

VARIACION ESTACIONARIA DE LAS MEDICIONES DE DEFLEXIONES DE
IMPACTO FWD EN EL TRAMO DE LA CARRERA 49 ENTRE CALLE 102 A
HASTA LA CALLE 105 A, EN LA CIUDAD DE BOGOTA

ANGÉLICA MARIA CASTAÑEDA RIVAS
ANDRES FELIPE SUAREZ DURANGO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2015

VARIACION ESTACIONARIA DE LAS MEDICIONES DE DEFLEXIONES DE
IMPACTO FWD EN EL TRAMO DE LA CARRERA 49 ENTRE CALLE 102 A
HASTA LA CALLE 105 A, EN LA CIUDAD DE BOGOTA

ANGÉLICA MARÍA CASTAÑEDA RIVAS
ANDRES FELIPE SUAREZ DURANGO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero(a) Civil

Asesor disciplinar: IC Camilo Herrera
Asesor Metodológico: Lic. Bibiana Carolina Gómez Salgado

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C

2015

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
GENERALIDADES	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
2. JUSTIFICACION	7
3. OBJETIVOS	9
3.1. OBJETIVO GENERAL	9
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	9
4. ANTECEDENTES	10
5. MARCO DE REFERENCIA.....	16
5.1. MARCO GEOGRÁFICO LOCALIDAD – SUBA	16
5.1.1. Reseña Historica	17
5.2. MARCO LEGAL	20
5.3. MARCO CONCEPTUAL	22
5.3.1. Concepto de Deflexión	22
5.3.2. Método No Destructivo.....	22
5.3.3. Carga de Impacto.....	23
5.3.4. Temperatura.....	24
5.3.5. Humedad	24
5.3.6. Tiempo de Carga	24
5.3.7. Cuenco de Deflexión	25
5.3.8. Metodología Asstho	27
6. DISEÑO METODOLOGICO.....	29
6.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	29
6.2. Enfoque DE LA INVESTIGACION.....	29
6.3. DISEÑO metodológico	29
6.4. instrumentos.....	31
6.4.1. Deflectómetro de Impacto.....	31
6.4.2. Georadar	33
7. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	36

7.1	DATOS MEDICIÓN DE LA DEFLEXIÓN	36
7.2	ESPEORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	36
7.3	PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS CON FWD	38
7.4	VARIACIÓN DE LA DEFLEXION.....	39
7.5	CÁLCULO DE LAS VARIABLES ESTRUCTURALES, EXISTENTE.....	43
7.6	INDICADORES AMBIENTALES	51
7.7	ANALIZAR LA VARIACIÓN EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO, CON EL ANÁLISIS PREVIO DE LAS VARIABLES ESTRUCTURALES, LA VARIACIÓN EN LA DEFLECTOMETRIA Y LAS PRECIPITACIONES CON RESPECTO A LAS DISTINTAS ÉPOCAS DEL AÑO.	53
7.8	MODELAR Y COMPARAR LA CUENCA DE DEFLEXIÓN DINAMICA Y ESTATICA.	73
8.	CONCLUSIONES	80
9.	BIBLIOGRAFIA	83
	ANEXOS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resultados de módulo resiliente obtenidos por retrocálculo y laboratorio para un material de base granular	13
Figura 2. Ubicación del tramo objeto de estudio	16
Figura 3. Fotografía de vía existente	17
Figura 4. Esquema de Cuenco de deflexión	23
Figura 5. Cuenco de deflexiones bajo la aplicación de la carga.	31
Figura 6 Esquema de Funcionamiento del deflectómetro de impacto	32
Figura 7. Georradar: Remolque y Antena	34
Figura 8. Ejemplo de Radagrama – Antena de Baja Frecuencia	34
Figura 9. Ejemplo de Radagrama – Antena de Alta Frecuencia	35
Figura 10. Espesores de Capa Georradar – Carril derecho.....	37
Figura 11. Espesores de Capa Georradar – Carril Izquierdo	37
Figura 12. Deflexión central carril derecho Pr 0+000 hasta Pr 0+440.....	41
Figura 13. Deflexión central carril izquierdo Pr 0+010 hasta Pr 0+430	42
Figura 14. Mr carril derecho.....	45
Figura 15. Mr carril izquierdo.	46
Figura 16. Módulo Equivalente del Pavimento carril derecho	48
Figura 17. Módulo Equivalente del Pavimento carril izquierdo	48
Figura 18. Numero estructura efectivo (SNef) del Pavimento carril derecho	50
Figura 19. Numero estructura efectivo (SNef) del Pavimento carril izquierdo.....	50
Figura 20. Estaciones meteorológica.....	51
Figura 21. Ubicación estación meteorológica de Suba	51
Figura 22. Precipitaciones Climatológicas Estación Las Villas Año 2014	52

