-20 ; AC-40
<b>El Oro</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Carchi</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Imbabura</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Pichincha</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Cotopaxi</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Tungurahua</b>	AC-10 ; AC20
<b>Bolivar</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Chimborazo</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Cañar</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Azuay</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Loja</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Sucumbíos</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Orellana</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Napo</b>	AC-5 ; AC-10
<b>Pastaza</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Morona Santiago</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Zamora</b>	AC-20 ; AC-40
<b>Galapagos</b>	AC-20 ; AC-40

La figura 84 muestra la zonificación de los grados de asfalto de acuerdo al tipo del clima

**Figura 84**

*Propuesta de zonificación de los grados de asfalto en el Ecuador*



## Comparación de los datos obtenidos en los sensores con los de la estación meteorológica de la Tola

Para comprobar si los sensores tomaron temperaturas reales, se utilizaron datos de las temperaturas máximas y mínimas del aire de la estación meteorológica de La Tola, la estación más cercana al área de estudio. Dichos datos eran descargados diariamente durante los meses de septiembre del 2020, octubre del 2020, noviembre del 2020, diciembre del 2020 enero y febrero del 2021 de la página del Instituto Nacional de Meteorológica e Hidrología, INAMHI. Se realizó el mismo procesamiento que se usó para las estaciones proporcionadas por el INAMHI y los modelos SHRP y LTPP para obtener las temperaturas del pavimento al 50% y 85% de confiabilidad.

La tabla 109 muestra los valores de temperatura máxima, mínima y promedio del aire y la tabla 110 los valores de las temperaturas máximas y mínimas del pavimento calculados para cada uno de los modelos (SHRP y LTPP) a diferentes niveles de confiabilidad (50% y 85%)

**Tabla 109**

*Temperaturas del aire de la Estación Meteorológica de La Tola*

<b>Mes</b>	<b>T Máx.</b>	<b>T Min</b>	<b>T PROM</b>
Septiembre	25.8	6.4	15.12
Octubre	22.70	9.20	15.50
Noviembre	27.20	2.40	14.82
Diciembre	24.50	13.80	14.91
Enero	21.80	9.50	14.35
Febrero	20.17	9.48	14.28

Tabla 110

*Temperaturas del aire de la Estación Meteorológica de La Tola*

Mes	T MAX	T MAX	T MAX	T MAX	T MIN	T MIN	T MIN	T MIN
	SHRP	SHRP	LTPP	LTPP	SHRP	SHRP	LTPP	LTPP
	50.00%	85.00%	50.00%	85.00%	50.00%	85.00%	50.00%	85.00%
Septiembre	47.08	48.54	49.41	50.61	7.39	5.92	13.40	12.33
Octubre	44.12	46.04	47.00	48.57	10.19	8.08	15.41	13.89
Noviembre	48.41	50.55	50.51	52.25	3.39	0.76	10.52	8.62
Diciembre	45.83	47.95	48.40	50.13	14.79	12.86	18.73	17.33
Enero	43.26	44.08	46.29	46.97	10.49	9.24	15.63	14.73
Febrero	41.70	42.64	45.02	45.79	10.48	9.09	15.62	14.61

Figura 85

*Tendencia entre las temperaturas máximas medidas con sensores y calculadas*

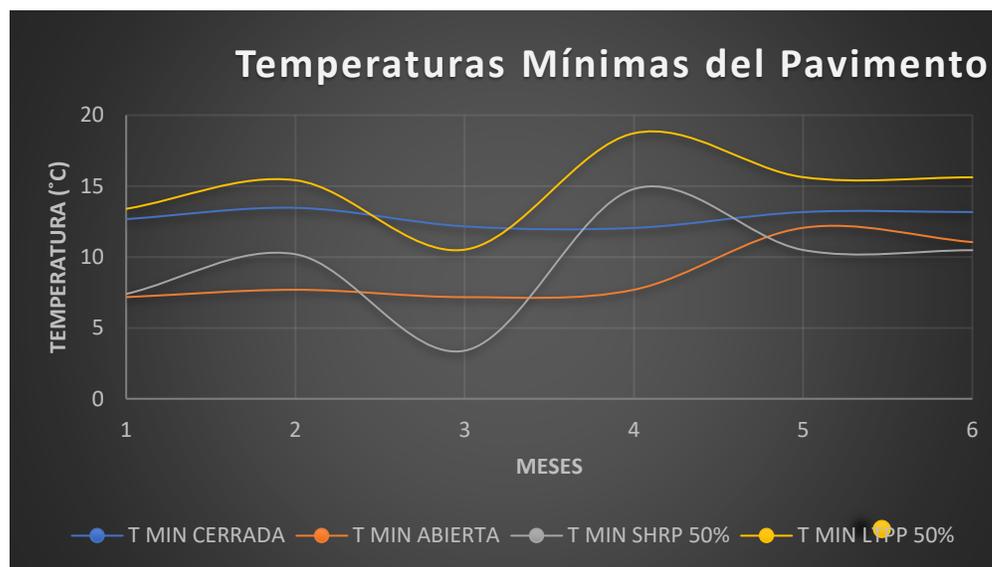
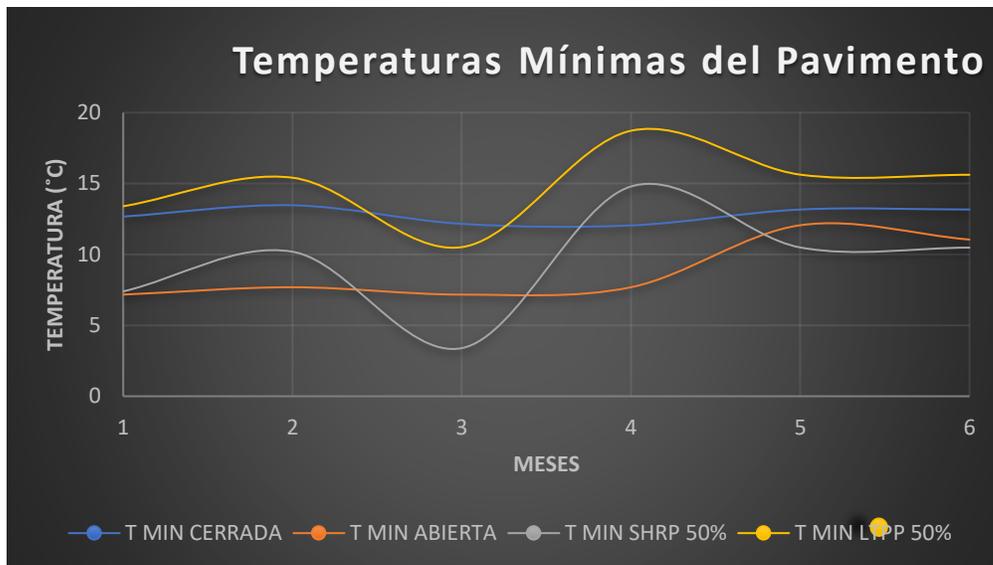


