



UNIVERSIDAD DEL CAUCA, ERIKA JOHANNA GUERRERO GUERRERO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

**INFORME FINAL DE PASANTIA
PASANTE AUXILIAR DE INGENIERÍA EN LA ELABORACIÓN DE LOS
MANUALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE ALTOS Y
MEDIOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO DE COLOMBIA
“ESTUDIO VARIABLE CLIMA”**



**Pasante:
ERIKA JOHANNA GUERRERO
Director de pasantía:
Ing. LUCIO GERARDO CRUZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
POPAYÁN
2015**



NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y jurado de la Práctica Profesional PASANTE AUXILIAR DE INGENIERÍA EN LA ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE ALTOS Y MEDIOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO DE COLOMBIA “ESTUDIO VARIABLE CLIMA”. Realizada por ERIKA JOHANNA GUERRERO GUERRERO, una vez evaluado el informe final y la sustentación del mismo, autorizan a la egresada para que desarrolle las gestiones administrativas para optar por el título de Ingeniero Civil.

Director de pasantía.

Jurado 1

Jurado 2

Popayán ____ de julio de 2015



AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento a mi madre, quien luchó para ponerme en lugar que ahora estoy, gracias a su entrega y dedicación hacia mí sin ella no hubiese sido posible este logro.

Agradezco a toda mi familia por su apoyo incondicional, algo vital en el transcurso de mi carrera.

Agradezco al ingeniero Lucio Gerardo Cruz, por ser mi guía durante el desarrollo de mi trabajo de grado estos últimos meses.

Agradezco al ingeniero Carlos Benavides por brindarme su apoyo desde el momento que inicie mi trabajo de grado.

Agradezco a mis compañeros de carrera y a mi novio por aportarme sus conocimientos y por el gran apoyo que me brindaron. Fueron momentos inolvidables cerca de ustedes.



CONTENIDO

1. TITULO DE LA PASANTIA.....	7
2. INTRODUCCIÓN	8
3. OBJETIVOS	9
3.1 Objetivo general.....	9
3.2 Objetivos específicos	9
4. INFORMACIÓN GENERAL	10
4.1 Nombre del pasante.....	10
4.2 Entidad receptora	10
4.3 Tutor por parte de la Universidad del Cauca	10
4.4 Duración de la pasantía	10
4.5 Descripción general del proyecto en el cual se desarrolla la pasantía	10
5. MARCO TEÓRICO.....	11
5.1 Generalidades	11
5.2 Parámetros de la variable clima considerados en el diseño y comportamiento de un pavimento flexible.....	11
5.2.1 Influencia de la temperatura.....	11
5.2.2 Influencia del agua en los pavimentos	12
5.2.3 Incidencia de la radiación solar	15
5.2.4 Incidencia de la velocidad del viento.....	16
5.2.5 Incidencia de la Humedad relativa	17
5.3 Consideraciones del clima en la metodología moderna de pavimentos flexibles, MPDG.....	17
6. ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE LA PASANTÍA.....	19
6.1 Introducción	19
6.2 Participar en el grupo de la variable clima.....	19



6.3 Participar en la recolección y procesamiento de información de la variable clima, que participa en el diseño de los pavimentos de altos y medios volúmenes de tránsito.	19
6.4 Revisar información bibliográfica sobre diseño de pavimentos, específicamente acerca de cómo el clima afecta e influencia el diseño de pavimentos.....	19
6.4.1 Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con Bajos volúmenes de tránsito, (1997).....	19
6.4.2 Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con Altos y Medios volúmenes de tránsito, (1998).....	20
6.4.3 Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con Bajos volúmenes de tránsito, (2007).....	20
6.4.4 Búsqueda de la metodología de clasificación climática de Thornthwaite, (1948).	20
6.4.5 Leer la guía MPDG, capítulo 3 Efectos Ambientales.	21
6.4.6 Leer la metodología de Penman and Monteith. (Allen et al. 1998)	21
6.4.7 Revisar el método de diferencias acumuladas y como se calcula	22
6.4.8 Lectura del Atlas Climatológico de Colombia, IDEAM	22
6.4.9 Lectura de tesis de Ariana Perera “Determinación y análisis de los factores climáticos críticos para el diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica” ..	22
6.4.10 Lectura de la Guía AASHTO, 1993	23
6.4.11 Lectura del manual de drenaje para carreteras, capítulo 5, Drenaje sub-superficial.....	23
6.4.12 Lectura Witczak et al 2006- EICM-140D-Final report	23
6.5 Procesar la información que se ha recolectado	24
6.5.1 Datos de entrada, ejemplo de cálculo de la Evapotranspiración de referencia, usando la metodología de Penman and Monteith, además se realiza el cálculo del índice de Thornthwaite	24
6.5.2 Ejemplo de cálculo de las diferencias acumuladas y el índice de Thornthwaite.	28



6.5.3 Ejemplo completo de cálculo de la evapotranspiración de referencia usando la metodología de Penman and Monteith, con Temperatura máxima y mínima	36
6.5.4 Cálculo del índice de Thornthwaite utilizando la evapotranspiración calculada con la ecuación de Penman and Monteith.....	38
6.5.5 Ejemplo de cálculo del índice de Thornthwaite, usando la metodología original	38
6.6 Manejar programas de computador requeridos para el análisis estructural de pavimentos.....	40
7. CONCLUSIONES.....	54
8. BIBLIOGRAFIA	55



1. TITULO DE LA PASANTIA

PASANTE AUXILIAR DE INGENIERÍA EN LA ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE ALTOS Y MEDIOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO DE COLOMBIA “ESTUDIO VARIABLE CLIMA”.



2. INTRODUCCIÓN

La modalidad escogida para el desarrollo del trabajo de grado es pasantía o práctica empresarial, con el ánimo de poner en práctica el conocimiento adquirido en el proceso de formación, además teniendo en cuenta que la modalidad permite un desarrollo íntegro en la formación como Ingeniero Civil.

De acuerdo a la resolución No.281 del 10 de junio del 2005, por la cual se reglamenta el trabajo de grado en la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, y mediante la cual se establece la modalidad de pasantía o práctica empresarial para optar por el título profesional de ingeniero civil, y basados en los conocimientos teóricos aprendidos en el Alma Mater, se presentó la solicitud para participar como pasante auxiliar de ingeniería en LA ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE COLOMBIA. “ESTUDIO VARIABLE CLIMA Y VARIABLE SUBRASANTE”.

Finalmente por lo extenso del trabajo, la forma como se dividieron las tareas, los grupos de trabajo y la dedicación se decidió en el convenio que se trabajara solamente el “ESTUDIO VARIABLE CLIMA”

Por lo anterior y gracias al contrato que se estableció entre la Universidad del Cauca y el Instituto Nacional de Vías, es posible la participación en LA ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE COLOMBIA, participando en actividades técnicas requeridas para el desarrollo del proyecto.



3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Participar como auxiliar de ingeniería en la elaboración de los manuales de altos y medios volúmenes de tránsito, participando directamente en el estudio del capítulo variable clima, dentro del contrato suscrito entre la Universidad del Cauca y el Instituto Nacional de Vías, para poder aplicar los conceptos básicos de pavimentos adquiridos durante la formación académica en la facultad de ingeniería.

3.2 Objetivos específicos

- Participar en el grupo de la variable clima
- Participar en la recolección y procesamiento de información de la variable clima, que participa en el diseño de los pavimentos de altos y medios volúmenes de tránsito.
- Revisar información bibliográfica sobre diseño de pavimentos, específicamente acerca de cómo el clima y afecta e influencia el diseño de pavimentos.
- Procesar la información que se ha recolectado.
- Manejar programas de computador requeridos para el análisis estructural de pavimentos.
- Presentar informes mensuales de avance de la pasantía.
- Presentar un informe final de acuerdo a lo estipulado por la Universidad del Cauca y adicionalmente realizar la sustentación, socializando en forma general el desarrollo de la pasantía.



4. INFORMACIÓN GENERAL

4.1 Nombre del pasante

Erika Johanna Guerrero Guerrero

4.2 Entidad receptora

Universidad del Cauca

4.3 Tutor por parte de la Universidad del Cauca

Ing. Lucio Gerardo Cruz

4.4 Duración de la pasantía

La modalidad adoptada tiene una duración de 640 horas para cumplir con el requisito de trabajo de grado; Inició en el mes de marzo del 2015, y terminando en el mes de julio de 2015.

4.5 Descripción general del proyecto en el cual se desarrolla la pasantía

El Instituto Nacional de Vías de Colombia conjuntamente con la Universidad del Cauca, han suscrito el **Convenio Interadministrativo No. 2141 del año 2014** para elaborar el nuevo MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA VÍAS CON BAJOS, MEDIOS Y ALTOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO y EL MANUAL DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO PARA CARRETERAS para la actualización de los manuales de capacidad y niveles de servicio en carreteras y de diseño de pavimentos asfálticos en carreteras con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

En este proyecto la Universidad del Cauca, participa con personal correspondiente a su planta de profesores de la Facultad de Ingeniería Civil y con la asesoría de expertos nacionales e internacionales y con un personal auxiliar contratado y la participación de algunos estudiantes de la facultad de Ingeniería Civil.

El trabajo está dividido en dos grandes grupos, el primero relacionado con la actualización de los manuales de capacidad y niveles de servicio en carreteras y el segundo, está relacionado con la actualización del manual de diseño de pavimentos asfálticos en carreteras con medios y altos volúmenes de tránsito.



5. MARCO TEÓRICO

Los siguientes párrafos fueron tomados de (Benavides, 1993), desde el numeral 5.1 hasta el numeral 5.2.2.3 inclusive.

5.1 Generalidades

En forma general en el dimensionamiento y comportamiento de la estructura del pavimento se contemplan las siguientes variables: tránsito, clima, forma estructural, costos y demás factores que influyen en su tiempo de servicio. El clima y el tránsito son variables externas que inciden de una forma muy significativa en el comportamiento de la estructura de pavimento, y como sabemos que ambas variables son cambiantes en cada región, es importante contemplarlas en el estudio del diseño de un pavimento.

5.2 Parámetros de la variable clima considerados en el diseño y comportamiento de un pavimento flexible

Entre los factores ambientales, los que más inciden en el comportamiento y diseño de la estructura de pavimento son: la temperatura y la acción del agua, parámetros que serán contemplados en el siguiente análisis y que están relacionados con las condiciones topográficas y atmosféricas tales como, variaciones de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, precipitaciones, radiación solar, velocidad del viento.

5.2.1 Influencia de la temperatura

La temperatura tiene mayor incidencia en el tipo de pavimentos flexibles, sobre todo en las carpetas asfálticas, debido al carácter termológico de su comportamiento. El efecto de la temperatura en los materiales con ligantes asfálticos juega un papel muy importante desde la caracterización del material, diseño de las mezclas, evaluación, fabricación y puesta en servicio. Sobre las capas asfálticas su incidencia está determinada principalmente por el aporte estructural o módulo de elasticidad dinámico.

5.2.1.1 Incidencia de la temperatura en el diseño de las mezclas asfálticas

Dentro del diseño en laboratorio de mezclas asfálticas, la temperatura se contempla en las etapas de fabricación, mezclado, compactación y evaluación inicial de sus características estructurales, etapas que están íntimamente ligadas con la viscosidad del ligante asfáltico, razón por la cual



se han establecido normas y especificaciones para cada proceso, con el fin de lograr los resultados satisfactorios.

5.2.1.2 Incidencia de la temperatura en la caracterización dinámica de las mezclas asfálticas

La caracterización dinámica de una mezcla asfáltica, básicamente contempla la determinación del módulo dinámico, relación de poisson y la ley de fatiga, parámetros que están íntimamente ligadas con las condiciones de temperatura, ya que ésta juega un papel importante en la relación esfuerzo-deformación de estos materiales.

- **Incidencia en el módulo dinámico**

Con fines de dimensionamiento se contemplan a nivel internacional las “curvas maestras” que relacionan la variación del módulo dinámico en función de la temperatura para una frecuencia dada, que simule las solicitaciones normales que origina el tránsito.

- **Incidencia en la ley de fatiga**

Como ya se analizó anteriormente que las variaciones de temperatura modifican la rigidez de la mezcla asfáltica, es de esperarse que existan relaciones directas con la resistencia a la acción reiterada de las cargas en las capas asfálticas, acción que pueda manifestarse en la falla por fatiga o por acumulación de deformaciones permanentes.

5.2.1.3 Incidencia de la temperatura en el dimensionamiento de pavimentos flexibles

La metodología de Shell con el fin de considerar el efecto de la temperatura dentro del dimensionamiento de la estructura de pavimento, desarrollo un procedimiento para estimar la temperatura efectiva de las capas o temperatura vial, a partir del espesor y de la temperatura media anual del aire ponderada (WMAT), que se determina en función de la temperaturas medias mensuales del aire.

5.2.2 Influencia del agua en los pavimentos

El agua en los pavimentos proviene de tres fuentes:

- Por ascensión capilar



- Por infiltración vertical del agua de origen pluvial, siendo su vía de acceso más frecuente las grietas de la superficie del pavimento.
- Por flujo lateral interno, a través de los cortes y del terreno de fundación.

La acción del agua sobre los pavimentos tiene incidencias directas en las características de resistencia y en el comportamiento de las diferentes capas de la estructura, siendo su efecto mayor, tanto en los suelos finos como en las fracciones finas de los diferentes materiales que componen la estructura de pavimento.

5.2.2.1 Incidencia del agua en los suelos finos de subrasante

En los suelos que contengan material fino, el aumento del contenido de agua puede originar: pérdida de resistencia, aumento de la deformabilidad, expansiones; y la disminución posterior del contenido de agua puede originar: incrementos en la resistencia cuando no se presenten agrietamientos, disminución de la deformabilidad y contracción del suelo. Estos cambios de expansiones y contracciones del suelo están asociados a la inestabilidad volumétrica, que junto con las deformaciones son los aspectos más importantes dentro de la tecnología vial.

5.2.2.2 Incidencia del agua en las capas granulares

En los suelos gruesos como gravas y arenas, las características mecánicas de las partículas no cambian significativamente por variaciones en el contenido del agua, pero considerando que estos agregados normalmente se usan para la construcción de las capas intermedias del pavimento, (Bases y Sub-bases), su comportamiento puede quedar influenciado por la acción de los finos que actúan como llenantes y los cuales deben cumplir unas especificaciones para así no tener problemas por la acción del agua, que se manifiesta en la pérdida de aporte estructural y la susceptibilidad al fenómeno de bombeo en las carpetas agrietadas.

5.2.2.3 Incidencia del agua en la carpeta asfáltica

En las mezclas asfálticas que sirven como capa de rodadura de los pavimentos flexibles, la acción del agua junto con el tránsito están

directamente relacionadas con la adherencia agregado – asfalto, ya que el agua puede ocasionar pérdida de adhesión que se traduce en el descubrimiento y desplazamiento del asfalto de la superficie y del agregado, causando así en definitiva la desintegración de la mezcla.

Las capas de rodadura flexibles una vez construidas y puestas en servicio están sujetas al fenómeno de fatiga, que paulatinamente por acción del tránsito y el clima se irán deteriorando y dando origen a la aparición de fisuras y agrietamientos de la capa, que por la infiltración de las lluvias afectara el comportamiento de la capa de rodadura.

A continuación los siguientes párrafos fueron tomados de (Perera, 2015), hasta el numeral 5.3 inclusive.

A continuación en la figura 5.1 se muestra el mecanismo de entrada del agua al pavimento.

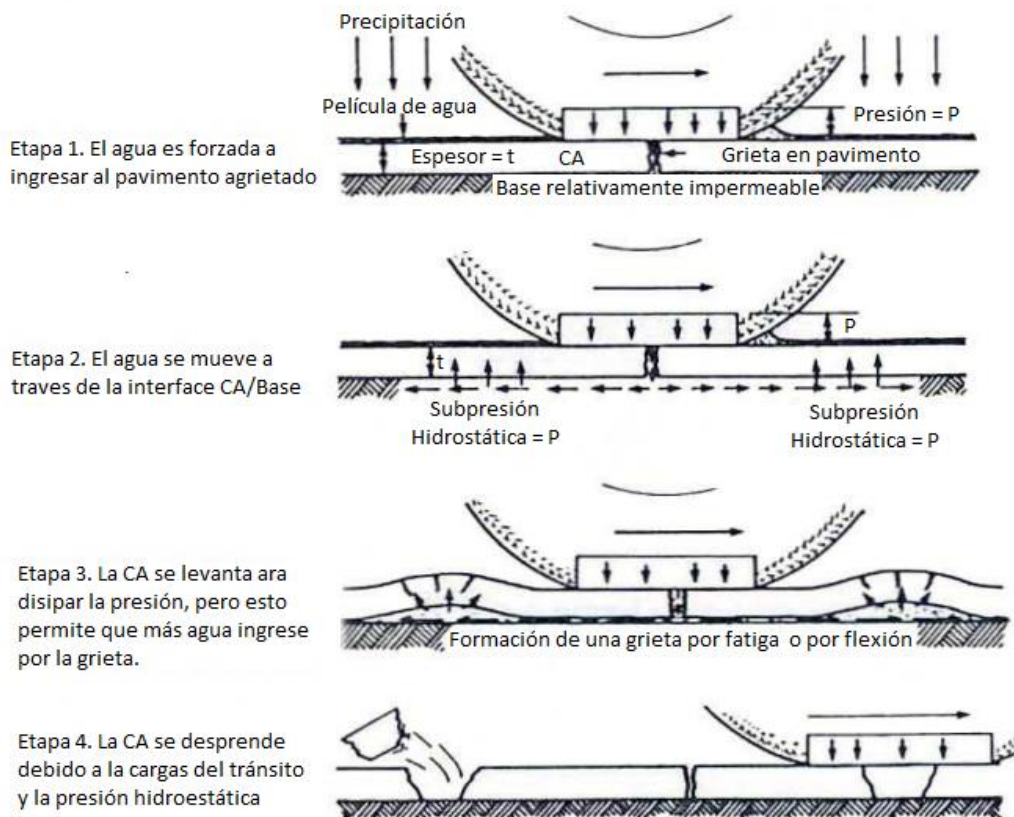


Figura 5.1. Formación de baches y separación de capas por efecto del agua

Fuente: Transport Research Laboratory, 2001

5.2.3 Incidencia de la radiación solar

Para estudiar la cantidad de calor que entra y sale de la superficie del pavimento es necesario establecer las propiedades térmicas que definen el flujo de calor a través del pavimento, e identificar las condiciones del entorno.