Figura 23. Precipitaciones Climatológicas Estación Las Villas Año 2015	52
Figura 24. Deflexión Corregida D0 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.	53
Figura 25. Deflexión Corregida D0 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	54
Figura 26. Deflexión Corregida D1 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.	54
Fuente. Autor Figura 27. Deflexión Corregida D1 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	54
Figura 28. Deflexión Corregida D2 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.	55
Figura 29. Deflexión Corregida D2 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	56
Figura 30. Deflexión Corregida D3 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.	56
Figura 31. Deflexión Corregida D3 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	57
Figura 32. Deflexión Corregida D4 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.	57
Figura 33. Deflexión Corregida D4 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	58
Figura 34. Deflexión Corregida D5 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.	58
Figura 35. Deflexión Corregida D5 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	59
Figura 36. Deflexión Corregida D6 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.	59
Figura 37. Deflexión Corregida D6 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	60

Figura 38. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.....	61
Figura 39. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Derecho.	61
Figura 40. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Derecho.	62
Figura 41. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Derecho.	62
Figura 42. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.....	63
Figura 43. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Derecho.	63
Figura 44. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Derecho.	64
Figura 45. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Derecho.	64
Figura 46. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.....	65
Figura 47. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Derecho.	65
Figura 48. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Derecho.	66
Figura 49. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Derecho.	66
Figura 50. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	67
Figura 51. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	67
Figura 52. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.	68

Figura 53. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	68
Figura 54. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	69
Figura 55. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	69
Figura 56. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	70
Figura 57. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	70
Figura 58. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	71
Figura 59. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	71
Figura 60. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	72
Figura 61. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.....	72
Figura 62. Historial Tiempo - Deflexiones de los Geófonos	73
Figura 63. Muestra tomada para el análisis de las deflexiones.	74
Figura 64. Determinación del % de deflexión para los Geófonos con respecto a D0.	75
Figura 65. Deflexiones Máximas vs Distancia entre Geófonos.....	77
Figura 66. Deflexiones con el factor de % vs distancia entre Geófonos.....	78
Figura 67. Comparativo Variable Estructural Snef	79
Figura 68. Comparativo Variables Estructurales Mr - Ep	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aspectos generales en la Zona de estudio.	17
Tabla 2. Fases de la Investigación.....	29
Tabla 3. Parámetros empleados para la Evaluación Deflectométrica Cualitativa. .	38
Tabla 4. Parámetros Evaluación Deflectométrica Cualitativa	39
Tabla 5. Deflexiones (μm) Noviembre de 2014 Carril Derecho.....	75
Tabla 6. Deflexiones (μm) Noviembre de 2014 Carril Derecho.....	75
Tabla 7. Deflexiones Máximas (μm) Noviembre de 2014 Carril Derecho.	76
Tabla 8. Nuevas deflexiones D0 – D2 – D6.	77
Tabla 9. Variables estructurales para el mes de Noviembre.....	78
Tabla 10. Variables estructurales para el mes de Noviembre con el factor de % determinado.	78

INTRODUCCIÓN

El deflectómetro de impacto FWD es un equipo que permite estimar mediante un impacto sobre la superficie del pavimento y utilizando un retro análisis la capacidad que posee un pavimento de soportar cargas, esto simulando las condiciones de esfuerzo generadas por los vehículos, el equipo está equipado con una tecnología de vanguardia y así por medio de las lecturas generadas por sus sismómetros, determina el cuenco de deflexión de un pavimento en determinado punto.

Por ejemplo en pavimentos flexibles, es posible estimar el módulo resiliente de las diferentes capas que posee el pavimento de estudio y así mismo al aplicar la metodología de retro análisis propuesta en la Guía de Diseño AASHTO 2008, es posible estimar también el número estructural (SN), lo anterior busca minimizar tiempo, costos y así mismo reduciendo los procedimientos destructivos que impliquen la intervención de la vía y la extracción de muestras en campo.

Esta Investigación buscó presentar los resultados con base a la metodología de medición, análisis e interpretación de las deflexiones para la evaluación estructural de pavimentos y establecer las afectaciones que presentan en relación con la variación estacionaria. Se describirán los modelos matemáticos para pavimentos en que se sustenta la metodología propuesta; seguidamente se explican en forma detallada el método y procedimiento para la medición de deflexiones con el deflectómetro conocido como "(FWD, Falling Weight Deflectometer) ", haciendo hincapié en la medición de las "curvas de deflexiones".