Figura 86

*Tendencia entre las temperaturas mínimas medidas con sensores y calculadas*



Como se puede apreciar en la tabla 108 y 109 en los gráficos 85 y 86 los valores de las temperaturas no se encuentran dispersos y están dentro del mismo rango; los gráficos tal y tal muestran la tendencia de los valores de las temperaturas obtenidas con los sensores y las calculadas con los dos modelos. Las variaciones de los valores de la temperatura medida con los sensores y las calculadas con la estación meteorológica es debido a que el lugar de estudio se encuentra a una altitud de 2698 m.s.n.m y la estación meteorológica de La Tola se encuentra a 2480 m.s.n.m.

## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- Las mezclas asfálticas utilizadas en la medición fueron elaboradas con materiales que se ocupan en la producción masiva de proyectos de ingeniería de la localidad, donde el material pétreo y el material asfáltico que fueron empleados cumplen con las especificaciones vigentes establecidas. En las mezclas asfálticas cerradas se considera el método Marshall cuya metodología proporcionó una estabilidad de 2129.39 lb, flujo de 13.67 y una relación filler/betún 1.19 que de acuerdo a las especificaciones MOP-001-F 2002 son aptas para ser aplicadas en el diseño de pavimentos. Las mezclas asfálticas abiertas consideran el método Cántabro donde se obtuvo 19.25% en el ensayo de cántabro seco y 22.21% en el ensayo de cántabro húmedo que de acuerdo a las normas INVIAS se encuentra dentro de lo establecido.
- La temperatura máxima tomada por los sensores instalados en campo en la mezcla asfáltica cerrada es de 41.34 °C y su temperatura mínima es de 12.05 °C, la temperatura máxima en la mezcla asfáltica abierta es de 40.19 °C y la temperatura mínima es de 7.17 °C; como las mezclas asfálticas abiertas tienen mayor cantidad de porosidad que las mezclas asfálticas cerradas retienen menos temperatura, haciéndolas menos susceptibles a esfuerzos por compresión en sus fibras superiores y a esfuerzos tensión en sus fibras inferiores. Además, las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos, debido a esta propiedad el pavimento a altas temperaturas el asfalto se vuelve menos elástico y más viscoso, por lo tanto, es propenso a sufrir deformaciones permanentes ante las cargas y a que el módulo resiliente disminuya; y a temperaturas bajas el asfalto

es susceptible a agrietarse debido a que se vuelve duro, quebradizo y su rigidez aumenta.

- Las mezclas asfálticas abiertas y cerradas muestran una variación considerable de humedad que va desde 11.07% a 42.83% y 17.33% a 49.07% respectivamente, los valores máximos tienden a darse con la presencia del factor climático de la precipitación y los valores mínimos con la temperatura alta del ambiente, esta variación puede provocar la disminución la adherencia del ligante a la superficie del agregado llevando al deterioro de las mezclas. Además, la humedad de la mezcla asfáltica cerrada tiende a ser ligeramente mayor que la humedad de la mezcla asfáltica abierta y a partir de los últimos días de diciembre la humedad de la mezcla asfáltica abierta tiende a igualarse a la humedad de la mezcla cerrada e incluso supera los valores, lo que nos indica que los vacíos de la mezcla abierta se acumularon de residuos provocando que la mezcla permanezca más húmeda que al inicio y pierda su propiedad drenante. También hay que considerar que la exposición del ligante al oxígeno y la presencia de agua provocan el envejecimiento por oxidación que aumenta la rigidez y la disminución de la tenacidad de las mezclas asfálticas lo que conduce al aumento de la fragilidad lo que aumenta la formación de grietas.
- De acuerdo a los espectros térmicos los valores máximos de temperatura se dan en el rango de 10:00 a 14:00, lo cual nos indica el horario ideal al cual el hormigón asfáltico debe ser transportado para su posterior tendido del asfalto, este horario ayudará que no exista un cambio drástico de cambio de temperatura, para que se conserven los rangos de temperaturas especificados en el MOP-001-F-2002.
- Los dos sensores colocados a un tercio de cada muestra permitieron la obtención del gradiente térmico, el cual en la mezcla asfáltica cerrada se obtuvo un gradiente térmico máximo de 3.31°C/cm (lo que quiere decir que por cada centímetro existe una variación

de 3.31°C) y en la mezcla asfáltica abierta un gradiente térmico de 3.42°C/cm (lo que significa que por cada centímetro hay una variación de 3.42°C). El gradiente térmico de la mezcla asfáltica abierta es mayor al de la mezcla asfáltica cerrada ya que al poseer una mayor porosidad esta mezcla asfáltica se enfría más rápido.