La temperatura del aire, velocidad del viento, y la radiación solar se utilizan para calcular el balance de calor en la superficie del pavimento. En la figura 5.2 se presenta un diagrama con los factores que influyen en el proceso de transferencia de calor entre el pavimento y la atmósfera. La transpiración, evaporación, condensación y sublimación tienden a omitirse en los cálculos de transferencia de calor porque sus cambios no afectan significativamente el balance de energía; además la precipitación se omite porque su papel no está claro y no se han desarrollado métodos para incorporarla en los modelos (ARA, 2004).

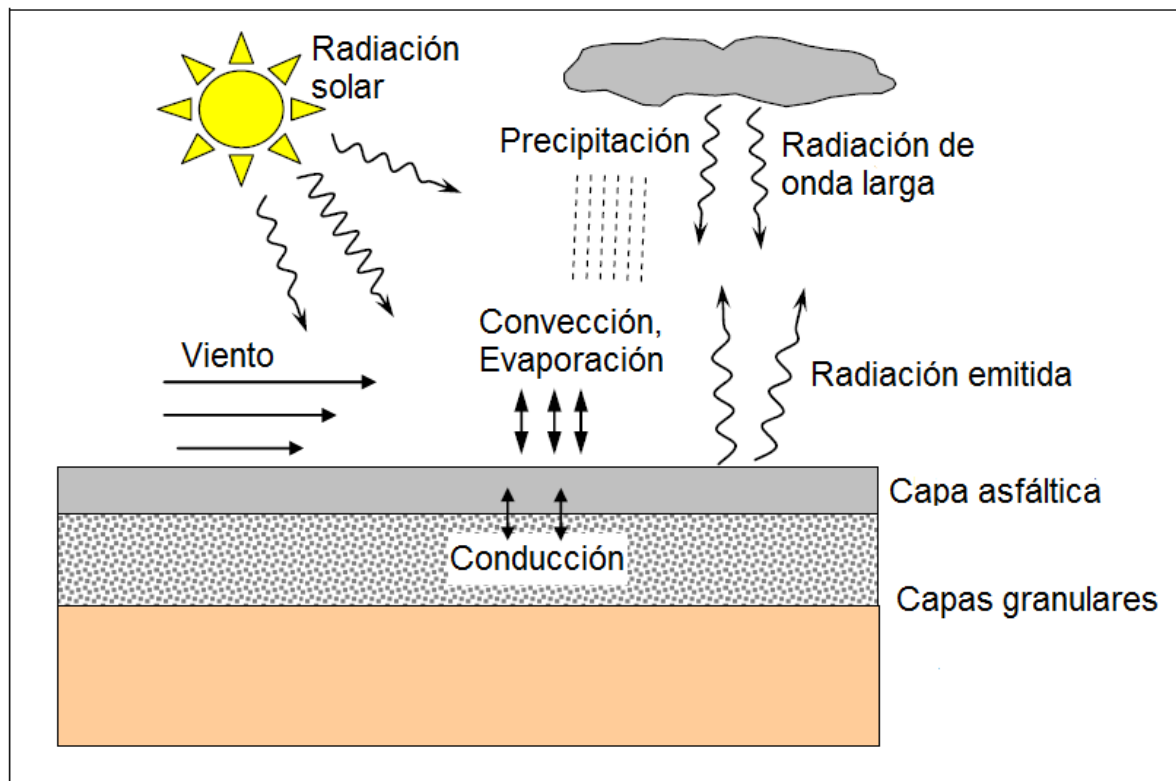


Figura 5.2 Diagrama del proceso de transferencia de calor entre el pavimento y el aire.



Fuente: (Herb, Marasteanu, & Stefan, 2006).

Los dos procesos por los que se suma o resta el calor en la superficie del pavimento son convección y radiación. La cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie del pavimento depende de dos factores: la posición espacial del Sol, determinada por las coordenadas, el día y el año, y la cobertura de nubes. La fuente primaria del calor de radiación es la radiación solar de onda corta. La radiación realmente absorbida, del total que incide, depende de la capacidad de absorción de onda corta del pavimento, que está en función de la composición, color y textura superficial de la capa de rodadura.

El otro tipo de flujo de calor inducido por la radiación es la radiación de onda larga. La radiación de onda larga es la radiación térmica que emite el pavimento de acuerdo con la teoría de la radiación del cuerpo negro, en la que dependiendo de la temperatura absoluta de un material una cantidad específica de calor es emitida. Una parte de esta radiación de onda larga, emitida por el pavimento y el ambiente que lo rodea, es reabsorbida por el pavimento luego de reflejarse en las nubes (ARA, 2004).

La radiación solar también es importante porque controla la evaporación del agua en la superficie del terreno, lo que induce un movimiento del agua en forma de vapor dentro de la estructura. Este movimiento es perjudicial porque favorece la separación del agregado y el asfalto.

5.2.4 Incidencia de la velocidad del viento

La velocidad del viento se utiliza para los cálculos del coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie del pavimento (ver Figura 5.2). La convección es el proceso de transferencia de energía de calor debido a las diferencias en la temperatura del aire y la temperatura de la superficie del pavimento. Si la superficie del pavimento es más caliente que el aire, se pierde calor desde el límite superior. Si por el contrario, la superficie del pavimento es más frío que el aire, se añade calor al límite superior.

La cantidad de convección que se produce está directamente relacionada con la diferencia entre las temperaturas y la velocidad del viento. La temperatura de una superficie de pavimento baja cuando el viento sopla sobre ella, por ello el calentamiento de las capas internas conducirá calor



hacia afuera, lo que conduce al enfriamiento global gradual de todo el pavimento. Mayores velocidades del viento se correlacionan directamente con mayores tasas de convección, ya que mejora la transferencia de calor en la superficie por el efecto del enfriamiento (Johanneck, 2011).

5.2.5 Incidencia de la Humedad relativa

La humedad es la concentración de vapor de agua en la atmósfera. La humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura. La cantidad de agua que el aire puede retener depende de la temperatura, creciendo al aumentar la temperatura del aire. La humedad relativa, junto con la temperatura del aire, controlan el flujo de masa de agua y de calor entre la atmósfera y el pavimento. Por lo tanto, estas dos variables influyen en la variación de la temperatura y en la humedad del pavimento y del subsuelo.

5.3 Consideraciones del clima en la metodología moderna de pavimentos flexibles, MPDG.

El impacto de los cambios en los perfiles de temperatura y humedad en la estructura del pavimento y la subrasante sobre la vida útil de un pavimento se consideran en la MEPDG través del *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM). El EICM simula los cambios en el comportamiento y las características de los materiales del pavimento a lo largo del período de diseño del pavimento, está incorporado en el software de la MEPDG y realiza internamente todos los cálculos requeridos por la guía.

El EICM utiliza tres modelos para realizar los análisis y cálculos. El Modelo CMS fue desarrollado en la Universidad de Illionis, es un modelo de transferencia de calor que permite determinar la penetración de congelamiento y el perfil de temperatura de la estructura del pavimento. El Modelo CRREL se desarrolló por la U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, utiliza los perfiles de temperatura determinados por el modelo CMS para calcular los cambios de temperatura del suelo, y predecir la profundidad del congelamiento y la penetración del descongelamiento. Por último, el EICM utiliza el Modelo de Infiltración y Drenaje (Modelo ID) desarrollado en la Universidad A&M de Texas. Las salidas del Modelo ID incluyen: a) Grado de saturación de la capa de base,



b) El grado de drenaje durante días secos consecutivos, y c) La probabilidad de si existe una capa de base seca o húmeda.

Además de los factores climáticos, se debe incluir la mejor estimación entre la profundidad promedio anual y la profundidad promedio estacional del nivel freático. Este parámetro es necesario para determinar el contenido de humedad al que estará sometida la fundación del pavimento y, por lo tanto, los valores del módulo de equilibrio.

Para modelar el EICM requiere de un mínimo de 24 meses, de forma que el software de la guía proporcione soluciones lógicas, sin embargo puede que estos meses no representen adecuadamente las condiciones climáticas de un lugar, por años extremadamente calientes, fríos o con precipitaciones inusuales. Johanneck, (2011) aconseja tener información de más de 10 años para predecir de buena manera las condiciones climáticas de la zona. Las salidas del software, enfocado a los pavimentos flexibles y los factores climáticos, son:

- Para los materiales granulares el factor de ajuste del M_R es función de la posición y el tiempo: el factor de ajuste de los efectos ambientales, F_{env} , se calcula para cada subcapa con los valores de F_F , F_R , o F_U en cada nodo. La definición en capas se define internamente por el EICM y es función de la profundidad de penetración del congelamiento, entre otros factores. Los factores F_{env} se utilizan en los módulos de análisis estructurales del software MEPDG.
- La temperatura en la superficie y en los puntos medio de cada subcapa asfáltica: a estos valores se les realiza una caracterización estadística para cada período de análisis. La media, desviación estándar y los percentiles de los datos de temperatura se utilizan en los modelos de predicción de la deformación permanente y fatiga.
- Los valores de temperatura por hora en la superficie y en un incremento de profundidad (cada pulgada) dentro de las capas consolidadas para su uso en el modelo de grietas térmicas.
- El contenido de humedad volumétrica: un valor promedio para cada capa es reportado para su uso en el modelo de deformación permanente de los materiales granulares.



6. ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE LA PASANTÍA

6.1 Introducción

Como es conocido, el objetivo de las prácticas profesionales es aplicar nuestros conocimientos aprendidos en la universidad y/o aprender cosas nuevas que puedan aportar beneficios para la sociedad, durante este tiempo he desarrollado diferentes actividades que me ha ayudado a conocer a fondo sobre el tema del clima y la importancia que esta variable tiene en el diseño de los pavimentos flexibles.

6.2 Participar en el grupo de la variable clima

Con el grupo de variable clima se realizaron actividades de apoyo tales como procesamiento de datos, revisión bibliográfica, etc. Este grupo consistió de Manuel Meza, Lucio Cruz y Erika Guerrero.

6.3 Participar en la recolección y procesamiento de información de la variable clima, que participa en el diseño de los pavimentos de altos y medios volúmenes de tránsito.

Se recopiló información del IDEAM y de la estación meteorológica de Popayán sector Tulcán de la Universidad del Cauca. Esta cantidad de información se procesó (datos climáticos diarios) para obtener valores necesarios para obtener las variables necesarias para el diseño de una estructura del pavimento.

6.4 Revisar información bibliográfica sobre diseño de pavimentos, específicamente acerca de cómo el clima afecta e influencia el diseño de pavimentos.

A lo largo de estos meses a petición del ingeniero he consultado textos para obtener información sobre la variable clima. A continuación menciono los textos:

6.4.1 Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con Bajos volúmenes de tránsito, (1997).

El objetivo de revisar y leer este manual era conocer como anteriormente incluían la variable clima en el diseño de los pavimentos con bajos



volúmenes de tránsito, se encontró que en la época esta variable no era significativa para ningún proyecto de pavimentos, ya que no existía ni siquiera un capítulo que la describiera.

6.4.2 Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con Altos y Medios volúmenes de tránsito, (1998).

El objetivo de revisar y leer este manual era conocer como anteriormente incluían la variable clima en el diseño de los pavimentos con altos y medios volúmenes de tránsito, se encontró que anteriormente, siguiendo la metodología de Shell, se calculaba la temperatura media ponderada, a partir de la temperatura media mensual y esta se afectaba por un factor de ponderación que se obtenía de una gráfica, ya con esta temperatura y además con la precipitación se hacía la clasificación de las regiones climáticas, (para el caso del manual eran 6 regiones climáticas). Al tener la clasificación se entraba a las cartas de diseño y teniendo en cuenta otros factores se escogía el diseño de mejor conveniencia.

6.4.3 Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con Bajos volúmenes de tránsito, (2007).

El objetivo de revisar y leer este manual era conocer como en este momento se trabaja la variable clima en el diseño de los pavimentos con bajos volúmenes de tránsito, se encontró que se hace una descripción detallada de la variable clima, tipo y localización de las estaciones y la clasificación climática que se hace usando la metodología de Thornthwaite, (1948).

6.4.4 Búsqueda de la metodología de clasificación climática de Thornthwaite, (1948).

El objetivo de esta búsqueda era conocer a fondo de donde proviene esta metodología, cuales son las variables que utilizan para clasificar el clima en una zona específica; se encontró que, Thornthwaite se basó en los resultados del balance hídrico del suelo, la evapotranspiración potencial anual, el exceso de agua anual y el déficit de agua anual, que las variables son la temperatura, la precipitación la latitud de la región y el brillo solar, además que el cálculo del índice de Thornthwaite, (TMI) relaciona un índice de humedad, (afectado por el exceso de agua) y un índice de aridez (afectado con el déficit de agua).



6.4.5 Leer la guía MPDG, capítulo 3 Efectos Ambientales.

El propósito era encontrar como la guía moderna de diseño de pavimentos incluía la variable clima, se encontró que una explicación detallada sobre cómo afecta el clima en el diseño de una estructura de pavimento, encontramos que en esta guía se implementó el software EICM (integración del modelo climático mejorado, siglas en inglés), el cual realiza las siguientes tareas: registrar el módulo resiliente, M_{Ropt} , proporcionado por el usuario en condiciones óptimas de humedad y densidad máxima; evaluar los cambios esperados en el contenido de humedad en la subrasante y los materiales no ligados; utilizar los valores de M_R variables en el tiempo para el cálculo de los parámetros de respuesta críticos en el pavimento; evalúa los cambios de temperatura de la capa asfáltica en función del tiempo. En el capítulo también se describe como encontrar los parámetros de la curva característica del suelo, (relación entre la succión y el grado saturación del suelo), encontramos que el EICM adicióno una base de datos climática horaria de una gran cantidad de estaciones meteorológicas de todo el país, las variables que introdujo fueron: temperatura, precipitación, humedad relativa, nubosidad, velocidad del viento y posición del nivel freático, variables que se usan para establecer los regímenes de temperatura, humedad y las heladas en una estructura de pavimento en cual cualquier zona del país. El capítulo muestra que para calcular el módulo resiliente en cualquier momento y posición en las capas del pavimento, este sería igual al módulo resiliente óptimo (M_{Ropt}) multiplicado por un factor de ajuste ambiental (F_{env}), factor que depende de las condiciones ambientales (humedad, densidad, congelación /descongelación).

6.4.6 Leer la metodología de Penman and Monteith. (Allen et al. 1998)

El objetivo de revisar este documento era determinar cuál es la forma de calcular la evapotranspiración de referencia, (ET_0), del suelo. Se encontró que el método de FAO Penman and Monteith es el único método estándar que se utiliza para determinar la ET_0 , el método se basa en una ecuación de balance de energía, que relaciona diferentes variables climáticas como: temperatura del aire, humedad relativa, brillo solar, y velocidad del viento y otros factores auxiliares como: latitud, altitud y número de horas de sol. Se encontró dentro de este documento que el cálculo de la evapotranspiración se puede hacer cuando solo se tienen datos de



temperatura máxima y mínima, puesto que suele suceder que las estaciones que están cerca del proyecto, no cuentan con toda la información que se requiere para hacer el cálculo de la ecuación original (con las cinco variables iniciales). En este documento se encuentra una explicación detallada para realizar el cálculo de la ET_0 con datos faltantes y usando la misma ecuación.

6.4.7 Revisar el método de diferencias acumuladas y como se calcula

Se encontró que el método de diferencias acumuladas es una herramienta estadística que permite delimitar un tramo homogéneo utilizando datos que tengan que ver con mediciones de respuesta del pavimento. Se utilizó como referencia la Guía AASHTO de 1993, (AASHTO Guide for design of pavement structures)

6.4.8 Lectura del Atlas Climatológico de Colombia, IDEAM

El objetivo de esta lectura era reforzar conceptos acerca de las variables climáticas como: la temperatura del aire, la precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, etc.; conocer como el IDEAM hace el cálculo y clasificación del índice de Thornthwaite; además de revisar como ellos toman en cuenta el cambio climático. Se encontró que el cálculo de la evapotranspiración se hace mediante la metodología de Penman and Monteith la cual se describió anteriormente; encontramos tendencias históricas y escenarios sobre cambio climático además que Colombia usa escenarios de forzamiento radiativo.

6.4.9 Lectura de tesis de Ariana Perera “Determinación y análisis de los factores climáticos críticos para el diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica”

El objetivo de esta lectura era conocer el estudio que hizo Ariana sobre que variables afectan significativamente el diseño y comportamiento de una estructura de pavimento flexible. Se encontró una descripción detallada sobre la influencia que tiene la precipitación, temperatura, nubosidad, humedad relativa, radiación solar, la velocidad del viento y el nivel freático en el desempeño de una estructura de pavimento; se encontró un modelo de predicción de la temperatura de la carpeta asfáltica; el estudio del índice de Thornthwaite y la zonificación de Costa Rica respecto al índice; la influencia de la condiciones climáticas en el deterioro del pavimento.



6.4.10 Lectura de la Guía AASHTO, 1993

El objetivo de revisar esta guía era aprender y entender la metodología que antes o aún se sigue usando para diseñar pavimentos, sobre todo mirar como el clima afectaba en el proceso de diseño, se encontró que esta metodología se basa el cálculo de un numero estructural SN , el cual cuantifica la resistencia estructural que el pavimento requiere para determinada capacidad de soporte del suelo, trafico esperado y perdida de serviciabilidad; en el cálculo de SN está incluido un coeficiente de drenaje, mi el cual modifica el coeficiente de la capa ai y además depende de la calidad de drenaje de las capas granulares que componen la estructura del pavimento.