Se presentarán método para el análisis de las deflexiones; este método de análisis son simplificaciones y aproximaciones matemáticas de las soluciones rigurosas del Modelo de Hogg y otros conceptos de la teoría de elasticidad y resistencia de

materiales, que permiten el procesamiento rápido y simple de los datos en forma manual o por computadora personal para obtener los parámetros de evaluación. Estos parámetros de evaluación estarán presentados, y su significado discutido, al final de dicha investigación

GENERALIDADES

NOMBRE DEL PROYECTO:

Variación estacionaria de las mediciones de deflexiones de impacto FWD en el tramo de la carrera 49 entre calle 102 a hasta la calle 105 a, en la ciudad de Bogotá.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Vías y Geotecnia

SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Pavimentos

ASESOR DISCIPLINAR

MIG. Ing. Camilo Herrera Cano. Candidato a Doctor.

ASESOR METODOLÓGICO

Ms. Lic. Bibiana Gomez

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C - CUNDINAMARCA

2015

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las evaluaciones estructurales que se realizan actualmente en el país con mediciones de deflexiones de impacto (FWD, Falling Weight Deflectometer), se han detectado variaciones significativas de las variables estructurales por factores climatológicos corroborándolo en el Structural Number SN (número abstracto que expresa la resistencia estructural requerida del pavimento para un soporte de suelo, de acuerdo al método ASSHTO 93).

La empresa colombiana INGENIERIA Y GESTIÓN VIAL GEVIAL SAS es una empresa consultora de ingeniería, especializada en los estudios y diseños, diagnósticos, asesorías, sistemas de gestión e interventoría de carreteras, puertos y aeropuertos., a lo largo de su trayectoria ha realizado actividad de medición deflectométrica, en la cual ha encontrado cambios importantes en la deflexiones halladas debido a los cambios del clima.

Por lo anterior, esta investigación se realizó con su asesoría, con el fin de verificar la variación de estos datos teniendo en cuenta los cambios climáticos en nuestra ciudad.

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función (como por ejemplo, un nuevo tipo de avión existente en un aeropuerto)¹.

¹ HOFFMAN, Mario S. y DEL AGUILA, Pablo M. Estudios de Evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos): Ingenieros Consultores, 1085.p 2

Una problemática importante de un gran número de las vías con cierto volumen de tránsito se relaciona con la baja calidad funcional y estructural de sus pavimentos o superficies de rodado, los cuales otorgan bajos niveles de superficialidad y baja durabilidad².

Este problema se relaciona en gran medida con la limitación de recursos de inversión para mejorar los estándares de las vías a los cuales, no se le ha venido realizando algún tipo de seguimiento que evite oportunamente un deterioro avanzado que genere altos costos y que conlleve a importantes limitaciones funcionales como movilidad, accesibilidad, seguridad y altos costos operacionales³.

Las necesidades de evaluar estructuralmente los pavimentos de una red aumentan a medida que se completa el diseño y la construcción de una red vial nacional o regional y consecuentemente aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación.

La variación estacional de módulos para una estructura de pavimento se debe a cambios en el contenido de humedad de las capas granulares y suelos, por lo tanto se espera que aquellas estructuras que son sometidas a cambios más marcados de humedad presenten las variaciones más significativas. Por el contrario, zonas donde no existen cambios importantes en la humedad, no presentarán cambios importantes. Esta variación estacional de módulos se verá reflejada, con las deflexiones medidas por el equipo utilizado para valorar la capacidad estructural, llamado deflectómetro de impacto (FWD)⁴.

² THENOUX Z, Guillermo, HALLES A, Felipe y GONZÁLEZ V, Álvaro. Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Centro de Ingeniería e Investigación vial, DICTUC S.A, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2002.p.1

³Ibíd.,p. 11

⁴ BADILLA VARGAS, Gustavo y SIBAJA OBANDO, Denia. Análisis de la respuesta estructural de pavimentos mediante deflectometría de impacto (fwd) en diferentes épocas del año en Costa Rica, 2010.p.178. San José de Costa Rica.

Es conveniente realizar este tipo de investigación, en una vía de bajo flujo vehicular (vía terciaria), ya que lo que se pretende, es demostrar la variación deflectométrica debido a los continuos cambios del clima.

Se realizó este estudio en calle 102 A con carrera 49 hasta la calle 105 A con carrera 49 en la ciudad de Bogotá, Barrio Pasadena localidad de Suba, ya que es un vía terciaria donde el tránsito vehicular es demasiado bajo, ya que el objetivo de este trabajo es determinar la variación en la deflexiones por el cambio climático y no a causa del tránsito vehicular que pasa por la zona.