- Según los datos facilitados por el INAMHI la temperatura máxima que se registró dentro del período analizado (2016-2020) a un nivel de confiabilidad del 50% es de 35.39°C; y de 36.31°C al 85% y la temperatura mínima a un nivel de confiabilidad del 50% es de 0,67 °C y de 0.41 °C a un nivel de confiabilidad del 85% estos valores determinan la oscilación térmica que existe en las transiciones de regiones en nuestro país.
- La oscilación térmica entre la Región Costa y la Región Sierra es de 18.75°C y la oscilación térmica entre la Región Sierra y Amazonía es de 18.16 °C, los cambios bruscos de temperatura producen cambios en las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas tales como su elasticidad y viscosidad anteriormente descritas.
- La Radiación Máxima registrada en el período analizado es de 2000 W/m<sup>2</sup>, dicha radiación se registró en la Región Sierra debido a que se encuentra a una mayor altitud que las demás regiones, al poseer una radiación alta provoca el envejecimiento prematuro de la mezcla asfáltica.
- Al calcular las temperaturas máximas del pavimento con los Modelos SHRPP y LTPP a los diferentes niveles de confiabilidad (50% y 85%). Se puede concluir que los valores calculados para la temperatura máxima no varían, el valor calculado con el modelo SHRP a un nivel de confiabilidad del 50% es de 56.79°C y con el modelo LTPP al mismo nivel de confiabilidad es de 56.88°C; del mismo modo a un nivel de confiabilidad del 85% la temperatura máxima calculada con el modelo SHRP es de 57.83°C y utilizando el modelo LTPP tenemos una temperatura máxima de 60.04°C.

- Existe una variación entre los modelos al calcular la temperatura mínima del pavimento, ya que la temperatura mínima calculada por medio del modelo SHRP a un nivel de confiabilidad del 50% es de  $1.66^{\circ}\text{C}$  y por el modelo LTPP nos da un valor de  $9.27^{\circ}\text{C}$ ; y a un nivel de confiabilidad del 85% tenemos un valor de  $0.63^{\circ}\text{C}$  calculado por el modelo SHRP y  $7.09^{\circ}\text{C}$  por el modelo LTPP. Dichas variaciones surgen a que el modelo LTPP incluye el parámetro de latitud en su ecuación y el modelo SHRP.
- Se estima un grado PG 58-22 para las provincias del Carchi, Cañar, Azuay y Napo; y para el resto de provincias del país el grado PG64-22; ya que los dos grados PG cumplen con las condiciones climáticas para cada una de las provincias a las cuales fueron asignados.

## Recomendaciones

- Utilizar mezclas asfálticas cerradas en lugares donde se presenten temperaturas bajas y alta carga vehicular para evitar el agrietamiento por bajas temperaturas debido a que este tipo de mezclas retienen más la temperatura, y al poseer un menor porcentaje de vacíos, este tiende a presentar un mejor comportamiento a la resistencia por la fatiga producida por la acción repetida de cargas del tránsito. Y en lugares donde existe un alto nivel de pluviosidad utilizar mezclas asfálticas abiertas debido a que éstas son más drenantes que las mezclas asfálticas cerradas al fin de evitar problemas de humedad que disgregan el material asfáltico y los agregados del pavimento.
- Se recomienda realizar el transporte y tendido del asfalto entre las horas de 10:00 a 14:00 debido a que en este período de tiempo se registran los valores máximos de los espectros térmicos, lo que permitirá conservar la temperatura interna de la mezcla asfáltica, para su posterior tendido.
- Utilizar dos más sensores para el cálculo del gradiente térmico en mezclas asfálticas, debido a que un gradiente térmico alto causa alabeo esto provoca un esfuerzo de tensión en la parte inferior de la capa estabilizada llevando al agrietamiento cuando se combina con los esfuerzos de tensión inducidos por el tránsito, por lo que se debe tener en consideración los cambios climáticos de la región donde se va a utilizar la mezcla asfáltica.
- Para evitar la disminución de adherencia entre materiales de las mezclas asfálticas se requiere de aditivos mejoradores de adherencia según las recomendaciones o especificaciones del fabricante, estos productos suelen brindar una mayor durabilidad a la capa de rodadura.

- Para conservar en estado óptimo de las vías pavimentadas con mezclas asfálticas abiertas se requiere de ciertas medidas de mantenimiento, una de ellas es la limpieza con agua a presión que evita la obstrucción de los poros.
- Para futuros estudios relacionados contar con más estaciones meteorológicas ya que se tendrán más datos para el cálculo de la temperatura del pavimento con los modelos SHRP y LTTP de esta forma se puede tener perfiles de temperatura del pavimento en tiempo real.
- Considerar la alta oscilación térmica que existe en las transiciones de regiones y tomar las medidas adecuadas al momento de tender el asfalto con el fin de evitar las diferentes patologías de pavimento que se presentan por el cambio brusco de temperaturas que se suscitan en esos lugares.
- Las Regiones Insular, Costa, Oriente y la Provincia de Loja de acuerdo a su tipo de clima cálido se estima usar el asfalto AC-20 o AC-40; la provincia de Tungurahua el asfalto AC-10 o AC-20 y el resto de provincias de la Sierra el asfalto tipo AC-5 o AC-10.
- En el proceso de diseño de un pavimento se recomienda usar el grado PG58-22 para las provincias de Carchi, Cañar, Azuay y Napo; y el grado PG64-22 para el resto de provincias.