6.4.11 Lectura del manual de drenaje para carreteras, capitulo 5, Drenaje sub-superficial

El objetivo de revisar este manual era entender su influencia en el desempeño de los pavimentos e incluir algún comentario acerca de este tema tan importante en el capítulo de Factores ambientales y climáticos que se viene desarrollando. Se encontraron los objetivos del drenaje sub-superficial, las fuentes de donde proviene el agua que se infiltra al pavimento, los tipos de sub-drenajes que existen, las funciones que cumplen, etc.

6.4.12 Lectura Witczak et al 2006- EICM-140D-Final report

El objetivo de esta lectura era encontrar los modelos de cálculo para la succión matricial. Se encontró que Hay dos modelos para el cálculo de succión matricial, el modelo de $TMI-P200$ para bases granulares, y el modelo de $TMI-P200 / WPI$ para subrasantes y sub-bases.



6.5 Procesar la información que se ha recolectado

A continuación se presentan ejemplos que se han realizado en hojas de cálculo de Excel, los datos de entrada y finalmente los resultados:

6.5.1 Datos de entrada, ejemplo de cálculo de la Evapotranspiración de referencia, usando la metodología de Penman and Monteith, además se realiza el cálculo del índice de Thornthwaite

Este ejemplo se hizo tomando datos de la estación meteorológica climatológica principal Encano El, con periodicidad diaria de los años 2012 y 2013.

A continuación se muestra los formatos de datos proporcionados por el IDEAM.

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

DATOS DIARIOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AIRE SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL -METEORO 1- ENE 2011

PROCESO Feb 10-2015 * ESTACION : 47015100 ENCANO EL

LATITUD 0109 N	DEPARTAMENTO NARIÑO	TIPO EST CP	SUBZONA HIDR. GUAMUES
LONGITUD 7709 W		ENTIDAD 1 IDEAM	ZONA HIDROGR. A] * AÉÉBAww
ELEVACION 2830 m.s.n.m	MUNICIPIO PASTO	REGIONAL 7 NARIÑO-PUTUMAYO	AREA HIDROGR. AMAZONAS

DIA	TEMPERATURAS EN GRADOS CENTIGRADOS												HUMEDAD			TENSION DE VAPOR			PUNTO DE ROCIO EN				
	EXTREMAS		TERMOMETRO SECO				TERMOMETRO HUMEDO				RELATIVA %			EN MILIBARES			GRADOS CENTIGRADOS						
	MAX	MIN	AMPL	07	13	19	MEDIA	07	13	19	MEDIA	07	13	19	MED	MIN	07	13	19	MED	07	13	19
1	19.2	4.6	14.6	6.6N	17.4N	12.0N	12.0	6.4	12.5	10.4	9.8	97	58	83	80	9.5	11.6	11.7	10.9	6.2	9.2	9.2	8.2
2	19.4	6.8	12.6	8.4N	17.4N	11.6N	12.3	8.2	13.2	10.0	10.5	98	64	83	82	10.8	12.7	11.3	11.6	8.0	10.5	8.8	9.1
3	14.2	10.0	4.2	10.8N	12.9G	10.2G	11.0	10.4				96				12.4				10.1			
4	16.0	9.8	6.2	10.8N	14.2N	9.6N	11.1	9.6	12.4	8.6	10.2	87	82	89	86	11.2	13.3	10.6	11.7	8.7	11.2	7.8	9.3
5	17.4	4.4	13.0	6.9C	15.4N	10.5C	10.8	5.8	13.8	7.8	9.1	100	85	93	93	9.2	14.8	10.2	11.4	5.8	12.9	7.3	8.7
6		4.4		9.2N	14.8N	9.8N	10.9	8.8	13.4	9.2	10.5	95	86	93	92	11.1	14.5	11.3	12.3	8.5	12.6	8.7	9.9
7	16.6	6.0	10.6	6.0N	15.6N	11.8N	11.3	5.8	11.8	10.0	9.2	97	66	81	81	9.1	11.6	11.2	10.6	5.6	9.2	8.7	7.8
8	17.0	8.0	9.0	9.6N	16.5N	10.4N	11.7	9.6	12.0	9.8	10.5	100	61	93	85	11.9	11.4	11.8	11.7	9.6	8.9	9.4	9.3
9	15.0	9.8	5.2	10.6N	13.0N	10.6N	11.2	10.0	11.6	10.4	10.7	93	86	98	92	11.9	12.8	12.5	12.4	9.6	10.7	10.3	10.2
10	14.2	9.4	4.8	10.4N	12.8N	10.0N	10.8	9.8	10.4	9.6	9.9	93	76	95	88	11.8	11.2	11.7	11.6	9.4	8.6	9.3	9.1
11	16.2	8.6	7.6	11.4N	14.6N	11.6N	12.3	11.2	11.6	10.4	11.1	98	72	87	86	13.2	11.9	11.9	12.3	11.1	9.5	9.5	10.0
12	17.6	8.2	9.4	10.4N	15.9C	10.2N	11.7	10.2	13.4	9.6	11.1	98	86	93	92	12.3	14.5	11.6	12.8	10.1	12.6	9.2	10.6
13	17.4	8.8	8.6	9.2N	16.0N	11.8N	12.2	9.0	11.9	10.7	10.5	98	63	88	83	11.4	11.5	12.2	11.7	8.8	9.1	9.9	9.3
14	17.4	8.8	8.6	10.8N	15.4N	9.4N	11.3	10.0	11.6	8.8	10.1	91	65	93	83	11.8	11.4	11.0	11.4	9.4	8.9	8.3	8.9

Figura 6.1 Formato de datos de temperaturas y humedad relativa



UNIVERSIDAD DEL CAUCA, ERIKA JOHANNA GUERRERO GUERRERO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

EVALUACION HORARIA DE LA DIRECCION (D) Y VELOCIDAD (V) EN M/S
 DEL VIENTO EN SUPERFICIE

SISTEMA DE INFORMACION
 HIDROMETEOROLOGICA
 -METEORO 3- JUN 2011

PROCESO Feb 10-2015 *

ESTACION : 47015100 ENCANO EL

LATITUD 0109 N	DEPARTAMENTO NARIÑO	TIPO EST CP	SUBZONA HIDR. GUAMUES
LONGITUD 7709 W		ENTIDAD 1 IDEAM	ZONA HIDROGR. TRICO INSTRU
ELEVACION 2830 m.s.n.m	MUNICIPIO PASTO	REGIONAL 7 NARI#0-PUTUMAYO	AREA HIDROGR. AMAZONAS

C U A D R O NO 1 (1 PARTE)

- HORA	00-01		01-02		02-03		03-04		04-05		05-06		06-07		07-08		08-09		09-10		10-11		11-12		12-13		13-14	
	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V
1	E	1.1 NE	.5 E	.1 E	.3 E	.5 NE	.5 E	.4 SW	1.1 SW	2.1 SW	2.7 W	2.0 SE	2.2 S	3.5 S	3.1													
2	E	.2 E	.2 SE	.9 N	.5 N	2.3 N	2.2 N	2.1 N	2.5 N	2.1 N	2.2 N	2.7 N	1.7 N	2.0 N	2.7													
3	E	.5 N	1.2 N	.6 SE	.6 NE	.4 E	.1 E	.3 S	.5 S	1.9 SE	1.7 S	2.6 S	2.9 S	2.3 S	2.1													
4	NE	.5 NE	.6 N	.3 S	1.9 S	1.3 SE	1.4 S	1.8 S	3.3 SE	3.3 S	3.7 S	4.4 SE	4.4 SE	3.8 SE	3.7													
5	N	.9 N	.6 N	.9 N	.6 N	.6 N	.7 N	.7 S	1.1 S	1.3 N	2.5 N	3.9 N	4.5 N	4.9 N	3.9													
6	N	.9 E	.4 E	.2 E	.3 NE	.9 E	.6 E	.3 S	1.8 S	2.6 S	3.0 S	3.0 S	3.1 SE	4.0 SE	3.5													
7	S	1.3 S	1.1 SE	1.1 SE	1.0 S	1.1 S	.8 S	1.8 S	2.6 S	3.0 S	2.9 S	3.1 E	3.4 S	3.3 S	2.6													
8	SW	2.3 S	1.9 S	1.8 S	2.1 S	2.0 S	2.7 S	2.7 S	3.1 S	3.2 S	3.3 S	3.3 S	4.1 S	3.4 S	3.5													
9	S	2.7 SE	2.2 S	2.0 S	2.7 S	2.8 S	3.1 S	3.1 S	3.6 S	5.1 S	5.1 S	5.2 SE	5.0 SE	4.8 SE	3.7													
10																												
11	SE	3.1 S	3.3 S	3.5 SE	4.3 S	4.1 S	4.3 S	4.1 SE	3.5 S	4.9 S	4.9 SE	4.6 SE	5.6 SE	5.7 SE	5.0													
12	S	4.2 S	4.4 SE	4.1 SE	4.5 S	3.7 S	3.8 SE	3.7 SE	4.3 SE	4.4 S	4.7 SE	4.0 SE	4.3 SE	4.7 SE	4.6													
13	S	3.7 S	3.3 S	4.4 S	5.4 S	5.7 S	5.0 S	4.9 S	3.5 S	4.1 S	5.3 SE	4.5 SE	4.8 S	5.0 S	5.5													

Figura 6.2 Formato de datos de velocidad del viento

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

VALORES TOTALES DIARIOS DE PRECIPITACION (mms)

SISTEMA DE INFORMACION
 NACIONAL AMBIENTAL

FECHA DE PROCESO : 2015/02/10

ANO 2011

ESTACION : 47015100 ENCANO EL

LATITUD 0109 N	TIPO EST CP	DEPTO NARI#0	FECHA-INSTALACION 1984-SEP
LONGITUD 7709 W	ENTIDAD 01 IDEAM	MUNICIPIO PASTO	FECHA-SUSPENSION
ELEVACION 2830 m.s.n.m	REGIONAL 07 NARIÑO-CAUCA	CORRIENTE GUAMUES	

DIA	ENERO *	FEBRE *	MARZO *	ABRIL *	MAYO *	JUNIO *	JULIO *	AGOST *	SEPTI *	OCTUB *	NOVIE *	DICIE *
01	1.2	1.8	1.1	.7	.0	.4	.0	.0	4.0	1.4	.0	3.9
02	4.2	1.5	1.9	.6 1	1.2 1	3.3	2.0 1	1.0	5.6	8.4	.4	14.0
03	28.3	.1	.0	.2 1	3.6 1	7.5	10.4	1.6	3.0 1	11.1	.4	10.6
04	21.8	.0	2.0	.5	1.4 1	1.7	5.8	.6 1	.0	4.4	.0	3.7
05	1.8	4.3	8.0	14.0	.3 1	.5	10.2 1	1.2	.5	10.2	.0	.9
06	.0	.9	.0	13.7	6.4	1.9	16.2	.0	27.3	.5	45.9	9.1
07	.3	7.1	.0	5.7 1	6.9	.0	1.4	.0	4.6	.5	7.8	4.4
08	14.2	9.4	4.0	1.7	1.9	.0	2.2	3.5	8.8 1	3.2	3.3	13.7
09	8.6	3.2	2.3	4.4	12.7	2.6	4.1	9.9 1	.6	.0	10.5	.5
10	8.3	17.3	.0	4.4	.9	8.4	1.6	9.9	4.1	.0	7.3	1.2 1
11	1.5	1.8	3.4	.6	.1 1	3.5	22.3	.0	14.2	10.0	6.7	.2 1
12	.0	.5	.0	2.0	14.7	1.9	8.3	.5	1.0	.0	1.5	8.2
13	.0	4.2	.7	13.8	9.9	12.0 1	2.8	.0	.3	8.0	1.0	10.5 1
14	.0	7.6	.0	8.2	22.1 1	6.4	2.7	1.4	5.7	1.7	.5	5.6
15	.0	5.3	2.1 1	11.0	4.4	2.3	21.6	.3	.1 1	.0	.0	14.9
16	.0	11.2	10.0	4.2	14.7	1.9	6.9	.0	2.1	3.0	11.0	8.2
17	7.9	.0	.8	3.4	.0	6.5	2.5	5.1	5.9	.0	.0	12.2
18	.8	5.0	3.3	5.7	.0	.9	7.0	.0	2.2	.0	.0	18.8
19	1.3	.0	9.8	10.4 1	.0	.0	.0	.0	1.0	.0	5.3	27.1
20	.0	6.7	18.3	2.8	.7 1	.7 1	.5	2.4 1	.0	.3	.0	1.1
21	.0	11.3	.4	7.7 1	.0	1.4 1	2.7	16.3	.5	2.5	.5	1.7

Figura 6.3 Formato de datos de precipitación.



UNIVERSIDAD DEL CAUCA, ERIKA JOHANNA GUERRERO GUERRERO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Table with 21 columns: P.A, y, e0(Tmax), e0(Tmin), es, e0(Tmedia), Δ, G, ea, es-ea, dr, δ, ωs, N, Ra, Rs, Rns, Rso, Rs/Rso, Rnl, Rn, ETo. The table contains 48 rows of numerical data representing daily evapotranspiration calculations for January 2012.

Figura 6.4 Calculo de la evapotranspiración de referencia diaria, (enero de 2012), Penman and Monteith.

Nota: ver referencia: (Allen et al, 1998)



RESUMEN				
MES/AÑO	ETO _(TOTAL) [mm/mes]	Ai [mm]	EXC _(TOTAL) [mm]	DEF _(TOTAL) [mm]
ENE (2012)	73.0332305	100	71.8667695	0
FEB (2012)	67.3467805	100	41.2532195	0
MAR (2012)	62.6270753	100	106.272925	0
ABR (2012)	68.3601724	100	95.1398276	0
MAY (2012)	57.2360418	100	93.0639582	0
JUN (2012)	58.4630478	100	59.0369522	0
JUL (2012)	60.5303625	100	25.7426701	0
AGO (2012)	68.6298895	100	29.5701105	0
SEP (2012)	66.0828859	100	13.5171141	0
OCT (2012)	72.7345077	100	1.46549234	0
NOV (2012)	73.8647328	100	17.4352672	0
DIC (2012)	74.4686799	100	71.0775425	0
ENE (2013)	73.0676462	86.1323538	0	0
FEB (2013)	57.8982747	100	84.9340791	0
MAR (2013)	66.2428798	100	22.4571202	0
ABR (2013)	70.257195	100	94.042805	0
MAY (2013)	66.0975701	100	98.4024299	0
JUN (2013)	59.7973744	100	16.9026256	0
JUL (2013)	59.5272463	100	75.0727537	0
AGO (2013)	67.7300346	100	101.869965	0
SEP (2013)	67.8415239	100	34.7584761	0
OCT (2013)	79.467768	96.432232	0	0
NOV (2013)	76.0034475	100	13.6287845	0
DIC (2013)	70.773056	100	31.226944	0
Σ	1617.16217		1198.73783	0
INDICE DE HUMEDAD, Ih				74.1260126
INDICE DE ARIDEZ, Ia				0
INDICE DE THORNTHWAITE, Im				74.1260126

Figura 6.5 Cálculo del índice de Thornthwaite

Nota: ver referencia (Thornthwaite, 1948)



6.5.2 Ejemplo de cálculo de las diferencias acumuladas y el índice de Thornthwaite.

Para este ejemplo se tomaron datos de 46 aeropuertos que contenían estaciones meteorológicas del IDEAM y nos proporcionaban información diaria de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, A continuación se hace un ejemplo completo para la información del Aeropuerto de San Andrés, donde se calculará: diferencias acumuladas de temperatura máxima, mínima, media precipitación, índice de Thornthwaite usando la metodología original y la metodología de Witczak, ver (Witczak et al 2006).


INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES			
 SERVICIO DE PRONOSTICO Y ALERTAS			
MUNICIPIO	Precipitación (mm)	Temp-max (°C)	Temp-min (°C)
	ENERO: 1		ENERO: 2
Apto. SAN ANDRES	0.6	29.9	25.8
Apto. PROVIDENCIA	0.0	29.5	27.0
Apto. SANTA MARTA	0.0	33.4	23.6
SANTA MARTA (Sede IDEAM)	0.0	X	X
Apto. CARTAGENA	0.0	32.4	23.4
Apto. BARRANQUILLA (Soledad)	0.0	32.2	23.9
Apto. RIOHACHA	0.0	33.6	24.9
Apto. VALLEDUPAR	0.0	35.5	24.2
Apto. MONTERIA	0.0	34.4	23.6
Apto. Rafael Barvo (Corozal)	0.0	34.8	21.8
SINCELEJO (Est. - Univ. de Sucre)	0.0	35.4	24.2
Apto. BARRANCABERMEJA	0.0	33.6	24.2
Apto. BUCARAMANGA (Lebríja)	0.0	27.3	18.2
BUCARAMANGA (sede IDEAM)	0.0	X	X
Apto. CUCUTA	0.1	30.0	20.1
Apto. APARTADO	0.2	31.7	24.9
Apto. MEDELLIN	0.0	29.0	19.0
Apto. RIONEGRO	0.0	22.2	13.0
Apto. La Nubia (Manizales)	0.0	22.2	11.2
Manizales (Est. Tesorito)	0.0	20.4	12.0
Apto. PEREIRA	0.0	29.3	18.7
Apto. ARMENIA (La Tebaida)	0.0	29.2	16.4
Apto. IBAGUE	0.0	30.4	19.5
TUNJA (Est. - UPTC)	0.0	19.4	5.0
Apto. EL DORADO	0.0	20.2	4.3
Apto. CALI (Palmira)	0.0	31.8	18.0
CALI (Est. - Univ. del Valle)	X	X	X

Figura 6.6 Formato de datos de temperatura máxima, mínima y precipitación



Libro1 (

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS

H4 :

	B	C	D	E	F	G	H
1	latitud: 12°35' N, longitud: 81°43' W, altitud: 1 m						
2							
3	1	0.1	30	26	page 1		
4	2	0	30.6	27.3	page 1 (2)		
5	3	0.6	30.5	26.5	page 1 (3)		
6	4	0.6	29.9	25.8	page 1 (4)		
7	5	0	29.2	26	page 1 (5)		
8	6	0	31.4	26.3	page 1 (6)		
9	7	0	29.5	25.9	page 1 (7)		
10	8	0	31	26	page 1 (8)		
11	9	2.9	31.3	26.4	page 1 (9)		
12	10	4.3	31.6	24.8	page 1 (10)		
13	11	1.4	32.2	24.4	page 1 (11)		
14	12	0	30.5	26.8	page 1 (12)		
15	13	21.6	29.1	24.7	page 1 (13)		
16	14	2.7	30.3	24.8	page 1 (14)		
17	15	3.2	29.9	26.1	page 1 (15)		
18	16	0.2	29.5	25.5	page 1 (16)		
19	17	0.2	30.8	25.8	page 1 (17)		
20	18	0	28.9	25	page 1 (18)		
21	19	3	30.4	27.1	page 1 (19)		
22	20	4.4	28.9	25.5	page 1 (20)		
23	21	7.9	31.3	25	page 1 (21)		
24	22	0.1	32	27.5	page 1 (22)		
25	23	0	29.8	26	page 1 (23)		
26	24	4.9	30.3	25.2	page 1 (24)		

... Apto San Andres A4 Apto Providencia A5 Apto Santa M

LISTO

Figura 6.7 Datos organizados en Excel



Libro1 (3) (Recuperado) - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA

H4

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
	DIFERENCIAS ACUMULADAS	Tmax	Numero de intervalos	Intervalo de distancia	Intervalo de distancia acumulado	Promedio de intervalo	Area	Area acumulada	zx
		[°C]	n	xi	[-]	ri	ai	[-]	[-]
2		30	1	1	1	30	30	30	-0.19297521
3		30.6	2	1	2	30.3	30.3	60.3	-0.08595041
4		30.5	3	1	3	30.55	30.55	90.85	0.27107438
5		29.9	4	1	4	30.2	30.2	121.05	0.278099174
6		29.2	5	1	5	29.55	29.55	150.6	-0.36487603
7		31.4	6	1	6	30.3	30.3	180.9	-0.25785124
8		29.5	7	1	7	30.45	30.45	211.35	-0.00082645
9		31	8	1	8	30.25	30.25	241.6	0.056198347
10		31.3	9	1	9	31.15	31.15	272.75	1.01322314
11		31.6	10	1	10	31.45	31.45	304.2	2.270247934
12		32.2	11	1	11	31.9	31.9	336.1	3.977272727
13		30.5	12	1	12	31.35	31.35	367.45	5.134297521
14		29.1	13	1	13	29.8	29.8	397.25	4.741322314
15		30.3	14	1	14	29.7	29.7	426.95	4.248347107
16		29.9	15	1	15	30.1	30.1	457.05	4.155371901
17		29.5	16	1	16	29.7	29.7	486.75	3.662396694
18		30.8	17	1	17	30.15	30.15	516.9	3.619421488
19		28.9	18	1	18	29.85	29.85	546.75	3.276446281
20		30.4	19	1	19	29.65	29.65	576.4	2.733471074
21		28.9	20	1	20	29.65	29.65	606.05	2.190495868
22		31.3	21	1	21	30.1	30.1	636.15	2.097520661
23		32	22	1	22	31.65	31.65	667.8	3.554545455
24		29.8	23	1	23	30.9	30.9	698.7	4.261570248
25		30.3	24	1	24	30.05	30.05	728.75	4.118595041

Apto San Andres A4 Apto Providencia A5 Apto Santa Marta A6 A7 Apto Ca

LISTO

Figura 6.8 Cálculo de diferencias acumuladas de temperatura máxima

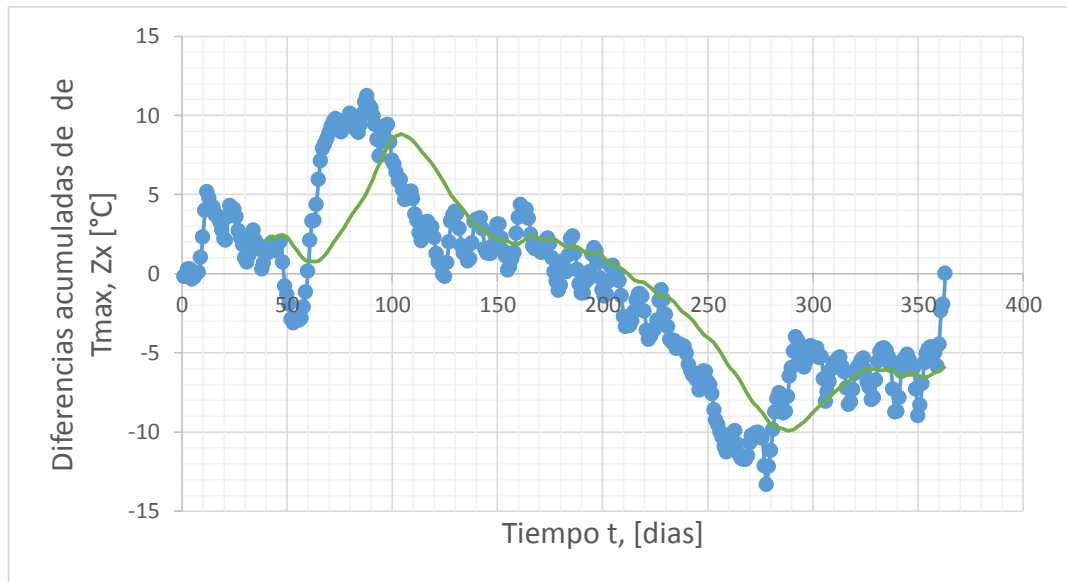


Figura 6.9 Diferencia acumulada para los 12 meses del año, T_{max}



Libro1 (3) (Recuperado) - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS

Gráfico 1

	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
	Tmin	Numero de intervalos	Intervalo de distancia	Intervalo de distancia acumulado	Promedio de intervalo	Area	Area acumulada	zx
	[°C]	n	xi	[-]	ri	ai	[-]	[-]
1	26	1	1	1	26	26	26	0.118181818
2	27.3	2	1	2	26.65	26.65	52.65	0.886363636
3	26.5	3	1	3	26.9	26.9	79.55	1.904545455
4	25.8	4	1	4	26.15	26.15	105.7	2.172727273
5	26	5	1	5	25.9	25.9	131.6	2.190909091
6	26.3	6	1	6	26.15	26.15	157.75	2.459090909
7	25.9	7	1	7	26.1	26.1	183.85	2.677272727
8	26	8	1	8	25.95	25.95	209.8	2.745454545
9	26.4	9	1	9	26.2	26.2	236	3.063636364
10	24.8	10	1	10	25.6	25.6	261.6	2.781818182
11	24.4	11	1	11	24.6	24.6	286.2	1.5
12	26.8	12	1	12	25.6	25.6	311.8	1.218181818
13	24.7	13	1	13	25.75	25.75	337.55	1.086363636
14	24.8	14	1	14	24.75	24.75	362.3	-0.045454545
15	26.1	15	1	15	25.45	25.45	387.75	-0.477272727
16	25.5	16	1	16	25.8	25.8	413.55	-0.559090909
17	25.8	17	1	17	25.65	25.65	439.2	-0.790909091
18	25	18	1	18	25.4	25.4	464.6	-1.272727273
19	27.1	19	1	19	26.05	26.05	490.65	-1.104545455
20	25.5	20	1	20	26.3	26.3	516.95	-0.686363636
21	25	21	1	21	25.25	25.25	542.2	-1.318181818
22	27.5	22	1	22	26.25	26.25	568.45	-0.95
23	26	23	1	23	26.75	26.75	595.2	-0.08181818
24	25.2	24	1	24	25.6	25.6	620.8	-0.363636364

Apto San Andres A4 Apto Providencia A5 Apto Santa Marta

LISTO

Figura 6.10 Cálculo de las diferencias acumuladas de temperatura mínima

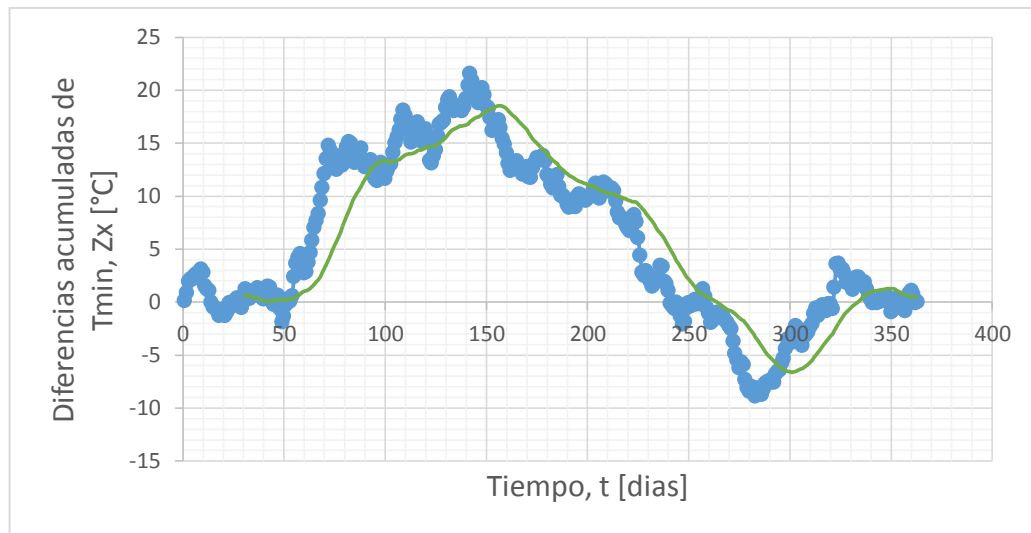


Figura 6.11 Diferencia acumulada para los 12 meses del año, T_{min}



Libro1 (3) (Recuperado) - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS

Gráfico 2

	CQ	CR	CS	CT	CU	CV	CW	CX
	Tmedia	Numero de intervalos	Intervalo de distancia	Intervalo de distancia acumulado	Promedio de intervalo	Area	Area acumulada	zx
	[°C]	n	xi	[-]	ri	ai	[-]	[-]
2	28	1	1	1	28	28		-0.03739669
3	28.95	2	1	2	28.475	28.475	56.475	0.400206612
4	28.5	3	1	3	28.725	28.725	85.2	1.087809917
5	27.85	4	1	4	28.175	28.175	113.375	1.225413223
6	27.6	5	1	5	27.725	27.725	141.1	0.913016529
7	28.85	6	1	6	28.225	28.225	169.325	1.100619835
8	27.7	7	1	7	28.275	28.275	197.6	1.33822314
9	28.5	8	1	8	28.1	28.1	225.7	1.400826446
10	28.85	9	1	9	28.675	28.675	254.375	2.038429752
11	28.2	10	1	10	28.525	28.525	282.9	2.526033058
12	28.3	11	1	11	28.25	28.25	311.15	2.738636364
13	28.65	12	1	12	28.475	28.475	339.625	3.176239669
14	26.9	13	1	13	27.775	27.775	367.4	2.913842975
15	27.55	14	1	14	27.225	27.225	394.625	2.101446281
16	28	15	1	15	27.775	27.775	422.4	1.839049587
17	27.5	16	1	16	27.75	27.75	450.15	1.551652893
18	28.3	17	1	17	27.9	27.9	478.05	1.414256198
19	26.95	18	1	18	27.625	27.625	505.675	1.001859504
20	28.75	19	1	19	27.85	27.85	533.525	0.81446281
21	27.2	20	1	20	27.975	27.975	561.5	0.752066116
22	28.15	21	1	21	27.675	27.675	589.175	0.389669421
23	29.75	22	1	22	28.95	28.95	618.125	1.302272727
24	27.9	23	1	23	28.825	28.825	646.95	2.089876033
25	27.75	24	1	24	27.825	27.825	674.775	1.877479339

Apto San Andres A4 Apto Providencia A5 Apto Santa Marta

Figura 6.12 Cálculo de las diferencias acumuladas de temperatura media

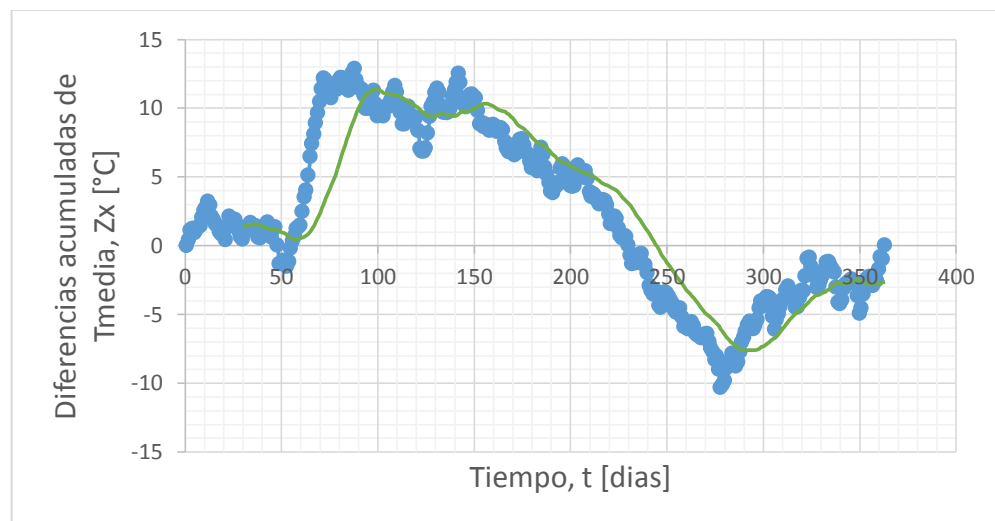


Figura 6.13 Diferencia acumulada para los 12 meses del año, T_{media}



Libro1 (3) (Recuperado) - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS

Gráfico 6

	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF
	Precipitacion	Numero de intervalos	Intervalo de distancia	Intervalo de distancia acumulado	Promedio de intervalo	Area	Area acumulada	zx
	[mm/dia]	n	xi	[-]	ri	ai	[-]	[-]
1								
2	0.1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	-4.27066116
3	0	2	1	2	0.05	0.05	0.15	-8.59132231
4	0.6	3	1	3	0.3	0.3	0.45	-12.6619835
5	0.6	4	1	4	0.6	0.6	1.05	-16.4326446
6	0	5	1	5	0.3	0.3	1.35	-20.5033058
7	0	6	1	6	0	0	1.35	-24.8739669
8	0	7	1	7	0	0	1.35	-29.2446281
9	0	8	1	8	0	0	1.35	-33.6152893
10	2.9	9	1	9	1.45	1.45	2.8	-36.5359504
11	4.3	10	1	10	3.6	3.6	6.4	-37.3066116
12	1.4	11	1	11	2.85	2.85	9.25	-38.8272727
13	0	12	1	12	0.7	0.7	9.95	-42.4979339
14	21.6	13	1	13	10.8	10.8	20.75	-36.068595
15	2.7	14	1	14	12.15	12.15	32.9	-28.2892562
16	3.2	15	1	15	2.95	2.95	35.85	-29.7099174
17	0.2	16	1	16	1.7	1.7	37.55	-32.3805785
18	0.2	17	1	17	0.2	0.2	37.75	-36.5512397
19	0	18	1	18	0.1	0.1	37.85	-40.8219008
20	3	19	1	19	1.5	1.5	39.35	-43.692562
21	4.4	20	1	20	3.7	3.7	43.05	-44.3632231
22	7.9	21	1	21	6.15	6.15	49.2	-42.5838843
23	0.1	22	1	22	4	4	53.2	-42.9545455
24	0	23	1	23	0.05	0.05	53.25	-47.2752066
25	4.9	24	1	24	2.45	2.45	55.7	-49.1958678

LISTO

Figura 6.14 Cálculo de las diferencias acumuladas de precipitación

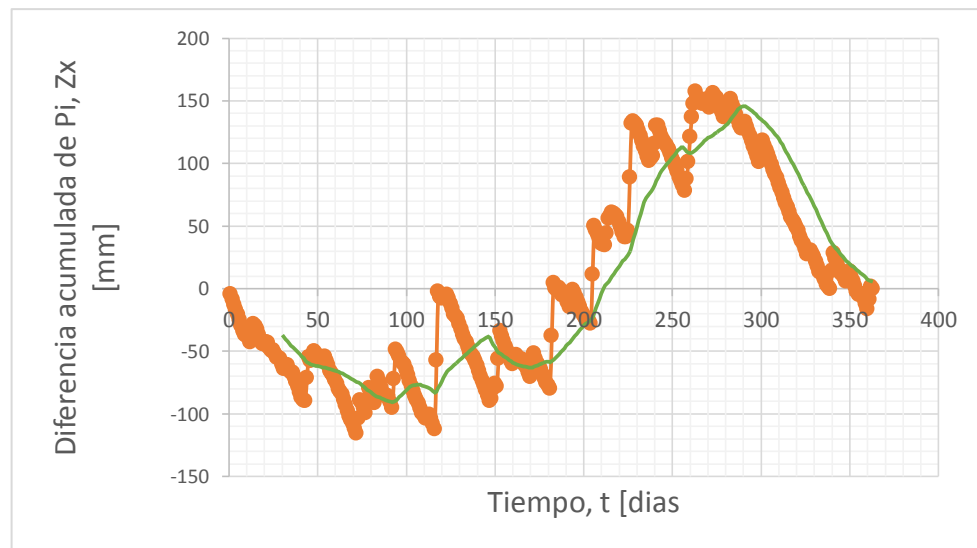


Figura 6.15 Diferencia acumulada para los 12 meses del año, Precipitación



UNIVERSIDAD DEL CAUCA, ERIKA JOHANNA GUERRERO GUERRERO
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
 DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Libro1 (3) (Recuperado) - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA NITRO PRO 9