¿Cuál es la variación estacionaria de las mediciones de deflexiones de impacto FWD en el tramo comprendido de la carrera 49 entre calles 102A hasta la calle 105A, en la ciudad de Bogotá?

2. JUSTIFICACION

En la Ciudad de Bogotá, no se ha realizado una investigación que determine como afecta la variación de las condiciones climáticas a las estructuras de pavimentos existentes, son muy pocos los métodos que tienen en cuenta algún aspecto del factor clima, por la dificultad de estimar cuantitativamente su influencia.

El valorar una infraestructura vial en función de las deflexiones que experimentan los pavimentos, permite determinar con anticipación acciones destinadas a impedir que se presenten fallas que obstaculicen su buen funcionamiento o en caso de que estas fallas ya estén presentes, poder determinar su grado de afectación y las acciones a seguir para garantizar su conservación

La alternativa presentada en esta investigación es no destructiva y se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento. Las deflexiones en la superficie de un pavimento reflejan una respuesta global del sistema pavimento-subrasante bajo una carga dada, su medición es simple, rápida, económica y al ser no destructiva, no altera el equilibrio ni la integridad del sistema.

La curva de deflexiones encierra una valiosa información acerca de las características estructurales del pavimento y su subrasante. Para interpretar esta información en forma cuantitativa, se compara al pavimento-subrasante reales con un modelo matemático utilizando las deflexiones medidas para determinar los parámetros estructurales del sistema. Una vez determinados, estos parámetros estructurales, puede usarse como insumo para establecer las necesidades de refuerzo⁵.

⁵ HOFFMAN, Mario S. y DEL AGUILA, Pablo M. Estudios de Evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos): Ingenieros Consultores, 1085.p 2

Podría determinarse que la metodología de evaluación estructural, por métodos no destructivos, es un proceso de diseño inverso ya que utiliza la respuesta del sistema para establecer sus características estructurales, lo cual es generalmente opuesto a un proceso de diseño.

Lo que pretende esta investigación fue validar el comportamiento de dichas deflexiones a partir de las condiciones climáticas estacionarias de la ciudad de Bogotá, y así poder verificar los resultados con las distintas variables climatológicas.

Al determinar la variación deflectométrica en la presente investigación, se verificó la afectación ocasionada por el contenido de humedad de las capas granulares y suelos las cuales presentaron variaciones significativas en nuestras estructuras y más aún cuando se han presentado variaciones en el clima, tan relevantes como en los últimos meses.

Por otra parte, el valorar una estructura de pavimento mediante este método nos permitió identificar la capacidad de soporte en cada una de las capas de la estructura y/o en la subrasante y obtener el módulo de las diferentes capas, así como también determinar el tipo de intervenciones que se pueden ir realizando en nuestras estructuras.

3. OBJETIVOS

3.1.OBJETIVO GENERAL

Determinar la variación estacionaria de las mediciones de deflexiones de impacto FWD en el tramo comprendido desde la carrera 49 entre calle 102A hasta la calle 105A en la ciudad de Bogotá.

3.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer la capacidad estructural del pavimento en distintas épocas del año.
- Describir los resultados de la deflectometría y cálculo de las variables estructurales, existentes.
- Analizar la variación en la respuesta estructural del pavimento, medido en FWD con respecto a las distintas épocas del año.
- Modelar y Comparar la Cuenca de Deflexión Dinámica y Estática

4. ANTECEDENTES

Para esta investigación se realizó una revisión sobre estudios previamente desarrollados en el tema de Análisis de resultados de deflectometría de impacto (FWD) en las evaluaciones realizadas a las estructuras de pavimentos a nivel Internacional y Nacional que permitió fundamentar esta investigación.

La investigación realizada por la unidad de investigación de infraestructura vial de la Universidad de Costa Rica la cual estuvieron a cargo los Ingenieros Gustavo Badilla Vargas y Denia Sibaja Obando en la cual buscaban cuantificar la variación en la respuesta estructural del pavimento, está midiéndola por medio del Deflectómetro de Impacto (FWD); con respecto a la época del año en la que se realiza el ensayo a través de un análisis estadístico, en la cual se obtuvo que en el caso de los pavimentos con estructura robusta no presentan variación deflectométrica en diferentes estaciones de exposición, además, en la zona de la región del valle central si presentó variación deflectométrica significativa en su época seca comparándola con la época lluviosa⁶.