## Bibliografía

- AASHTO. (2006). Diseño de Pavimentos (AASHTO 93). En *AASHTO Design Procedures For New Pavements*.  
[https://www.academia.edu/34103801/DISENO\\_DE\\_PAVIMENTO\\_METODO\\_AASHTO\\_93\\_ESPANOL\\_1\\_](https://www.academia.edu/34103801/DISENO_DE_PAVIMENTO_METODO_AASHTO_93_ESPANOL_1_)
- AASHTO T 245. (2008). Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. En *AASHTO*. <https://fddocuments.in/reader/full/aashto-t-245-56812cbf2503e>
- Abril Olaya, F., & Sánchez Quintero, S. (2017). *Sistema de monitorización inalámbrica de temperatura y radiación solar en la estructura de un pavimento asfáltico*.  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi\\_0Ovp2LDuAhXQxlkKHYGJBpQQFjAAegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fvitela.javerianacali.edu.co%2Fhandle%2F11522%2F8214&usg=AOvVaw2ZKUf0kNOA1FYogiiSh2Ab](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi_0Ovp2LDuAhXQxlkKHYGJBpQQFjAAegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fvitela.javerianacali.edu.co%2Fhandle%2F11522%2F8214&usg=AOvVaw2ZKUf0kNOA1FYogiiSh2Ab)
- Aguiar Velasquez, D. A. (2019). *Análisis de desempeño por humedad de una mezcla asfáltica convencional con gradación Marshall y Superpave*. 246.  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9093>
- Alonso Aenlle, A., Morales Fournier, J., Garrido Acosta, C., Abreu Hernández, D. O., & Martínez Rojo, T. E. (s. f.). *Determinación y zonificación del grado de desempeño de los asfaltos para Cuba según la metodología Superpave*. 38, 20.  
<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/13310>
- Andrades, M., & Múñez, C. (2012). *Fundamentos de Climatología*.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=267903>
- Arenas Lozano, H. L. (2006). *Tecnología del cemento asfáltico* (FAID (ed.); Quinta edi).

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjFhsbWxNDuAhVUQjABHRT7B6sQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Frepository.ucatolica.edu.co%2Fbitstream%2F10983%2F4556%2F5%2FRAE\\_An%25C3%25A1lisis-monot%25C3%25B3nico-MDC-as](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjFhsbWxNDuAhVUQjABHRT7B6sQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Frepository.ucatolica.edu.co%2Fbitstream%2F10983%2F4556%2F5%2FRAE_An%25C3%25A1lisis-monot%25C3%25B3nico-MDC-as)

Arias Sanchez, D. C., Velásquez Garnica, P. C., Sanabria Sandino, J., Loría Salazar, L. G., & Villegas Villegas, R. E. (2017). *Determinación del cemento asfáltico óptimo de acuerdo a su grado de desempeño adecuado a la zona climática del altiplano boliviano.pdf* (p. 12).

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1025/Determinacion-del-cemento-asfatico-optimo-de-acuerdo-a-su-grado-de-desempeno.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Arispe, L. (2020). *Fluidos de Perforación*. Course Hero.

<https://www.coursehero.com/file/43161843/UNIDAD-3-Reologiapdf/>

Armijos Cuenca, V. F. (2011). *Estudio del diseño estructural y constructivo de pavimentos articulados en base a bloques de asfalto*. [Tesis de Grado de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería].

<https://repositorio.uc.cl/handle/11534/1468>

Asphalt Institute. (1982). *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfálticas en caliente*. <https://es.scribd.com/document/66112307/MS-22-Principios-de-Construccion-de-Pavimentos-de-Mezcla-Asfalticas>

ASTM C 136. (2005). *ASTM Designación C-136 1*.

ASTM D 2041. (2000). *Método estándar de prueba para Gravedad específica teórica máxima y densidad de mezclas bituminosas de pavimentación* (Vol. 04).

[https://www.academia.edu/16577120/59341222\\_ASTM\\_D\\_2041\\_Gravedad\\_Especificas\\_Maxima\\_Teorica\\_en\\_Mezclas\\_Bituminosas](https://www.academia.edu/16577120/59341222_ASTM_D_2041_Gravedad_Especificas_Maxima_Teorica_en_Mezclas_Bituminosas)

ASTM D 2419. (2002). *Método Para Determinar El Equivalente De Arena ( Astm D-2419 Aashto T176-00 )*.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjY6Ybfw6PvAhXmRTABHViNA3oQFjAFegQIARAD&url=http%3A%2F%2Fingenieriasalva.blogspot.com%2F2009%2F04%2Fastm-designacion-d-2419-02.html&usg=AOvVaw0W6Ts4W\\_BgTIPOhBpWoXZm](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjY6Ybfw6PvAhXmRTABHViNA3oQFjAFegQIARAD&url=http%3A%2F%2Fingenieriasalva.blogspot.com%2F2009%2F04%2Fastm-designacion-d-2419-02.html&usg=AOvVaw0W6Ts4W_BgTIPOhBpWoXZm)

ASTM D 2726. (2000). *Bulk specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*. <https://es.scribd.com/document/439633502/ASTM-D-2726-Bitumen-Density-Code>

ASTM D 70. (2009). Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer). En *Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 04).

<https://doi.org/10.1520/D0070-09E01.2>

ASTM D 92. (2009). D0092 Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. En *Annual Book of ASTM Standards*.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwitr7Dz4ffuAhWqp1kKHZH5Aa4QFjAAegQIARAD&url=http%3A%2F%2Fwww.spehrshimi.com%2FASTM%2FD92.pdf&usg=AOvVaw3eF4OKIY96ohoqyy\\_6MAKp](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwitr7Dz4ffuAhWqp1kKHZH5Aa4QFjAAegQIARAD&url=http%3A%2F%2Fwww.spehrshimi.com%2FASTM%2FD92.pdf&usg=AOvVaw3eF4OKIY96ohoqyy_6MAKp)

ASTM International. (2010). *Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement*. <https://doi.org/10.1520/D0946>

Austroroads. (2008). Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design. En *Guide*

to *Pavement Technology*.