DK16 : X ✓ fx Dic

DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	
calculo del indice de Thornthwaite																		
1	Latitud	0.22						anterior	100									
2								Amaz	100									
3																		
4	Mes	i	ETP sin corr	J	d	ws	N	dias	ETP correg	Pi	AI	EXC	DEF	ih	ia	Im	ETP corr wtz	TMI wtz
5	Enero	8.502819	153.722543	16	-0.3672	1.48468	11.3	31	149.5805744	72.1	22.5194	0	0	0	0	0	1794.966893	1.2895235
6	Febrero	8.48597	153.043579	44	-0.2418	1.51562	11.6	28	138.0793177	111.6	0	0	-3.9599	0	-2.8678	-1.721	1656.951812	6.81108053
7	Marz	8.603915	157.831196	75	-0.0404	1.56176	11.9	31	161.7331337	117	0	0	-44.733	0	-27.659	-16.6	1940.797604	-3.6014433
8	Abril	8.454681	151.787137	105	0.16584	1.60823	12.3	30	155.5818159	212.7	57.1182	0	0	0	0	0	1866.98179	-1.2674555
9	Mayo	8.507215	153.899937	136	0.33296	1.64821	12.6	31	166.9814315	64.2	0	59.9	-45.663	35.872	-27.346	19.464	2003.777177	-5.6183974
10	Junio	8.433485	150.939246	166	0.40682	1.66729	12.7	30	159.7440358	129.8	0	0	-29.944	0	-18.745	-11.25	1916.92843	-2.9280425
11	Julio	8.469121	152.366273	197	0.37171	1.65808	12.7	31	166.6294489	246.5	79.8706	0	0	0	0	0	1999.553387	-5.4929617
12	Agosto	8.426143	150.646157	228	0.23321	1.62394	12.4	31	160.8566182	234.3	100	0	0	0	0	0	1930.279419	-3.35737
13	Sept	8.457204	151.888251	258	0.03689	1.57905	12.1	30	153.1539869	141.1	87.946	12.054	0	7.8705	0	7.8705	1837.847843	-0.2571539
14	Octu	8.517471	154.314295	289	-0.1754	1.53115	11.7	31	155.4716523	105.8	38.2744	37.618	0	24.196	0	24.196	1865.659828	-1.2222962
15	Nov	8.509689	153.999853	319	-0.335	1.49287	11.4	30	146.2998601	34	0	50.574	-74.025	34.569	-50.598	4.2098	1755.598321	2.77603885
16	Dic	8.512587	154.116905	350	-0.4078	1.47404	11.3	31	149.9643106	117.4	0	0	-32.564	0	-21.715	-13.03	1799.571727	1.11989854
17									Total (Pi)	1586.5								
18	I	101.8803																
19	a	2.231615														im prom	1.0957	-0.9865483

... Apto San Andres | A4 | Apto Providencia | A5 | Apto Santa Marta | A6 | A7 | Apto Cartagena ...

LISTO

Figura 6.16 Cálculo de los índices de Thornthwaite

Libro1 (3) (Recuperado) - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA NIT

Gráfico 5 : X ✓ fx

DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT
diferencias acumuladas Im normal									
Indice Thornthwaite Original	Numero de intervalos	Intervalo de distancia	Intervalo de distancia acum	Promedio de intervalo	Area	Area acumulada	zx	At	19.663084
[-]	n	xi	[-]	ri	ai	[-]	[-]	F*	1.6385904
0	1	1	1	0	0	0	-1.639		
-1.72070319	2	1	2	-0.860351596	-0.8603516	-0.860352	-4.138		
-16.5951649	3	1	3	-9.157934041	-9.157934	-10.01829	-14.93		
0	4	1	4	-8.297582444	-8.2975824	-18.31587	-24.87		
19.46424037	5	1	5	9.732120185	9.73212018	-8.583748	-16.78		
-11.2470061	6	1	6	4.108617119	4.10861712	-4.475131	-14.31		
0	7	1	7	-5.623503065	-5.6235031	-10.09863	-21.57		
0	8	1	8	0	0	-10.09863	-23.21		
7.870501535	9	1	9	3.935250768	3.93525077	-6.163383	-20.91		
24.19583563	10	1	10	16.03316858	16.0331686	9.8697855	-6.516		
4.209792988	11	1	11	14.20281431	14.2028143	24.0726	6.0481		
-13.0288242	12	1	12	-4.409515593	-4.4095156	19.663084	0		

... Apto San Andres | A4 | Apto Providencia | A5 | Apto Santa Marta | A6 | A7 | Apto Cartagen

LISTO

Figura 6.17 Cálculo de las diferencias acumuladas para I_m , original

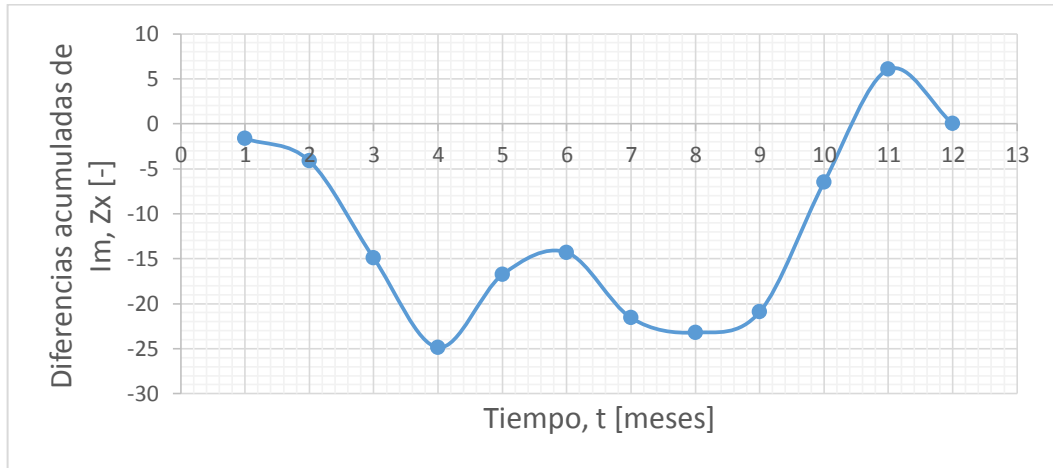


Figura 6.18 Diferencia acumulada para los 12 meses del año, I_m original

Libro1 (3) (Recuperado) - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA NITR

EA64 : f_x

	DK	DL	DM	DN	DO	DP	DQ	DR	DS	DT
46										
47										
48	Indice Thorntwaite , con Wtz	Numero de intervalos	Intervalo de distancia	Intervalo de distancia acum	Promedio de intervalo	Area	Area acumulada	zx	At	-11.75377
49	[-]	n	xi	[-]	ri	ai	[-]	[-]	F*	-0.979481
50	1.289523496	1	1	1	1.289523496	1.2895235	1.2895235	2.269		
51	6.811080527	2	1	2	4.050302012	4.05030201	5.3398255	7.2988		
52	-3.69144328	3	1	3	1.559818622	1.55981862	6.8996441	9.8381		
53	-1.26745552	4	1	4	-2.479449402	-2.4794494	4.4201947	8.3381		
54	-5.61839742	5	1	5	-3.442926473	-3.4429265	0.9772683	5.8747		
55	-2.92804252	6	1	6	-4.273219973	-4.27322	-3.295952	2.5809		
56	-5.49296169	7	1	7	-4.210502107	-4.2105021	-7.506454	-0.65		
57	-3.35737001	8	1	8	-4.42516585	-4.4251659	-11.93162	-4.096		
58	-0.25715392	9	1	9	-1.807261963	-1.807262	-13.73888	-4.924		
59	-1.22229615	10	1	10	-0.739725036	-0.739725	-14.47861	-4.684		
60	2.776038849	11	1	11	0.776871348	0.77687135	-13.70174	-2.927		
61	1.119898537	12	1	12	1.947968693	1.94796869	-11.75377	0		
62										
63										
64										
65										
66										
67										
68										

Figura 6.19 Cálculo de las diferencias acumuladas para TMI, Witzak

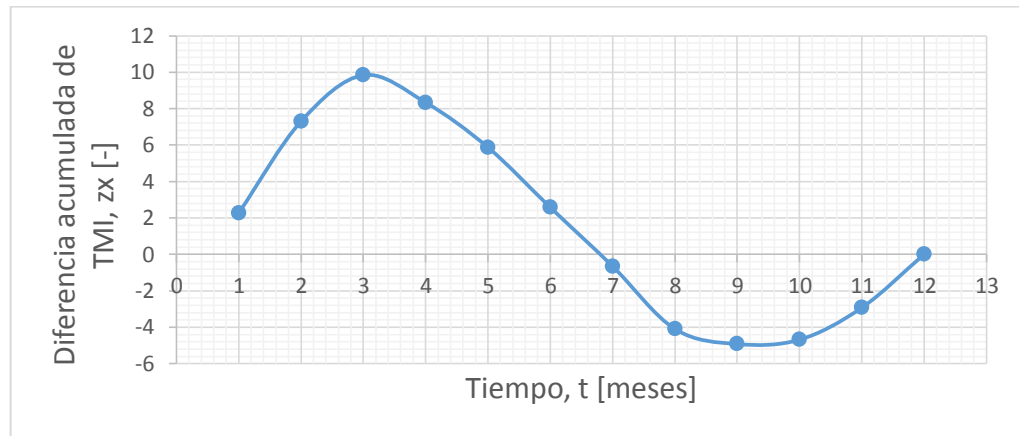


Figura 6.20 Diferencia acumulada para los 12 meses del año, TMI, Wiczak

6.5.3 Ejemplo completo de cálculo de la evapotranspiración de referencia usando la metodología de Penman and Monteith, con Temperatura máxima y mínima

Como se había explicado anteriormente, cuando las estaciones cercanas al proyecto no cuentan con datos de las 5 variables que se requieren para el cálculo original de la ecuación, se puede desarrollar la ecuación solo con tener la temperatura máxima, mínima y otros factores que todas las estaciones tienen. Para hacer este cálculo obtuvimos datos de 46 aeropuertos que tienen incorporadas las estaciones meteorológicas y que nos brindan información diaria de temperatura máxima, mínima y precipitación. Los datos se obtuvieron directamente de la página web del IDEAM.

Nota: ver figuras 6.6 – 6.7 para formato de datos



Nuevos calculos.... - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA NITRO PRO 9 Iniciar s

Calibri 11 Fuente Alineación Número Estilos Celdas

Portapapeles Pegar Fuente Alineación Número Estilos Celdas

C9

Datos (Constantes)									
Z (altitud)	Latitud	Krs	Albedo	Gsc	Constante	V. viento	A (anterior)	Amax	
[m.s.n.m]	[rad]	[-]	[-]	[MJ*m ⁻² *min ⁻¹]	[MJ*K ⁴ *m ⁻² *dia ⁻¹]	[m/s]	[mm]	[mm]	
1	0.22	0.19	0.23	0.082	4.903E-09	2	100	100	

Mes	Dia	N° Dias	P.A	γ	T media	e0 (Tmedia)	Δ	e0 (Tmax)	e0 (Tmin)	ea	es
[-]	[-]	[-]	[kPa]	[kPa/°C]	[°C]	[kPa]	[kPa/°C]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
ENERO	1	1	101.28818	0.06735664	28	3.77993036	0.220080342	4.243065059	3.361439829	3.3614398	3.8022524
ENERO	2	2	101.28818	0.06735664	28.95	3.99411786	0.230894505	4.391291947	3.628573846	3.6285738	4.0099329
ENERO	3	3	101.28818	0.06735664	28.5	3.89137953	0.225717687	4.366279321	3.462082359	3.4620824	3.9141808
ENERO	4	4	101.28818	0.06735664	27.85	3.74704217	0.21841239	4.218788397	3.321902528	3.3219025	3.7703455
ENERO	5	5	101.28818	0.06735664	27.6	3.69278196	0.215656078	4.052208127	3.361439829	3.3614398	3.706824
ENERO	6	6	101.28818	0.06735664	28.85	3.97108544	0.229735571	4.595917317	3.421514668	3.4215147	4.008716
ENERO	7	7	101.28818	0.06735664	27.7	3.71440338	0.216755074	4.122885469	3.341620215	3.3416202	3.7322528

... Precipitación mm. **Calculos** Resultados Calculo de TMI ANUAL

Figura 6.21 Cálculo de los parámetros de la Evapotranspiración.

Nuevos calculos.... - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR Nueva pestaña DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA NITRO PRO 9 Iniciar ses

Calibri 11 Fuente Alineación Número Estilos Celdas

Portapapeles Pegar Fuente Alineación Número Estilos Celdas

C9

es-ea	dr	δ	ωs	N	Ra	Rs	Rns	Rso	Rs/Rso	Rnl	Rn	G	Eto
[kPa]	[-]	[rad]	[rad]	[Horas]	[MJ.m ⁻² .day ⁻¹]	[MJ.m ⁻² .day ⁻¹]	[MJ.m ⁻² .day ⁻¹]	[MJ.m ⁻² .day ⁻¹]	[-]	[MJ.m ⁻² .day ⁻¹]	[MJ.m ⁻² .day ⁻¹]	[MJ.m ⁻² .day ⁻¹]	[mm/dia]
0.44081	1.033	-0.401	1.4758	11.27461	29.8460845	11.34151209	8.73296431	22.38516026	0.5066532	1.12264396	7.61032035	0	2.583457
0.38136	1.033	-0.3996	1.4762	11.27753	29.8835268	10.31436325	7.9420597	22.41324279	0.4601906	0.81242563	7.12963407	0	2.3972247
0.4521	1.033	-0.398	1.4766	11.28069	29.9237245	11.3710153	8.75568178	22.44339183	0.5066532	1.07838349	7.67729829	0	2.6228585
0.44844	1.0329	-0.3963	1.4771	11.28408	29.9666488	11.52878943	8.87716786	22.47558592	0.5129472	1.16980643	7.70736143	0	2.6164548
0.34538	1.0329	-0.3945	1.4776	11.2877	30.012269	10.20064	7.8544928	22.50980201	0.4531644	0.87516971	6.97932309	0	2.2912543
0.5872	1.0328	-0.3926	1.4781	11.29156	30.0605524	12.8983942	9.93176353	22.54601549	0.572092	1.39657324	8.53519029	0	3.0209809
0.39063	1.0328	-0.3906	1.4786	11.29564	30.111464	10.85517231	8.35848268	22.58420019	0.4806534	1.00971397	7.34876871	0	2.4472995
0.56558	1.0327	-0.3884	1.4792	11.29994	30.1649668	12.81567411	9.86806907	22.62432843	0.5664554	1.40350728	8.46456179	0	2.9714631
0.56407	1.0326	-0.3862	1.4798	11.30447	30.2210221	12.71044598	9.78704341	22.66637099	0.5607623	1.33325239	8.45379101	0	2.9716389
0.75906	1.0325	-0.3838	1.4804	11.30921	30.2795888	15.00230638	11.5517759	22.71029719	0.6605949	2.02397213	9.52780378	0	3.4868866
0.87623	1.0324	-0.3813	1.481	11.31418	30.3406241	16.0999828	12.3969868	22.75607488	0.7075026	2.33624484	10.0607419	0	3.7723444
0.43128	1.0323	-0.3787	1.4817	11.31925	30.4040923	11.11185012	8.5561246	22.80267047	0.4872824	0.96607401	7.58015058	0	2.5647728

... Precipitación mm. **Calculos** Resultados Calculo de TMI ANUAL

Figura 6.22 Cálculo de los parámetros de la Evapotranspiración.

Nota: ver referencia: (Allen et al. 1998)



6.5.4 Cálculo del índice de Thornthwaite utilizando la evapotranspiración calculada con la ecuación de Penman and Monteith.

Cálculo de TMI, Penman											
Mes	# Dias*mes	Eto	Pi	Ai	EXC	DEF	ih	ia	TMI	TMI (anual)	
[-]	[-]	[mm/mes]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-] (anual)	
ENERO	31	84.79817428	72.1	87.30182572	0	0	0	0	0	42.35704431	
FEBRERO	28	74.55439621	111.6	100	24.34742951	0	32.65726872	0	32.65726872	42.35704431	
MARZO	31	100.8789026	117	100	16.12109744	0	15.98064316	0	15.98064316	42.35704431	
ABRIL	30	95.87328327	212.7	100	116.8267167	0	121.8553415	0	121.8553415	42.35704431	
MAYO	31	102.0240783	64.2	62.17592173	0	0	0	0	0	42.35704431	
JUNIO	30	99.62634478	129.8	92.34957695	0	0	0	0	0	42.35704431	
JULIO	31	103.0109246	246.5	100	135.8386524	0	131.8682004	0	131.8682004	42.35704431	
AGOSTO	31	101.984359	234.3	100	132.315641	0	129.7411115	0	129.7411115	42.35704431	
SEPTIEMBRE	30	99.18278568	141.1	100	41.91721432	0	42.26259026	0	42.26259026	42.35704431	
OCTUBRE	31	96.23771313	105.8	100	9.562286871	0	9.936111904	0	9.936111904	42.35704431	
NOVIEMBRE	30	82.47286908	34	51.52713092	0	0	0	0	0	42.35704431	
DICIEMBRE	31	85.32953674	117.4	83.59759417	0	0	0	0	0	42.35704431	
SUMA		1125.973368			476.9290382	0					

Figura 6.23 Cálculo de TMI usando la ETo calculada con Penman and Monteith.