La investigación realizada por los ingenieros Mario S. Hoffman, Ph.D. Louis Berger Internacional Inc. y Pablo M. del Águila, en Octubre de 1985, Estudios de Evaluación Estructural de Pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos), presenta una metodología simple para la evaluación estructural de pavimentos basada en la interpretación de curvas de deflexiones, la cual es ilustrada con datos obtenidos durante la supervisión de la Carretera Talaracancas⁷.

⁶ BADILLA VARGAS, Gustavo y SIBAJA OBANDO, Denia. Análisis de la respuesta estructural de pavimentos mediante deflectometría de impacto (fwd) en diferentes épocas del año en Costa Rica, 2010.p.178. San José de Costa Rica

⁷ HOFFMAN, Mario S. y DEL AGUILA, Pablo M. Estudios de Evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos): Ingenieros Consultores, 1085.p 2.

Esta metodología fue desarrollada e implementada en numerosos proyectos en diversos países por Louis Berger International, Inc, presentando la metodología empleada para medir las deflexiones en la superficie del pavimento utilizando una “Viga de Benkelman”. Este modelo es más conocido como el “Modelo de Hogg” el cual constituye la base matemática de la metodología.

Existen metodologías muy bien definidas para obtener las llamadas cuencas de deformación conforme cada necesidad de información; en el presente reporte se hará énfasis a los pavimentos de concreto asfáltico, a la vez que se incluyen recomendaciones para diferentes tipos de pavimento. Es importante destacar que así como hay diversos equipos para medir deflexiones, es aún mayor el número de procedimientos para el análisis y procesamiento de los datos provenientes de tales equipos. Dichos programas calculan los módulos en cada una de las diferentes capas del pavimento evaluado mediante herramientas matemáticas diversas, y consideraciones en sus modelos igualmente variados⁸.

De igual forma la investigación realizada por el Ingeniero Civil Claudio Fuentes y su grupo de trabajo con el apoyo de la compañía Gauss S.A de Chile, “Uso del deflectómetro de impacto FWD en la prospección de suelos “ se realizaron los diferentes ensayos sobre capas granulares y de tierra donde los diseños no presentan mayor diferencia si se realizan por el método de CBR o por deflectometría, además se comprobó que la información recopilada por la técnica de deflectometría de impacto, FWD, sobre capas de rodadura granular y suelos generan resultados óptimos y trabajables para un adecuado desempeño.

⁸ PEREZ SALAZAR, Alfonso. GARNICA ANGUAS. Paul. GOMÉZ LÓPEZ, José Antonio. y MARTINEZ PEÑA, Guadalupe Evangelina. Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos. Publicación Técnica No. 252, Sanfandila, Qro, 2004.

Por otra parte, la deflectometría de impacto, FWD, es una técnica que se está aplicando desde hace varios años, al igual que en todo el mundo, se ha usado principalmente en la prospección de pavimentos existentes con capas de rodadura tanto asfáltica como de hormigón. Esta técnica permite estimar, mediante un análisis, tanto la capacidad de soporte del suelo de fundación como la capacidad estructural del pavimento. En particular, para los pavimentos flexibles, es posible estimar el módulo resiliente del suelo de fundación, el módulo de la base granular y el módulo de la mezcla asfáltica⁹. Al aplicar la metodología de análisis propuesta en la Guía de Diseño AASHTO 1993, es posible estimar también el número estructural.

El Ingeniero Civil, Mario Helberto Leal Noriega de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2010, en su tesis “Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio” asocia como factor incidente en las mediciones de deflexión principalmente el parámetro de la temperatura, el cual afecta la rigidez de la carpeta asfáltica¹⁰. (Ver Anexo 1)

Debido a esta variabilidad, se hace necesario realizar una corrección para conocer la temperatura efectiva del pavimento al momento del ensayo determinando como las deflexiones variaban de acuerdo a la hora de la toma de muestras; Para cumplir con el objetivo se desarrollaron pruebas de campo con deflectómetro de impacto, así como ensayos de módulo resiliente y módulo dinámico en laboratorio, sobre materiales granulares y de mezcla asfáltica respectivamente.