<https://www.onlinepublications.austroads.com.au/items/AGPT02-17>

Autopistas an Abertis Company. (s. f.). *Mezclas drenantes*. Recuperado 6 de febrero de 2021, de

<https://www.autopistas.com/blog/mezclas-drenantes/>

Banco de Desarrollo de América Latina. (2019a, febrero 4). *Carreteras deben estar preparadas*

*para enfrentar el cambio climático* | CAF. CAF Noticias.

<https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2018/11/carreteras-deben-estar-preparadas-para-enfrentar-el-cambio-climatico/>

Banco de Desarrollo de América Latina. (2019b, marzo 2). *Las carreteras de América Latina no*

*están suficientemente preparadas para enfrentar el cambio climático* | CAF. CAF Noticias.

<https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2018/10/las-carreteras-de-america-latina-no-estan-suficientemente-preparadas-para-enfrentar-el-cambio-climatico/>

Barajas Reina, E., & Buitrago Martínez, B. E. (2017). *Análisis Comparativo del Sistema de Gestión de los Pavimentos o Mantenimiento Vial de la Ciudad de Bogotá con la Ciudad de Sao Paulo*

[Tesis de Pregado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/15235>

BITUMIX CVV. (2005). *Metodología SUPERPAVE para el Diseño de Mezclas Asfálticas*.

Bonilla Miranda, E. (2013). Determinación del tipo de Cemento Asfáltico según el Grado de

Desempeño, de Acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país [Tesis de Pregado, Universidad de Costa Rica]. En *Journal of Chemical Information and Modeling*

(Vol. 53, Número 9). <http://hdl.handle.net/10669/30306>

Bricogeek. (2016). *Sensor de temperatura y humedad SHT10 (Acero Inox) DFRobot SEN0148* |

*BricoGeek.com*. <https://tienda.bricogeek.com/sensores-temperatura/762-sensor-de->

temperatura-y-humedad-sht10-acero-inox.html

- Burbano Del Castillo, J., & Salazar Salazar, J. (2019). *Utilización de viruta de pvc en mezclas asfálticas en caliente* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador].  
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/17566>
- Carvajal Mora, J. E., & Chicaiza Fuentes, J. P. (2016). *Diseño de mezcla asfáltica porosa para zonas de bajas temperaturas, aplicada a mejorar la seguridad vial elaborado* [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE].  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/12100>
- Castro, M. (2011). *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano* [Tesis de Grado, Pontificia Universidad Javeriana]. <http://hdl.handle.net/10554/7483>
- CEPAL. (2010). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe*.  
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/2974-la-economia-cambio-climatico-america-latina-caribe-sintesis-2010>
- Chicaiza Sambonino, M. F. (2012). *Rehabilitación vial con reciclado y emulsión asfáltica con aplicación en las vías de la ciudad de Quito* (Número Figura 1) [Tesis de Pregrado, Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2198>
- Clemente Huarcaya, P. (2019). Universidad Nacional Del Centro Del Peru [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. En *Universidad Nacional Del Centro Del Centro De Posgrado*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5992>
- CLIMATE DATA. (2020). *Clima Pifo: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Pifo - Climate-Data.org*. CLIMATE DATA. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-pichincha/pifo-179930/>

Corporación Cartográfica. (s. f.). *Empresa de Ingeniería y Arquitectura en Ecuador*. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://www.corporacioncartografica.com/serv/sig>

Corrales Chiliquina, T. (2015). *Propuesta de método de diseño de mezclas asfálticas abiertas en caliente como capa de alivio* [Tesis de Tecnología, Escuela Politécnica Nacional].  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11279>

Crespin, R., Santa, I., & Torres, P. (2012). *Aplicacion del Método Marshall y Granulometría Superpave en el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente con Asfalto Clasificación Grado de Desempeño* [[Tesis de Pregrado, Universidad de El Salvador]].  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiW9c2Y8u\\_uAhWRjFkKHxHAc0QFjARegQICxAC&url=https%3A%2F%2Fries.edu.sv%2Fid%2Fprint%2F1796%2F1%2FTESIS\\_FULL\\_CORR.pdf&usg=AOvVaw1Wy7fPT8KJFXMP4iGjUoIO](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiW9c2Y8u_uAhWRjFkKHxHAc0QFjARegQICxAC&url=https%3A%2F%2Fries.edu.sv%2Fid%2Fprint%2F1796%2F1%2FTESIS_FULL_CORR.pdf&usg=AOvVaw1Wy7fPT8KJFXMP4iGjUoIO)

De Llano, C. (2003). *Física*. Editorial Progreso, S.A. de C.V.  
<https://books.google.com.ec/books?id=xmOOAMBAFeEC&pg=PA212&dq=Las+formas+de+transferir+calor+son+las+siguientes:+Conducción,+convección+y+radiación&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjHpN6Y6c7uAhURqlkKHUCeChAQuwUwB3oEAgQBw#v=onepage&q=Las formas de transferir cal>

Del Águila Rodríguez, P. (2000). *Experiencias sobre el diseño y criterios para la construcción de pavimentos en zonas de altura*.  
[https://www.academia.edu/download/39372696/1.PAVIMENTOS\\_EN\\_ALTURA.pdf](https://www.academia.edu/download/39372696/1.PAVIMENTOS_EN_ALTURA.pdf)

Del Valle, L. (2018). *DS18B20 sensor de temperatura para líquidos con Arduino*. Programar Fácil.  
<https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>