6.5.5 Ejemplo de cálculo del índice de Thornthwaite, usando la metodología original



Cálculo de TMI (original)																				
Mes	# Dias*mes	J	i	l	a	Etp (sin corregir)	δ	ω_s	N	Etp (corregida)	Pi	Ai	EXC	DEF	ih	ia	TMI	TMI (anual)		
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[mm/mes]	[rad]	[rad]	[Horas]	[mm/mes]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]		
ENERO	31	16	8.50282	101.879	2.23159	153.7223121	-0.36717	1.484684	11.342149	150.138284	72.1	21.96171601	0	0	0	0	0	-4.55296677		
FEBRERO	28	44	8.48597			153.0433554	-0.24181	1.515616	11.578451	137.8226067	111.6	0	0	-4.26089068	0	-3.09157603	-1.85494562	-4.55296677		
MARZO	31	75	8.60392			157.8309194	-0.0404	1.561757	11.930948	162.153466	117	0	0	-45.153466	0	-27.8461306	-16.7076784	-4.55296677		
ABRIL	30	105	8.45468			151.7869278	0.165837	1.608233	12.285996	155.4044675	212.7	57.29553252	0	0	0	0	0	-4.55296677		
MAYO	31	136	8.50721			153.8997041	0.332956	1.648208	12.591383	166.8669812	64.2	0	0	-45.3714487	0	-27.1901897	-16.3141138	-4.55296677		
JUNIO	30	166	8.43348			150.9390461	0.406822	1.667294	12.737191	160.211616	129.8	0	0	-30.411616	0	-18.9821542	-11.3892925	-4.55296677		
JULIO	31	197	8.46912			152.3660569	0.371698	1.658078	12.666783	166.1933955	246.5	80.30660449	0	0	0	0	0	-4.55296677		
AGOSTO	31	228	8.42894			150.7576981	0.233213	1.623939	12.405979	161.0533385	234.3	100	53.55326596	0	33.25188192	0	33.25188192	-4.55296677		
SEPTIEMBRE	30	258	8.45349			151.7393198	0.036894	1.57905	12.063056	152.536657	141.1	88.56334305	0	0	0	0	0	-4.55296677		
OCTUBRE	31	289	8.51747			154.3140579	-0.17543	1.531148	11.697109	155.4329939	105.8	38.93034918	0	0	0	0	0	-4.55296677		
NOVIEMBRE	30	319	8.50969			153.9996189	-0.33499	1.492874	11.404716	146.3601586	34	0	0	-73.4298095	0	-50.1706271	-30.1023763	-4.55296677		
DICIEMBRE	31	350	8.51259			154.1166699	-0.40777	1.474044	11.26087	149.444783	117.4	0	0	-32.044783	0	-21.4425571	-12.8655343	-4.55296677		
SUMA										1863.618748			53.553266	-230.672						

Figura 6.24 Cálculo del TMI usando la metodología Original.

6.6 Manejar programas de computador requeridos para el análisis estructural de pavimentos.

El día 9 de abril del presente año inicio el curso de manejo del software utilizado por la guía MEPDG, este curso fue orientado por el ingeniero Manuel Meza y la duración fue de dos días, donde se aprendió el manejo básico del software, se hizo énfasis en la entrada de datos de información general, transito, clima y estructura.

A continuación se mostrara una secuencia de pasos que se deben seguir para el manejo adecuado del software. Se corrió un ejemplo para un nivel 2 de jerarquía

1. Información general

- a) Abrir un proyecto nuevo e introducir su nombre



Figura 6.25 Pantallazo- nuevo proyecto M-EPDG

- b) Información general, periodo de diseño, fecha de construcción, tipo de pavimento.

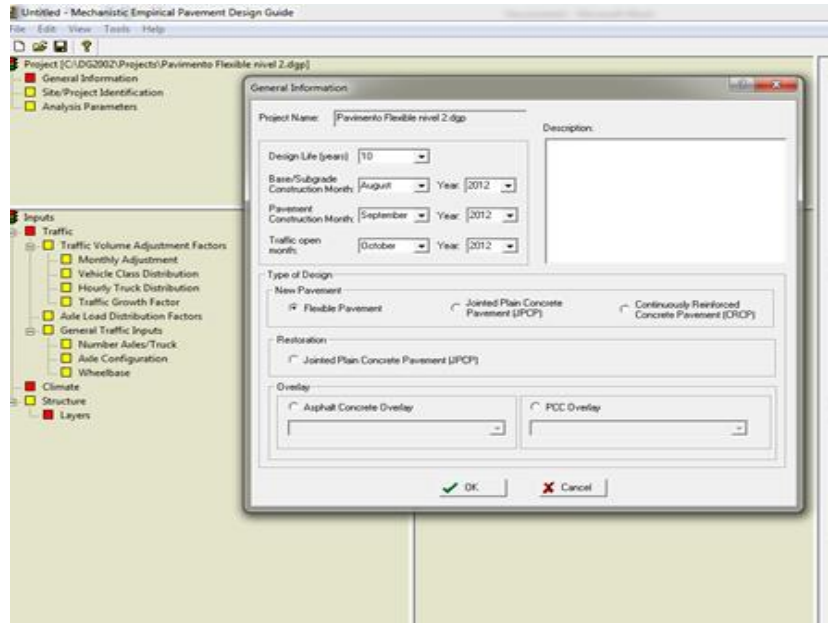


Figura 6.26 Pantallazo- Información general del proyecto

- c) Localización del proyecto, ciudad, número del proyecto.

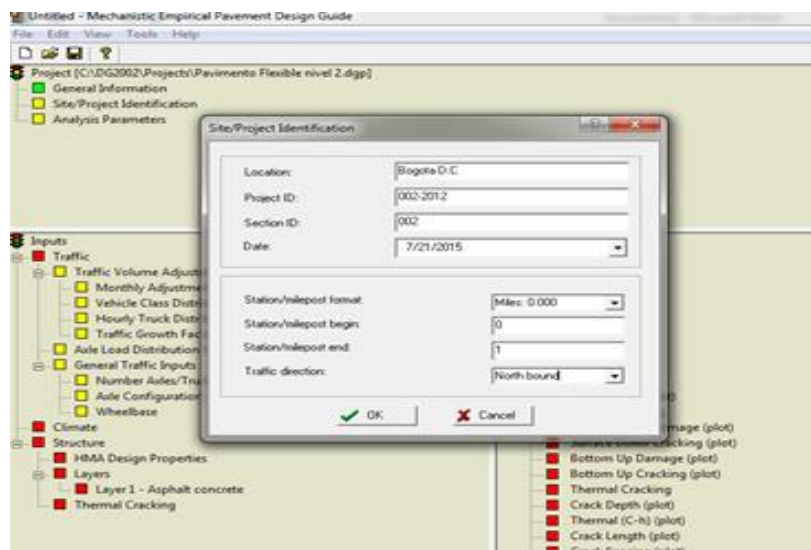


Figura 6.27 Pantallazo- localización del proyecto



- d) Análisis de parámetros, límites de IRI, fallas, deformaciones permanentes.

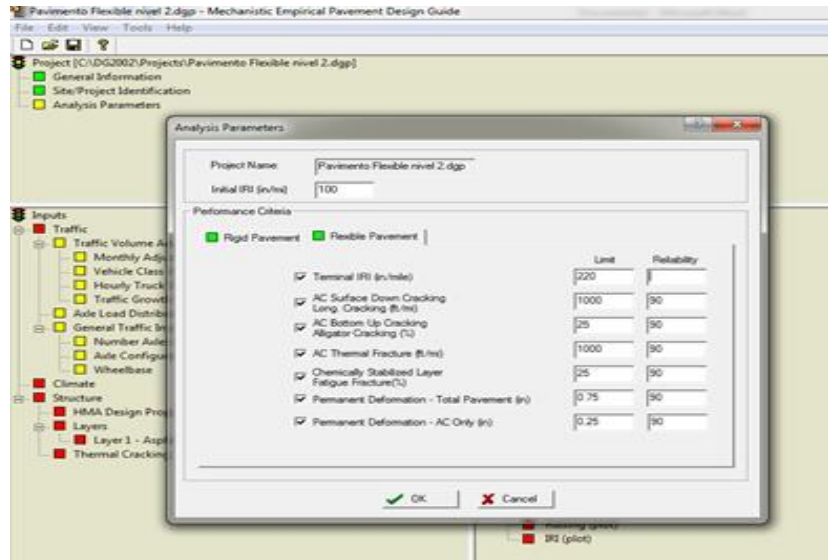


Figura 6.28 Pantallazo – análisis de parámetros

2. Información de tránsito

- a) Información general, número de carriles de diseño, porcentaje de camiones por dirección en el diseño, velocidad de operación.

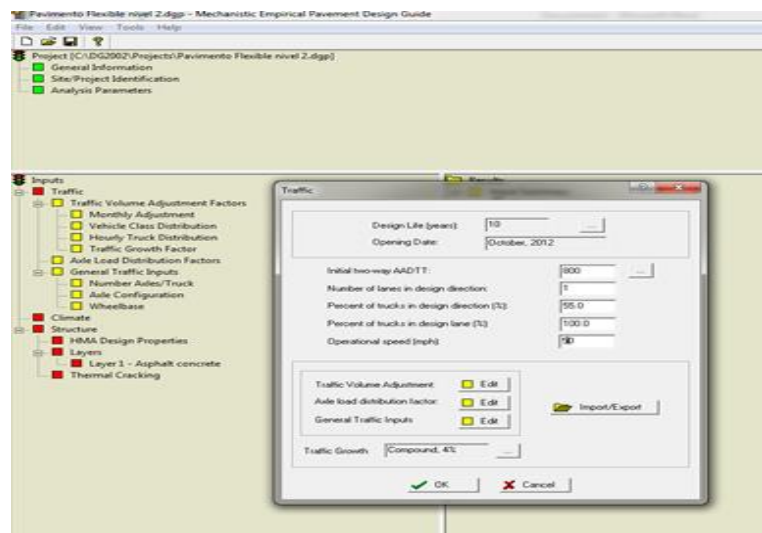


Figura 6.29 Pantallazo – información general del tránsito



b) Distribución de clases de vehículo, porcentaje de cada clase de camión.

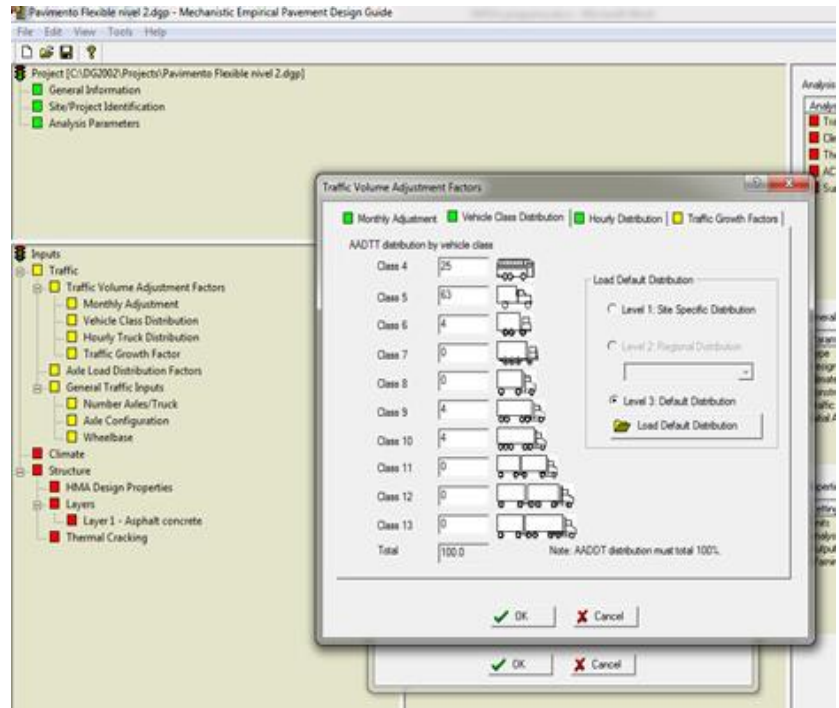


Figura 6.30 Pantallazo- distribución de clases de vehículo

c) Distribución horaria

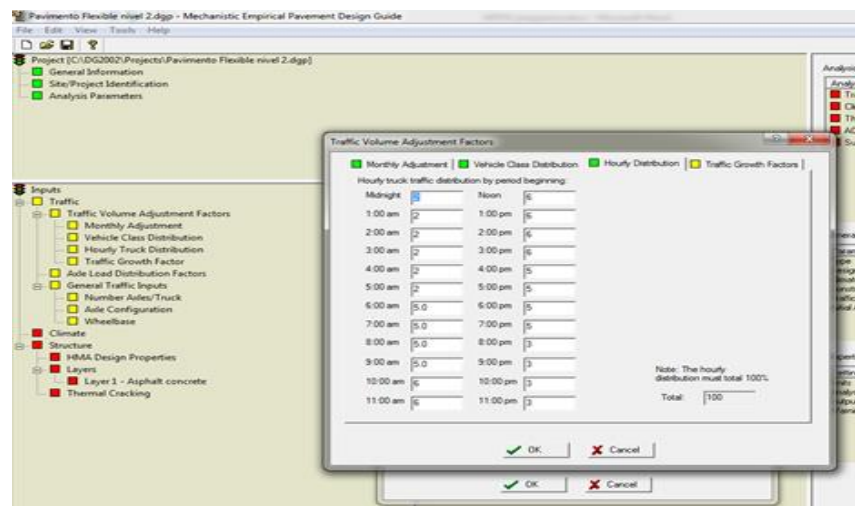


Figura 6.31 Pantallazo – distribución horaria

d) Factor de crecimiento del tráfico, porcentaje de línea de crecimiento.

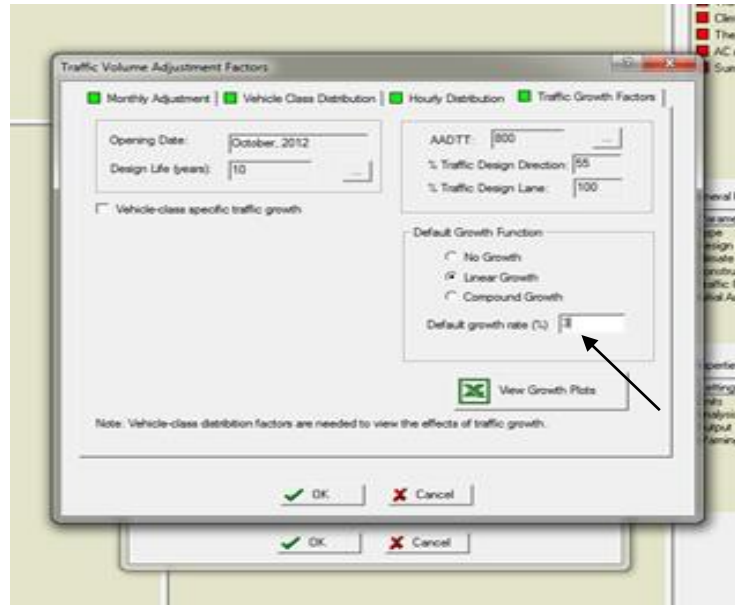


Figura 6.32 Pantallazo – Factor de crecimiento del tráfico

e) Factor de distribución de carga por eje

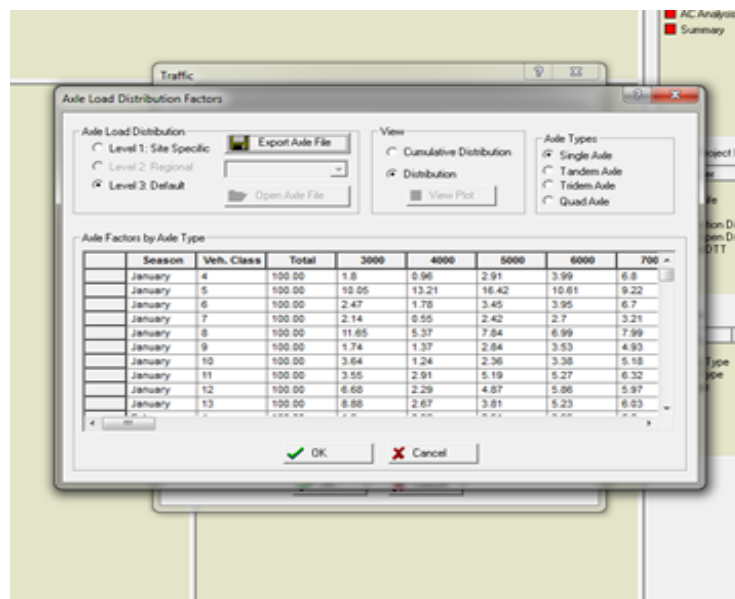


Figura 6.33 Pantallazo – distribución de carga por eje

- f) Entradas generales de tráfico, distancia entre ejes, ancho de carril de diseño, configuración de los ejes, la presión de inflado.