Los ensayos deflectométricos se llevaron a cabo sobre un pavimento flexible a lo largo de ocho puntos de control, en los cuales se midieron las deflexiones

⁹ ANGARITA MUÑOZ, Jesús Eduardo. GAKVAN BACCA, Yankilmer. GÓMEZ, Emma Johana. BLANCO CARRASCAL, Priscila y ÁLVAREZ CAYES, Yeraldine. Deflectómetro de Impacto (FWD), Universidad Francisco de Paula Santander. 2013. P

¹⁰ LEAL NORIEGA, Mario Helberto. Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. 2010.p 31

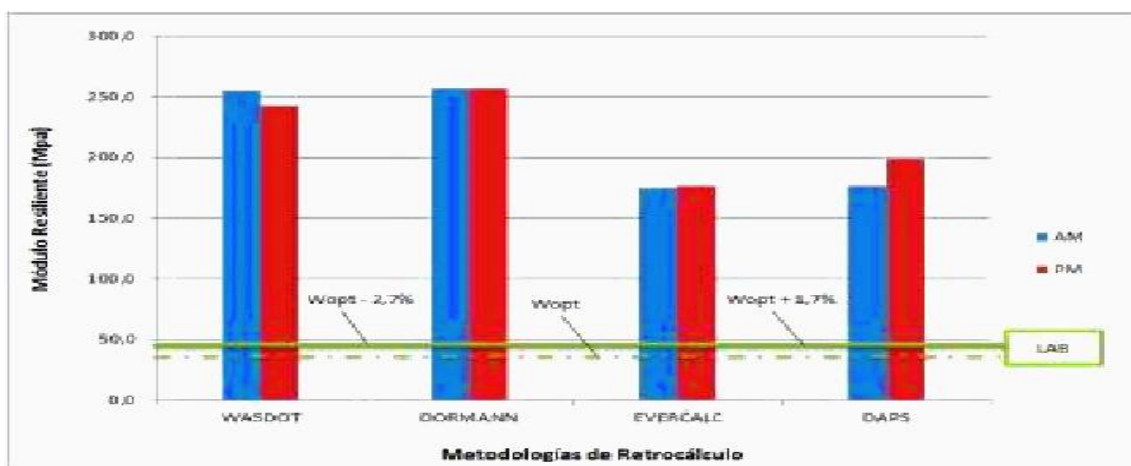
generadas por la aplicación de un impacto superficial. Los resultados de deflexión obtenidos fueron empleados en diferentes metodologías de retrocálculo que permitieron determinar los módulos de cada una de las capas que conforman la estructura de pavimento.

En laboratorio se desarrollaron un total de doce ensayos de módulo resiliente sobre cuatro diferentes materiales: base, subbase, base granular y subrasante granular, a tres diferentes contenidos de humedad en cada uno; así como dos ensayos de módulo dinámico sobre dos diferentes tipos de mezclas asfálticas.

Los valores de los módulos resilientes obtenidos por cada uno de los ensayos (ensayos de laboratorio y procedimientos de retrocálculo) se comparan entre sí para determinar los componentes verticales y horizontales que actúan en cada capa considerando el efecto de los esfuerzos geostáticos, más el incremento de esfuerzos por efecto de la carga transmitida por un eje equivalente de 8,2 ton empleado en el diseño de la estructura de pavimento, por ejemplo:

Resultados de módulo resiliente obtenidos por retrocálculo y laboratorio para un material de base granular.

Figura 1. Resultados de módulo resiliente obtenidos por retrocálculo y laboratorio para un material de base granular



Fuente. LEAL NORIEGA, Mario Helberto. Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. 2010

La grafica anterior muestra como los valores de módulo obtenidos por retrocálculo se encuentran dentro de un rango aceptable para este tipo de materiales, comparados con los resultados hallados en laboratorio, los cuales se sitúan en un rango inferior; otorgando unas diferencias entre ambos módulos por encima del 75%. Esto genera que los valores de ajuste varíen si se compara con los otros materiales de estudio.

Con lo anterior y tomando toda la información correspondiente y realizando su respectivo análisis la investigación obtuvo que:

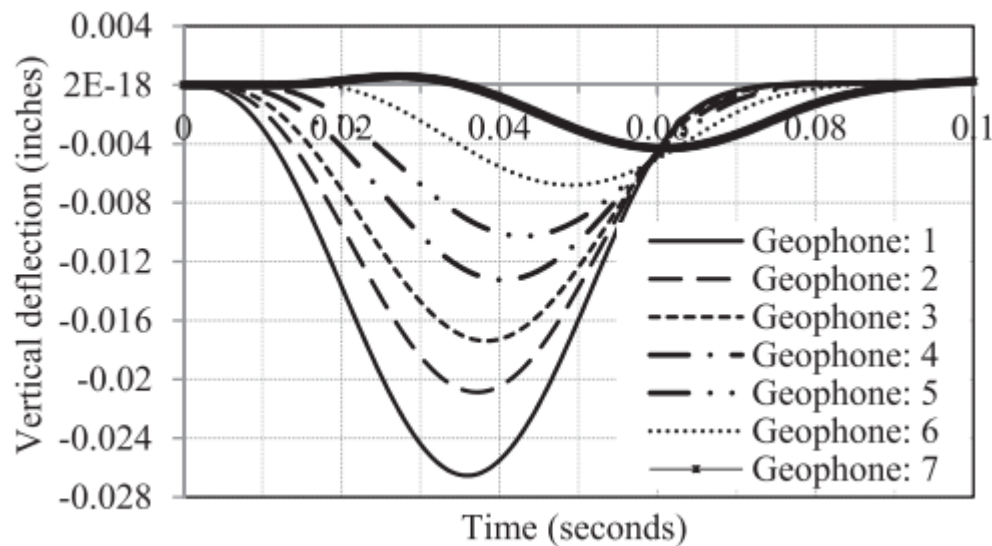
- Por medio del deflectometro la temperatura de la carpeta asfáltica no presenta variación predominante en los módulos resilientes de los materiales granulares utilizando metodologías de retrocalculo.
- Recomienda utilizar los factores de ajuste con cautela para evitar subdiseños o sobrediseños.
- Se corrobora que el método por retrocalculo arroja valores más altos que los ensayos de laboratorio.
- Si el contenido de humedad es menor a la óptima los factores de ajuste se incrementan.
- Se permite observar que los factores de ajuste que relacionan el módulo resiliente de laboratorio con el retrocalculado poseen una dependencia inversa con el contenido de humedad para materiales granulares, y son cercanos a 1,0 cuando la temperatura ambiente disminuye para mezclas asfálticas.

El autor recomienda que para próximas investigaciones se analice la variación deflectometrica en diferentes épocas del año y así establecer la influencia del cambio climático sobre la estructura del pavimento.¹¹

En China se realizó un artículo con el análisis de elementos finitos del pavimento aeroportuario bajo la prueba FWD teniendo en cuenta la carga y la plasticidad dinámica de los materiales. El análisis que aquí se presenta incluye el

¹¹ Ibid. Pag 31

comportamiento elastoplástico de los materiales de las diferentes capas del pavimento. Ambos modelos se han desarrollado en ABAQUS. Los datos en Tiempo-deflexión se simulan para que coincida con los datos de prueba FWD. Se hace una comparación entre las cuencas de deflexión dinámica, estática y de campo como lo muestra la figura siguiente. Los resultados del análisis muestran que el tiempo de desviación está en estrecho acuerdo con los datos de campo. El modelo asimétrico da mejores resultados que el modelo Cuarto de cubo. Las deflexiones del análisis estático son mayores que el análisis dinámico de un conjunto idéntico de los módulos de capa de elasticidad. Una distribución uniforme de la tensión se observa a partir del análisis estático en ambas de las geometrías. Sin embargo, el análisis dinámico no muestra distribución similar debido a la respuesta dependiente del tiempo¹².



¹² XIAO,Chuan, QIU Yan-jun, ZENG Jie, LI Bao-xian. Measured Dynamic Response of Asphalt Pavement under FWD Load. En: Journal of Highway and Transportation Research and Development Vol.8. No.4 (2014) 001.