- Delbono, H. L. (2014). *Caracterización de las emulsiones asfálticas Capítulo IV* [Tesis Doctoral, UTN]. <https://docplayer.es/54982049-Caracterizacion-de-las-emulsiones-asfalticas.html>
- EERI. (s. f.). *¿Qué son los datos ráster?* ArcGIS for Desktop. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Encalada, S. (2017, junio 8). *Tiempos atmosféricos*. Slideshare. <https://es.slideshare.net/sofiaencalada1/tiempos-atmosfericos>
- ESRI. (s. f.). *Introducción a SIG*. ArcGIS Resource Center. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000t000000.htm>
- Gabela Berrones, D. H. (2013). *Plan de mantenimiento de la carpeta asfáltica de la sección del paso lateral de Ambato comprendida entre Huachi grande y el redondel del terremoto* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/6030>
- Garzón Carvajal, E. J., & Cárdenas Díaz, Á. H. (2013). *Variación de temperatura de los componentes de una mezcla densa en caliente tipo 3 con cemento asfáltico 80-100* [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/914>
- Godoy, L. (2005). *Plasticidad*. <https://academic.uprm.edu/~lgodoy/courses/INCI6017/3> Plasticidad/Física de Plasticidad.pdf
- Goetendia Torres, F. S., & Pérez Quispe, V. (2015). *Influencia de la temperatura en el deterioro de la carpeta asfáltica en la carretera nacional tramo: Rumichaca - Los Libertadores (Huaytará) (PE-28A)* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/262>

- Huamán, N. (2011). *La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en Perú* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería Perú]. <https://1library.co/document/z126wley-deformacion-permanente-mezclas-asfalticas-consecuente-deterioro-pavimentos-asfalticos.html>
- Instituto Nacional de Vías. (2012). *Materiales y Mezclas Asfálticas y Prospección de Pavimentos*.
- INV E 724. (2006). *Índice de penetración de cementos asfálticos* (Vol. 7649).  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjtw5OI5PfuAhWKRjABHVXrAB4QFjAAegQIARAD&url=ftp%3A%2F%2Fftp.unicauca.edu.co%2FFacultades%2FFIC%2FIngCivil%2FEspecificaciones\\_Normas\\_INV-07%2FNormas%2FNorma%2520INV%252](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjtw5OI5PfuAhWKRjABHVXrAB4QFjAAegQIARAD&url=ftp%3A%2F%2Fftp.unicauca.edu.co%2FFacultades%2FFIC%2FIngCivil%2FEspecificaciones_Normas_INV-07%2FNormas%2FNorma%2520INV%252)
- INV E 736. (2007). *Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas*.  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiO4KzQi6TvAhVHo1kKHavsBfoQFjAAegQIARAD&url=ftp%3A%2F%2Fftp.unicauca.edu.co%2FFacultades%2FFIC%2FIngCivil%2FEspecificaciones\\_Normas\\_INV-07%2FNormas%2FNorma%2520INV%2520E-736-07.pdf&u](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiO4KzQi6TvAhVHo1kKHavsBfoQFjAAegQIARAD&url=ftp%3A%2F%2Fftp.unicauca.edu.co%2FFacultades%2FFIC%2FIngCivil%2FEspecificaciones_Normas_INV-07%2FNormas%2FNorma%2520INV%2520E-736-07.pdf&u)
- INV E 748. (2007). *Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato marshall*.  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwinodP3jaXvAhUGxVkkKHfDnCSQQFjAAegQIAxAD&url=ftp%3A%2F%2Fftp.unicauca.edu.co%2FFacultades%2FFIC%2FIngCivil%2FEspecificaciones\\_Normas\\_INV-07%2FNormas%2FNorma%2520INV%252](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwinodP3jaXvAhUGxVkkKHfDnCSQQFjAAegQIAxAD&url=ftp%3A%2F%2Fftp.unicauca.edu.co%2FFacultades%2FFIC%2FIngCivil%2FEspecificaciones_Normas_INV-07%2FNormas%2FNorma%2520INV%252)
- INV E 760. (2007). *Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cantabro de pérdida por desgaste*.

[ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_INV-07/Normas/Norma INV E-760-07.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma INV E-760-07.pdf)

INVIAS. (2013). *Mezcla drenante*.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiahS21l6XvAhVmMlkFHWwFAiIQFjAAegQIAxAD&url=http%3A%2F%2Fgerconcesion.co%2Finvias2013%2F453%2520MEZCLA%2520DRENANTE.pdf&usg=AOvVaw0UtzOB-8vYqzMy7ZP1H64z>

Juyar Mora, G., & Pérez Cely, G. (1998). Comparación de Mezclas Asfálticas Drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar. *Revista de la Facultad de Ingeniería*.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiQ\\_cH3j9buAhVS1lkKHcm0BEwQFjAEegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F5313902.pdf&usg=AOvVaw2BdxFcaDubAwPTRPg6d54Q](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiQ_cH3j9buAhVS1lkKHcm0BEwQFjAEegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F5313902.pdf&usg=AOvVaw2BdxFcaDubAwPTRPg6d54Q)

Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., Romana, M., Blanco, V., & Del Val, M. Á. (2004). *Ingeniería de Carreteras Vol II* (Derechos R).