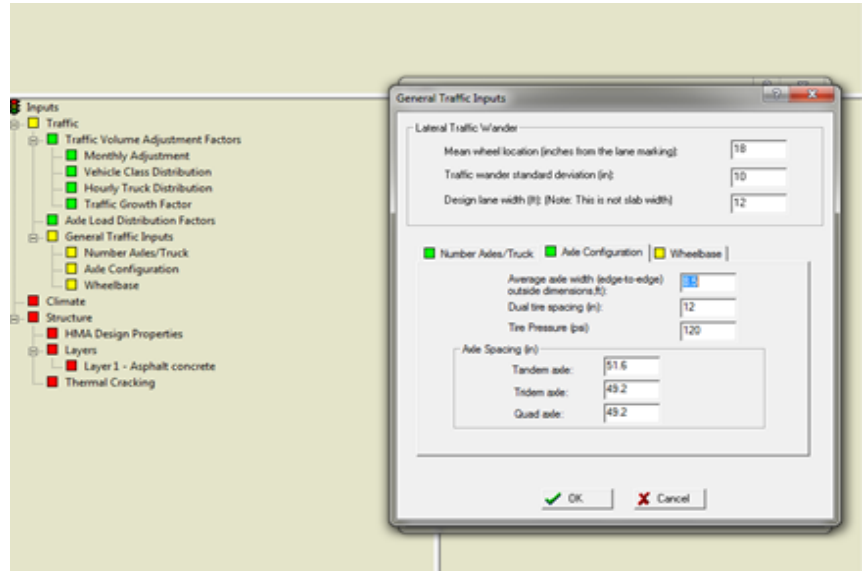


Figura 6.34 Pantallazo – entradas generales del trafico

3. Clima, se generó un archivo climático del estado de JOHNSTOWN P.A

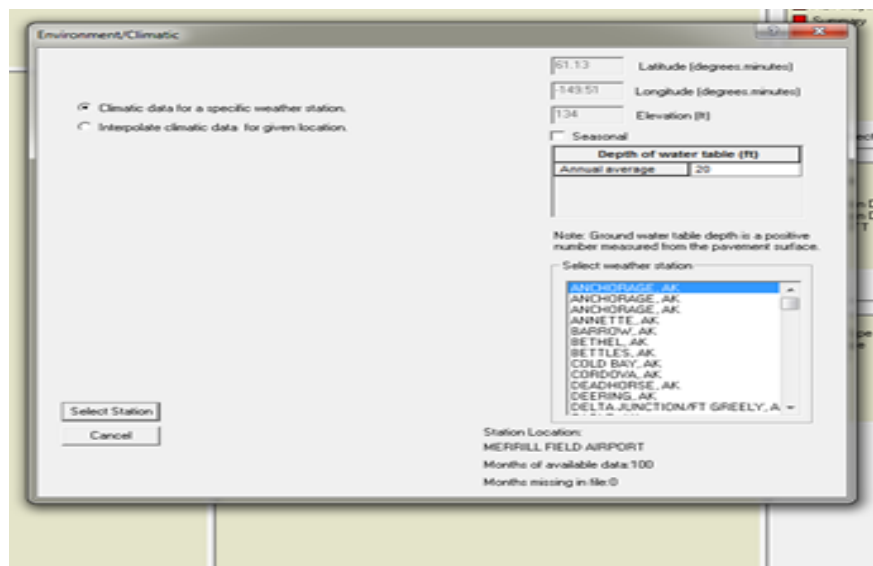


Figura 6.35 Pantallazo- generación de archivo climático



4. Estructura, datos de cada capa que componen la estructura del pavimento, como espesor, tipo de material, módulos, porcentajes pasa, etc.

a) Carpeta asfáltica

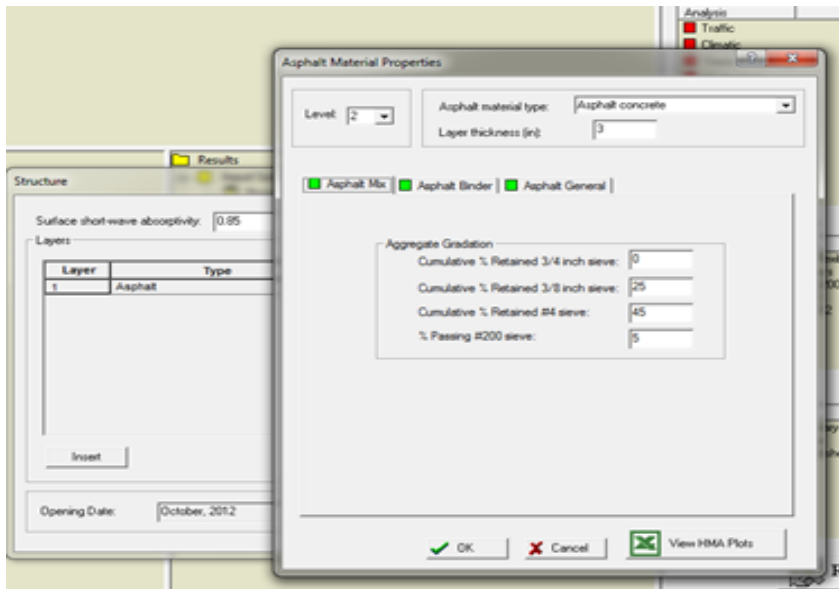


Figura 6.36 Pantallazo- datos de entrada de la carpeta asfáltica

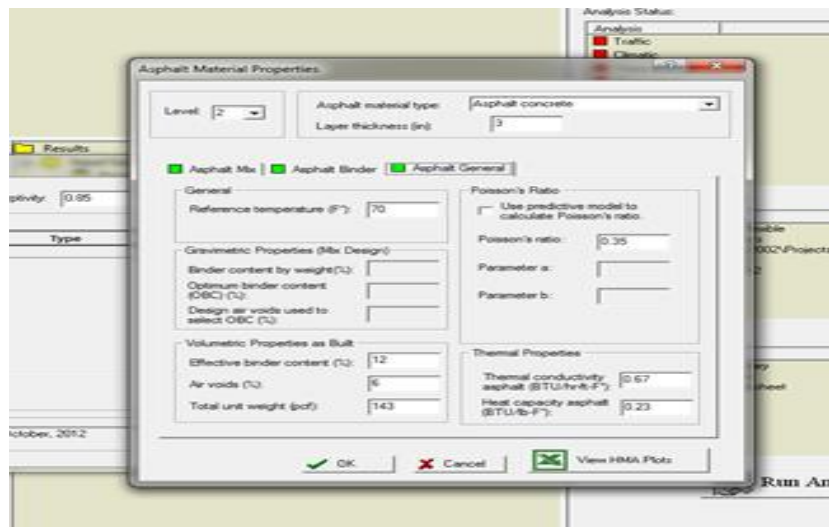


Figura 6.37 Pantallazo – Datos de entrada de la carpeta asfáltica

b) Base y sub-base granular, espesores, tipo de material, módulos etc.

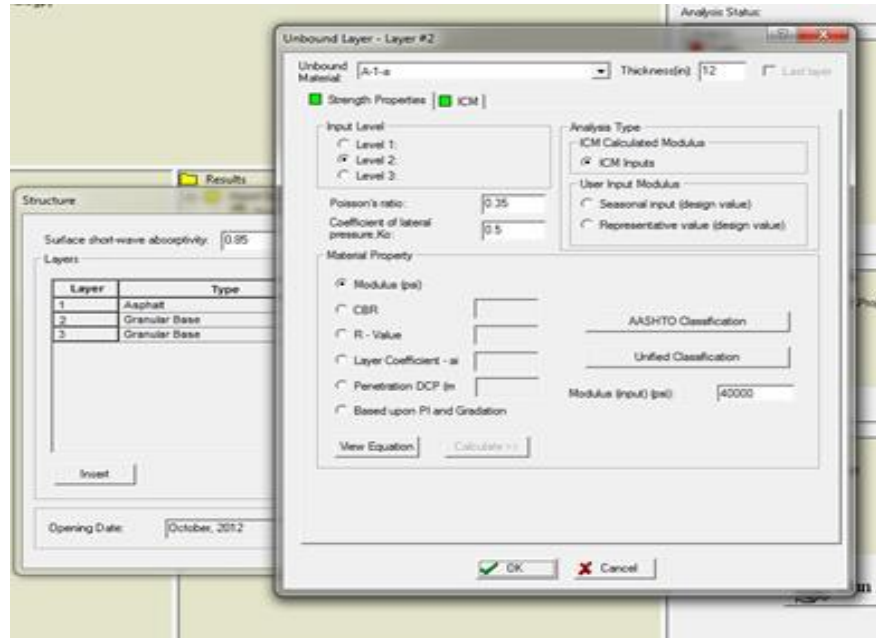


Figura 6.38 Pantallazo – datos de entrada de la base granular

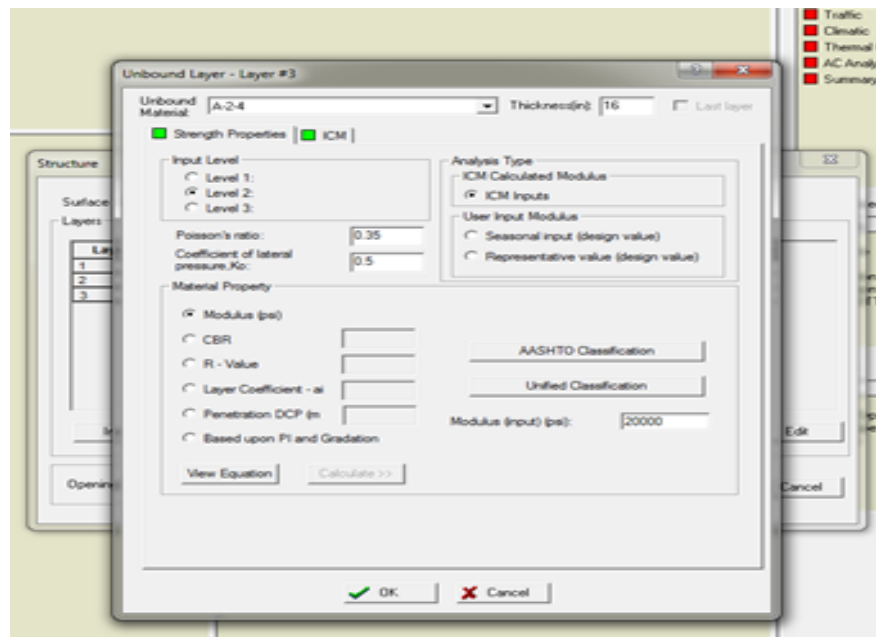


Figura 6.39 Pantallazo- datos de entrada de la sub-base granular

c) Subrasante, tipo de suelo, CBR para calcular el módulo elástico

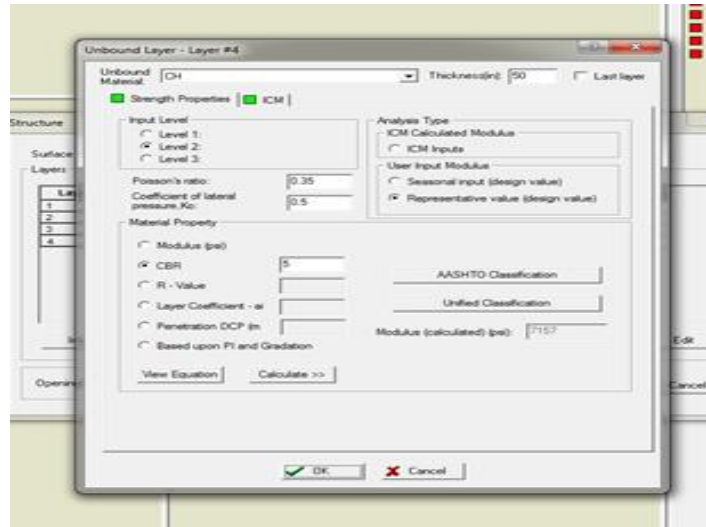


Figura 6.40 Pantallazo – datos de entrada de la subrasante

d) Agrietamiento térmico

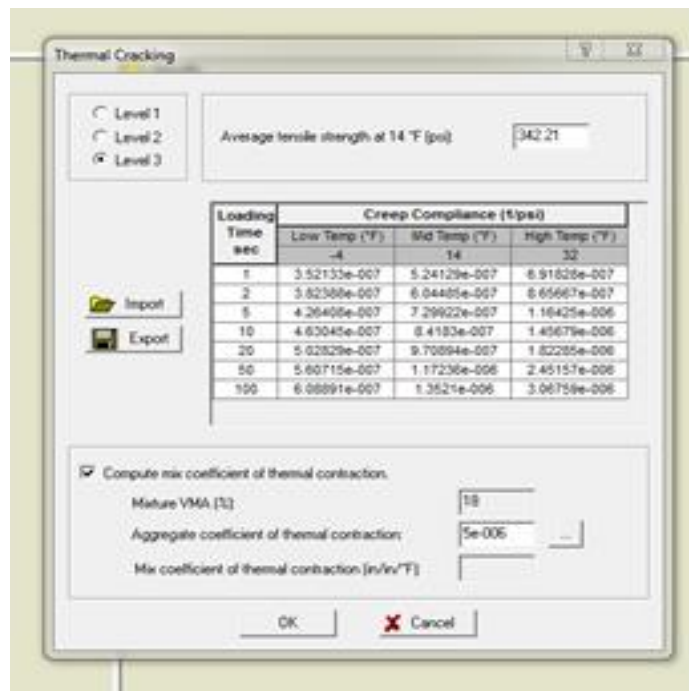


Figura 6.41 Pantallazo – agrietamiento térmico

Para que el programa corra y calcule todos los parámetros anteriores deben estar con color verde como se muestra en la siguiente figura:

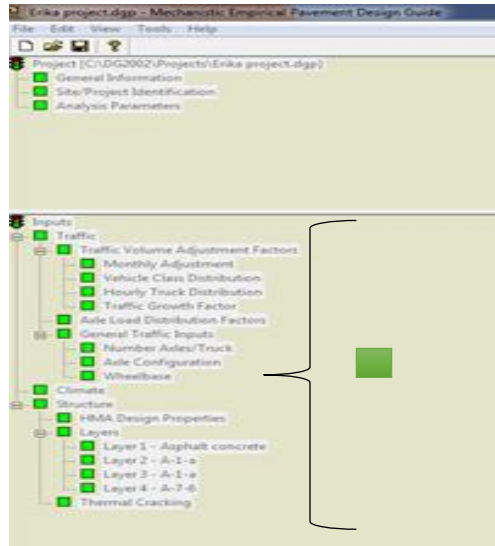


Figura 6.42 Pantallazo – Estado de parámetros

5. Resultados que proporciona el programa

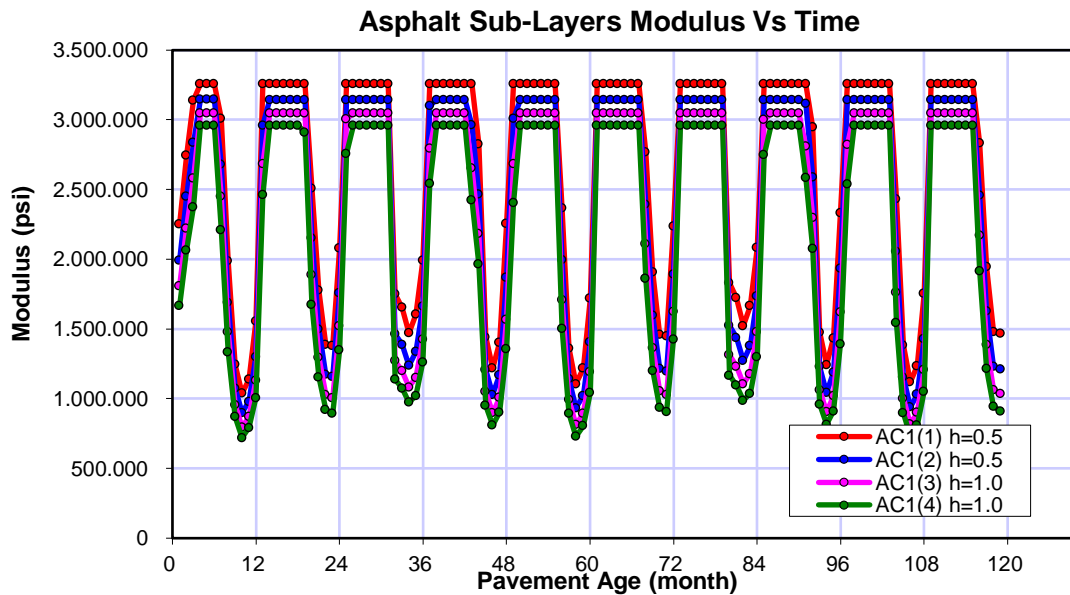


Figura 6.43 Módulo de las Sub-capas asfálticas Vs Tiempo

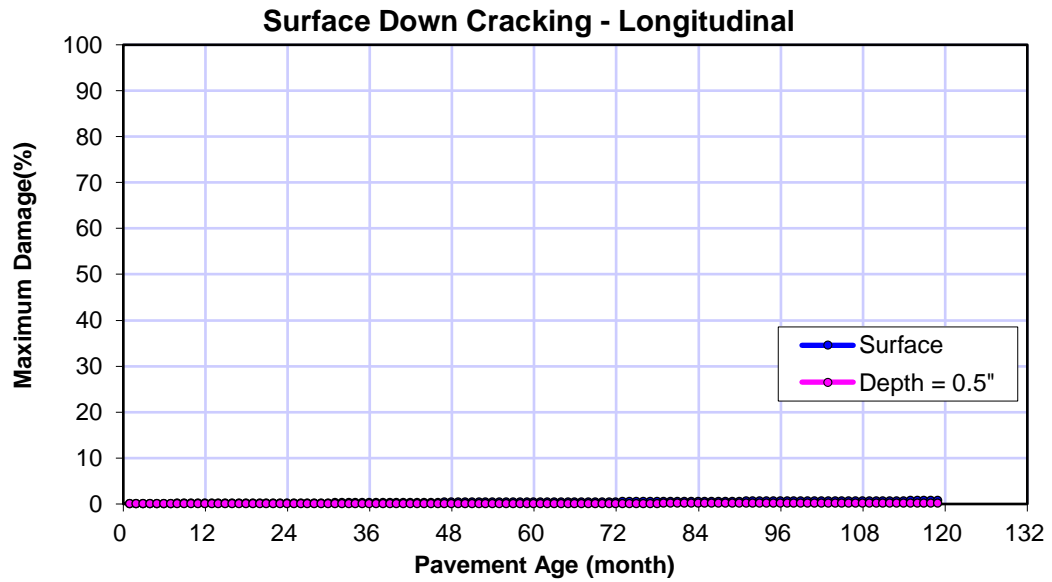


Figura 6.44 Agrietamiento longitudinal de arriba hacia abajo, daño máximo Vs tiempo