[https://www.academia.edu/43380215/Ingeniería\\_de\\_Carreteras\\_Vol\\_II\\_Carlos\\_Kraemer\\_José\\_María\\_Pardillo\\_Sandro\\_Rocci\\_Manuel\\_G\\_Romana\\_Víctor\\_Sánchez\\_Blanco\\_Miguel\\_Ángel\\_del\\_Val](https://www.academia.edu/43380215/Ingeniería_de_Carreteras_Vol_II_Carlos_Kraemer_José_María_Pardillo_Sandro_Rocci_Manuel_G_Romana_Víctor_Sánchez_Blanco_Miguel_Ángel_del_Val)

Leiva Villacorta, F., Camacho Garita, E., & Aguiar Moya, J. P. (2016). Simulación de variables climáticas en ensayos de daño acelerado de pavimentos a escala natural. *Revista Infraestructura Vial*, 18, 10. <https://doi.org/10.15517/iv.v18i32.29774>

Max Electrónica. (s. f.). *Sensor Capacitivo de Humedad de Suelo v1.2*. Recuperado 6 de febrero de 2021, de <https://maxelectronica.cl/temperatura-y-humedad/519-sensor-capacitivo-de->

humedad-de-suelo-v12.html

Maxim Integrated. (2019). *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. 92, 1–20. <https://www.maximintegrated.com/en/products/sensors/DS18B20-PAR.html>

Medina Palacios, A., & De la Cruz Puma, M. (2021). *Evaluación superficial del pavimento flexible del Jr . José Gálvez del distrito de Lince aplicando el método del PCI Evaluación superficial del pavimento flexible del Jr . José Gálvez del distrito de Lince aplicando el método del PCI* [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/581505>

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). *Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes*. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-wb-AprjuAhVM11kKHZHqASQQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.obraspublicas.gob.ec%2Fwp-content%2Fuploads%2Fdownloads%2F2021%2F01%2FMPR\\_Chimborazo\\_Cumanda\\_Especificaci](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-wb-AprjuAhVM11kKHZHqASQQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.obraspublicas.gob.ec%2Fwp-content%2Fuploads%2Fdownloads%2F2021%2F01%2FMPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaci)

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2016). *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación*.

Ministerio de Transporte de Colombia, Instituto Nacional de Vías, & Universidad Nacional de Colombia. (2006). Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles. En *Manual para la inspeccion visual de pavimentos flexibles*. [http://www.invias.gov.co/index.php/historico-cartelera-virtual/doc\\_download/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles](http://www.invias.gov.co/index.php/historico-cartelera-virtual/doc_download/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles)

- Ministerio de Transporte y Obras Públicas República del Ecuador [MTOPE]. (2020). *Mapa del Estado de la Red vial estatal*. [https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/05/RVE\\_Mapa\\_Vial\\_Ecuador\\_ABRIL2020.pdf](https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/05/RVE_Mapa_Vial_Ecuador_ABRIL2020.pdf)
- Miranda Calderón, R. (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 [Tesis de Pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. En *Emecanica.Ingenieria.Usac.Edu.Gt*. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/3227>
- Morea, F. (2011). *Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/https://doi.org/10.35537/10915/1457>
- Nacevilla Toaquiza, L. J. (2018). *Evaluación Funcional y Estructural de Pavimentos Flexibles mediante Tecnología Termográfica y Método UAV* [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15050>
- NTE INEN 698. (2010). Determinación del contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables. NTE INEN 698:2010. En *Instituto Ecuatoriano De Normalización* (Vol. 003). [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiefDi\\_fbuAhUBy1kKHfjDDxIQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2F698-1.pdf&usg=AOvVaw1rah3yesNMTQ73O2Aw\\_sAJ](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiefDi_fbuAhUBy1kKHfjDDxIQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2F698-1.pdf&usg=AOvVaw1rah3yesNMTQ73O2Aw_sAJ)
- NTE INEN 856. (2010). Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino INEN 856. En *Instituto Ecuatoriano De Normalización*. <https://doi.org/10.17226/18725>
- NTE INEN 857. (2010). Determinación de la Densidad Relativa(Gravedad Especifica) y Absorción

del Arido Grueso. INEN 857. En *Instituto Ecuatoriano De Normalización* (Vol. 1, Número Primera Edición). <http://apps.normalizacion.gob.ec>

NTE INEN 860. (2011). *Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles INEN 860:2011.*

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj2yt7H->

[vTuAhVDzlkKHT0IA7AQFjAAegQIARAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2F860.pdf&usg=AOvVaw345LZnpC9HVDv9UUWtt5y4](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj2yt7H-vTuAhVDzlkKHT0IA7AQFjAAegQIARAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2F860.pdf&usg=AOvVaw345LZnpC9HVDv9UUWtt5y4)

NTE INEN 916. (2013). Materiales bituminosos. Determinación de la ductilidad. En *Instituto Ecuatoriano De Normalización: Vol. First Edit.*

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjSr5bo6ffuAhXmnuAKHZ9kCmYQFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2FNTE\\_INEN\\_916.pdf&usg=AOvVaw3mycQzk6bhJL\\_gY9ljaUg2](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjSr5bo6ffuAhXmnuAKHZ9kCmYQFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2FNTE_INEN_916.pdf&usg=AOvVaw3mycQzk6bhJL_gY9ljaUg2)

NTE INEN 917. (2013). Materiales bituminosos. Determinación de la penetración. En *Instituto Ecuatoriano De Normalización: Vol. First Edit.*

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjg94rk4\\_fuAhUgRzABHUQRAX0QFjAAegQIARAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2FNTE\\_INEN\\_917.pdf&usg=AOvVaw25HvU7ryNNG\\_tfE7ICSCAR](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjg94rk4_fuAhUgRzABHUQRAX0QFjAAegQIARAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2FNTE_INEN_917.pdf&usg=AOvVaw25HvU7ryNNG_tfE7ICSCAR)

NTE INEN 920. (2013). Materiales bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento (método de anillo y bola). *Instituto Ecuatoriano de Normalización.*

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&>

ved=2ahUKEwiVnp7T5vfuAhWITN8KHxliDLMQFjABegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.normalizacion.gob.ec%2Fbuzon%2Fnormas%2FNTE\_INEN\_920.pdf&usg=AOvVaw2WMg64zkvI3lGnc1aC07fY

- Obando Gamboa, C. J. (2017). *Influencia del agua en el desempeño de los pavimentos : lluvia ácida Influence of water in the performance of road surface : acid rain Resumen*.  
<https://biblat.unam.mx/es/revista/investigacion-e-innovacion-en-ingenierias/articulo/influencia-del-agua-en-el-desempeno-de-los-pavimentos-lluvia-acida>
- Padilla Rodríguez, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista* [Tesis de Pregrado]. <http://hdl.handle.net/2099.1/3334>
- Quimikao. (2017). *KAOAMIN*.
- Reyes Ortiz, Ó. J., Camacho Tauta, F. J., & Reyes Lizcano, F. (2006). Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica. *Revista Facultad de Ingeniería, 36*, 126.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302006000200010&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302006000200010&lng=en&tlng=es)
- Reyes Ortiz, Ó. J., & Millán Montejó, S. (2009). Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. *Revista Facultad de Ingeniería, 13(2)*, 309–324. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-21262009000200005](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262009000200005)
- Rico Rodríguez, A., Tellez Gutierrez, R., & Garnica Anguas, P. (1998). *Pavimentos flexibles Problemática , metodologías de diseño y tendencias. 104*, 145.

<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt104.pdf>

Rivera, J. (2015, diciembre 5). *La red vial es imprescindible para el desarrollo y crecimiento de un país*. UDEP Hoy. <http://udep.edu.pe/hoy/2015/la-red-vial-es-imprescindible-para-el-desarrollo-y-crecimiento-de-un-pais/>

Rodríguez Avial, M., & García, A. G. (2012). *Elasticidad y resitencia de materiales I*.

<http://portal.uned.es/Publicaciones/htdocs/pdf.jsp?articulo=6890206GR01A01>

Rondón Quintana, H. A., Ruge Cárdenas, J. C., & Moreno Anselmi, L. Á. (2016). Effect of water on the bitumen and its possible influence in the moisture damage on a porous asphalt mixture. *Ingeniare*, 24(4), 558–569. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052016000400003>

Salazar Delgado, J. (2011). *asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico*

*Centroamericano Keywords* : 25–38.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi6p8\\_53tDuAhXhw1kKHV8mAM4QFjADegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fdia.inet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F6240952.pdf&usg=AOvVaw2OAWDIYBmVvIrpkhCo8Ub](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi6p8_53tDuAhXhw1kKHV8mAM4QFjADegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fdia.inet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F6240952.pdf&usg=AOvVaw2OAWDIYBmVvIrpkhCo8Ub)

Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2002). *Manual Centroamericano para*

*Diseño de Pavimentos*. <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/handle/123456789/4114>

Sensiron the Sensor Company. (2010). *Datasheet SHT1x - Humidity and Temperature Sensor*.

[https://www.advanticsys.com/shop/documents/1320249906\\_Temperature\\_Humidity\\_Sensiron\\_SHT1x.pdf](https://www.advanticsys.com/shop/documents/1320249906_Temperature_Humidity_Sensiron_SHT1x.pdf)

Silva Friderichsen, J. (2015). *Estudios de innovación tecnológica determinación de grado de desempeño PG en cementos asfálticos*.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-x->

[CHkbbuAhVDuVkkHYAYBAoQFjABegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.vialidad.cl%2Farea\\_sdevialidad%2Flaboracionacional%2FMaterialCursos%2Fasfaltosuperpave%252020150514%2520M](http%3A%2F%2Fwww.vialidad.cl%2Farea_sdevialidad%2Flaboracionacional%2FMaterialCursos%2Fasfaltosuperpave%252020150514%2520M)

Trujillo Cebrián, J. J. (2013). *Ejecución de pavimentos de hormigón impreso*. (1ª). IC Editorial.

[https://books.google.com.ec/books?id=0FfqAgAAQBAJ&pg=PT9&dq=definición+pavimento&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjr7bmY\\_abuAhUy1VkkHXjsA24Q6AEwAHoECAYQAg#v=onepage&q=definición+pavimento&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=0FfqAgAAQBAJ&pg=PT9&dq=definición+pavimento&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjr7bmY_abuAhUy1VkkHXjsA24Q6AEwAHoECAYQAg#v=onepage&q=definición+pavimento&f=false)

Universidad Mayor de San Simón. (2012). *Manual Completo de Diseño de Pavimentos*.

<https://www.libreriaingeniero.com/2019/06/manual-completo-diseno-de-pavimentos-umss.html>

Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., & Martínez, A. (2012). Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles. *Revista de la Construcción*, 11(1), 88–101. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2012000100009>

Vásquez, L. (2002). *Pavement Condition Index (Pci) para Pavimentos Asfálticos y de Concreto en Carreteras*.

Yates, D., Purkey, D., Flores López, F., Forni, L., Estacio, J., Depsky, N., Mehta, V., & Tehelen, K. (2013). *Distrito Metropolitano de Quito : Análisis Integrado de Amenazas Relacionada con el Cambio Climático , aspectos naturales y socioeconómicos*.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiE3pKXy8TuAhWF1FkkHffNBESQFjACegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.q>

uitoambiente.gob.ec%2Fambiente%2Fphocadownload%2Fcambio\_climatico%2FProyectos  
%2Fwp1\_analisis\_clima\_dmq.pdf

Yela Quijada, J. R. (2017). *Determinación del gradiente térmico en losas de pavimentos de concreto hidráulico* [Tesis de Pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala].  
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/7052>

Zarate Aquino, M. (2005). *Diseño de pavimentos flexibles*. [www.ptolomeo.unam.mx](http://www.ptolomeo.unam.mx)