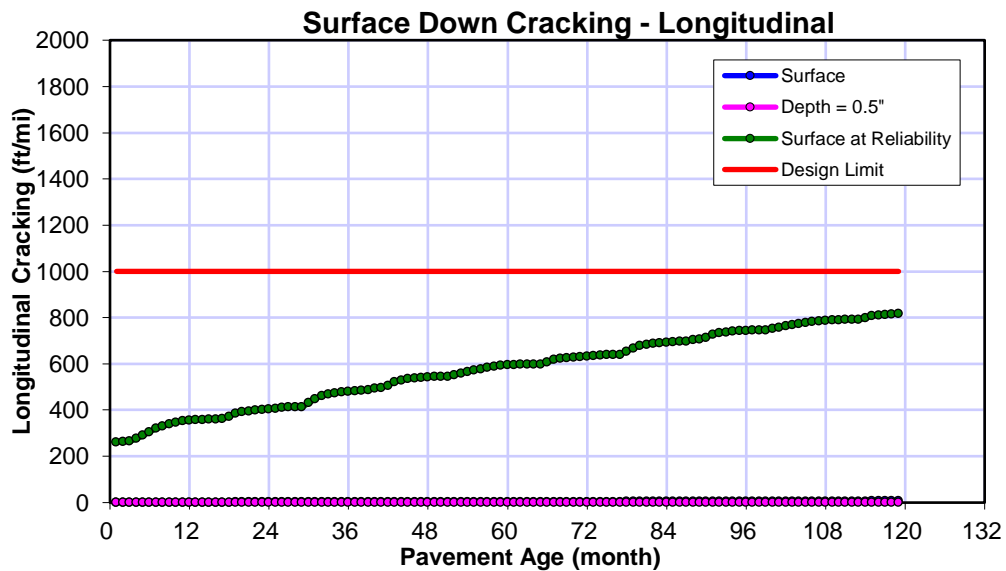


Figura 6.45 Agrietamiento longitudinal de arriba hacia abajo, agrietamiento longitudinal Vs tiempo

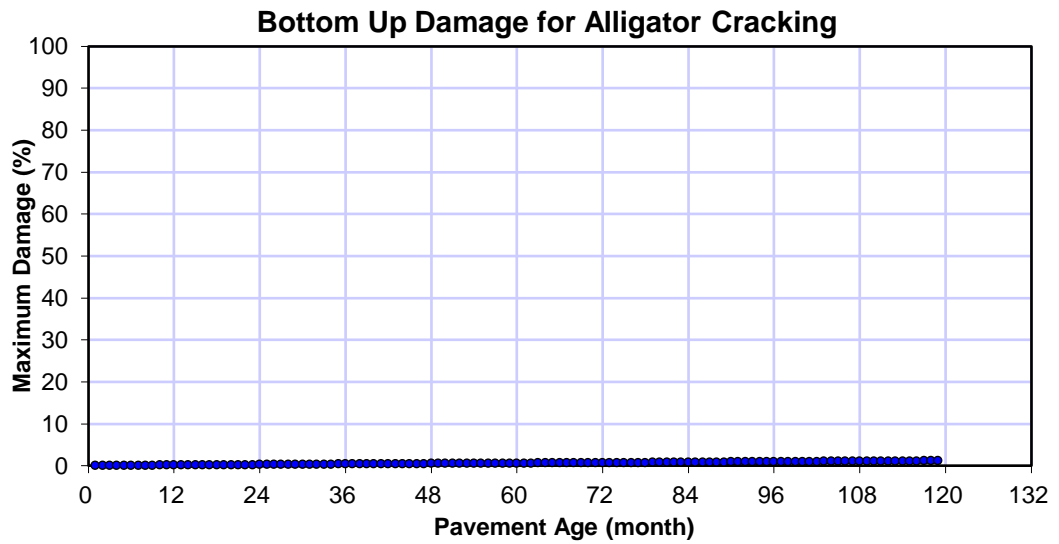


Figura 6.46 Agrietamiento de abajo hacia arriba, daño máximo Vs tiempo

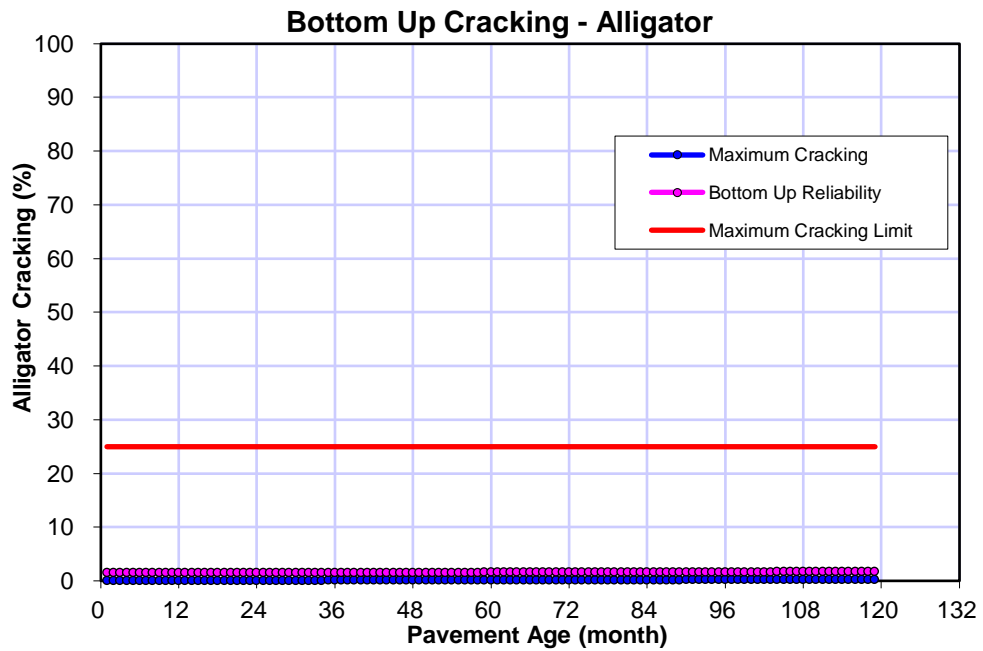


Figura 6.47 Agrietamiento de abajo hacia arriba, agrietamiento piel de cocodrilo Vs tiempo

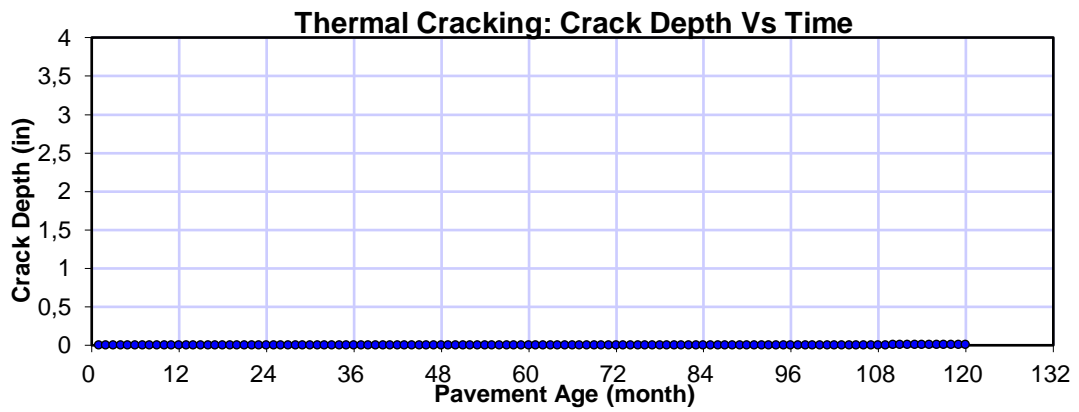


Figura 6.48 Agrietamiento térmico, profundidad de la grieta Vs tiempo

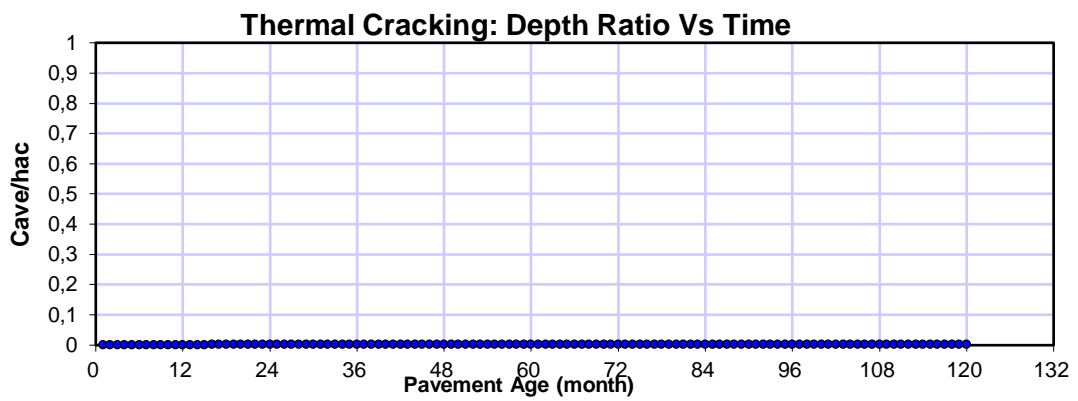


Figura 6.49 Agrietamiento térmico, relación de profundidades Vs tiempo

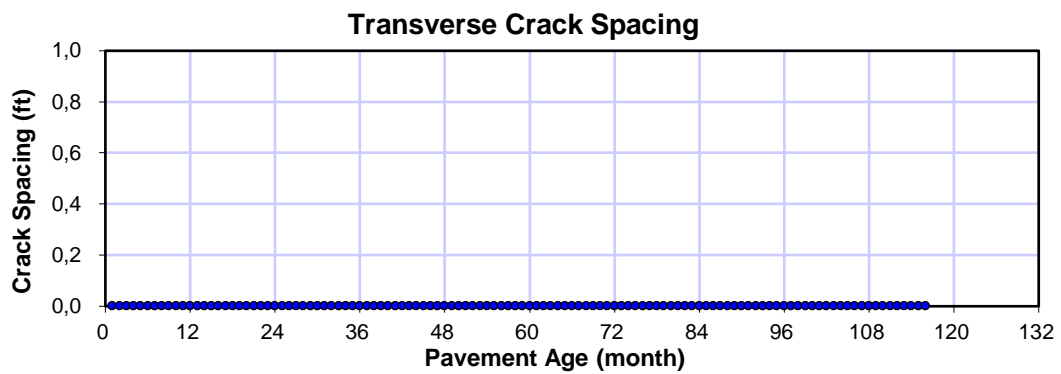


Figura 6.50 Espaciamiento de la grieta transversal, espaciamiento de la grieta Vs tiempo

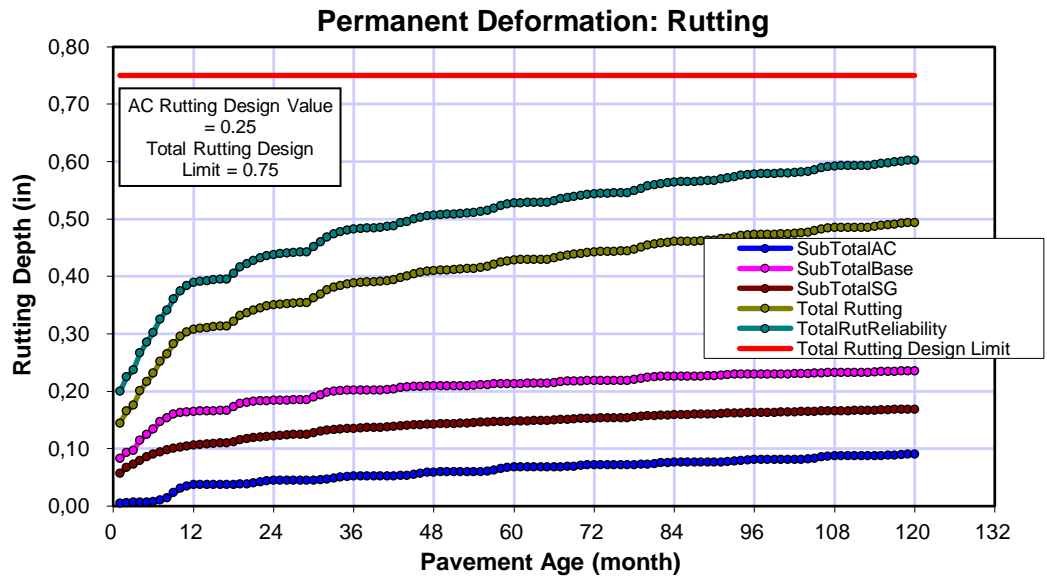


Figura 6.51 Deformación permanente en la carpeta asfáltica, profundidad de la carpeta Vs tiempo

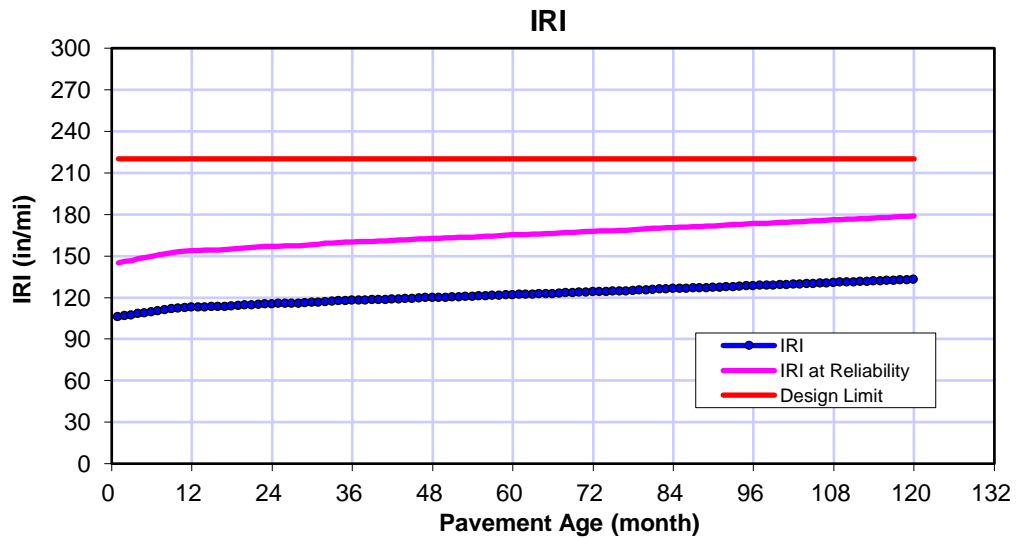


Figura 6.52 Índice de regularidad internacional, IRI Vs tiempo



7. CONCLUSIONES

- Hacer parte de un grupo de trabajo fortalece los conocimientos aprendidos durante el transcurso de la carrera, ya que otras personas pueden aportar nuevos conocimientos que hacen crecer profesionalmente.
- Es realmente importante que cuando se recopile información climática y se haga el procesamiento de la misma, se organice en formatos que permitan visualizarla y entenderla de forma más rápida y mantener un orden de ideas a desarrollar, ya que suele suceder que la información es extensa y podría tenderse a mezclar información y no hacer un adecuado procesamiento de los datos.
- La información bibliográfica es de gran ayuda para cuando los temas a desarrollar no están netamente claros, leer es realmente enriquecedor para cualquier persona y permite aclarar tus conceptos acerca del tema que se esté desarrollando.
- El clima es una variable de significativa importancia a la hora de pre-dimensionar una estructura de pavimento, puesto que sus factores más incidentes como lo son la temperatura del aire y la acción del agua, son factores que afectan directamente el comportamiento de la estructura durante su periodo de vida útil, ocasionando agrietamientos en la carpeta asfáltica, (acción de la temperatura y el tráfico), y cambios bruscos de humedad en la subrasante produciendo pérdida de resistencia, expansiones y deformabilidad en la misma.
- Es importante que cuando se procesen datos se haga un análisis de comparación con otras metodologías y se escoja la que mejor se acomode a las condiciones del proyecto o su resultado sea lógico y consecuente con registros existentes.
- El manejo de programas es de gran ayuda para automatizar todos los procesos de diseño, sin embargo se deben tener los mínimos conceptos en el área de pavimentos para hacer un adecuado uso del programa.
- El software de la guía M-EPDG, es una herramienta muy útil que ayuda a predecir el deterioro y comportamiento del pavimento durante su tiempo en servicio, de manera que se puede tener un alto nivel de confianza para decir que el diseño o pre-dimensionamiento de la estructura del pavimento es viable o no.



8. BIBLIOGRAFIA

AASHTO Guide for design of pavement structures. American Association of State Highways and Transportation Officials, 1993.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Crop evapotranspiration. *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.*

ARA Inc. (2004) Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, NCHRP report 1-37A, Champaign.

Atlas climatológico de Colombia, pagina web:

http://bart.ideam.gov.co/portal/prono_fin_semana/meteorologia/

Benavides, C.A. 1993. "Factores que inciden en la vida de los pavimentos, condiciones ambientales y efectos del tránsito". Primer seminario regional del programa de mantenimiento vial (PROVIAL) para los países del grupo Andino y Panamá.

Herb, William; Marasteanu, Mihai; Stefan, Heinz G. (2006). Simulation and Characterization of Asphalt Pavement Temperatures. St. Anthony Falls Laboratory. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, <http://purl.umn.edu/113686>.

Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de Tránsito. República de Colombia, Instituto Nacional de Vías, 1997.

Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos Volúmenes de tránsito. República de Colombia, Instituto Nacional de Vías, 1998.

Manual de drenaje para carreteras, Instituto nacional de vías (INVIAS), Bogotá. 2015.



Perera, A. 2015. Determinación y análisis de los factores climáticos críticos para el diseño de pavimentos flexibles en costa rica. Tesis de grado para optar por el título de licenciada en Ingeniería Civil.

Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.*, 38, 55.

Transport Research Laboratory. (2001). Rational road drainage design for unbound pavements: Rational drainage of road pavements. Reino Unido. Recuperado el Agosto de 2014, de <http://www.transport-links.org>

Witczak, M.W., Zapata, C.E., Houston, W. N. (2006). NCHRP 1-40D FINAL REPORT: Models incorporated into the current enhanced integrated climatic model NCHRP 9-23 project findings and additional changes after version 0.7. NCHRP – Arizona State University.