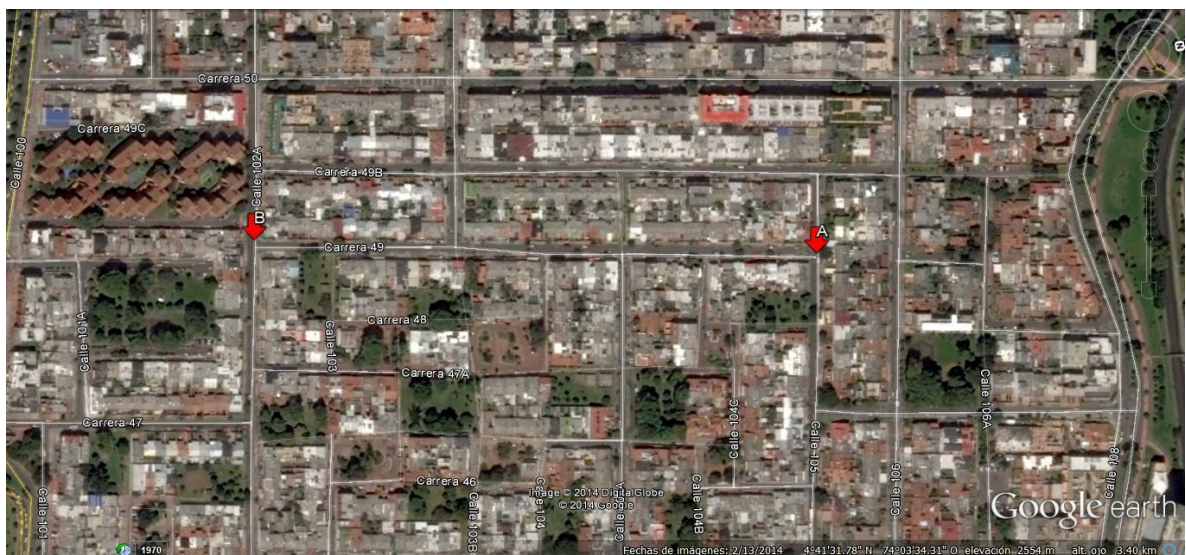
5. MARCO DE REFERENCIA

5.1. MARCO GEOGRÁFICO LOCALIDAD – SUBA

Suba es la localidad número 11 de la ciudad, se encuentra ubicada al noroccidente de la ciudad y es la cuarta localidad más extensa de la capital, con 10.056 hectáreas después de Sumapaz, Usme y Ciudad Bolívar, respectivamente.

Limita al Norte con el municipio de Chía; al Sur con la localidad de Engativá; al Oriente con la localidad de Usaquén y al Occidente con el municipio de Cota. Está compuesta por 12 UPZ: La Academia, Guaymaral, San José de Bavaria, Britalia, El Prado, La Alambra, Casa Blanca Suba, Niza, La Floresta, Suba, El Rincón y Tibabuyes y 1 UPR Chorrillos13.

Figura 2. Ubicación del tramo objeto de estudio



Fuente. Google Earth.

¹³ <http://www.bogotacomovamos.org/localidades/suba/> Octubre 10 de 2015

Figura 3. Fotografía de vía existente



Fuente Propia.

5.1.1. Reseña Historica

Tabla 1. Aspectos generales en la Zona de estudio.

BARRIO	PASADENA	
UPZ No.	UPZ 20 – LA ALHAMBRA	
POBLACION	100.000 personas	
LIMITES	NORTE	SUR

BARRIO	PASADENA	
UPZ No.	UPZ 20 – LA ALHAMBRA	
	Río Molinos, Calle 108 y barrio La Alhambra	Calle 100 y barrio La Castellana
	ESTE	OESTE
	Carrera 49 y barrio Santa Margarita	Carrera 53 y barrio Puente Largo
ESTRATO	5 (CINCO)	
TIPO DE VIVIENDA	80% De la población vive en propiedad horizontal.	
ACTIVIDAD ECONOMICA	Gran cantidad de empresas y comercio, además se rodea de centro comercial Romí, Los tres elefantes y Auros copias	
INFRAESTRUCTURA PUBLICA SOCIAL	Dos parques Hogar Infantil Mariposas, otros dos jardines infantiles de carácter privado.	
SERVICIOS PUBLICOS	Cobertura del 100% en todos los servicios	
INFRAESTRUCTURA VIAL	MALLA VIAL LOCAL	ACEPTABLE
	MALLA VIAL INTERMEDIA	REGULAR/MALA
SERVICIO DE TRANSPORTE PUBLICO	Se cuenta con el servicio por la calle 100, la Autopista y la carrera 53	
PROBLEMAS Y NECESIDADES	Las salidas del barrio son pocas y todas ellas permanecen embotelladas.	
PROYECTO	Pavimentación de las carreras 53 y 51	

BARRIO	PASADENA
UPZ No.	UPZ 20 – LA ALHAMBRA
IMPORTANTE	
CONSTRUCCIONES DE REGIMEN DE PROPIEDAD HORIZONTAL	Existen 101 edificios de propiedad horizontal aproximadamente

Fuente: ZORNOSA PRIETO, Carlos Felipe .Reseña Histórica, Editor del periódico "Pasadena mi Barrio". Abril 2013.

5.2. MARCO LEGAL

En este marco se presentan los Decretos normas y leyes relacionadas al tema en estudio.

- **I.N.V.E.- 798 – 07. Método para medir deflexiones mediante deflectómetro de impacto (FWD).** Este método abarca medición de deflexiones en superficies pavimentadas o sin pavimentar con el FWD, describe la medición las deflexiones verticales de la respuesta de la superficie a un impulso de carga aplicado en la superficie del pavimento.

Los valores se deben expresar en unidades de SI y no se consideran problemas de seguridad asociados con su uso, es responsabilidad de quién lo emplee.

- **ASTM D4694 - 09 Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device.** Este método describe la medición de las deformaciones verticales de la superficie del pavimento, cuando se le aplica una carga.
- **NTC-5718 – Norma Técnica Colombiana. Método de ensayo para determinar las deformaciones con deflectómetros de impacto.** Método es la adopción idéntica de la ASTM D4694-09 aplicado a nuestro país.
- **Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras – Anexo C - Factores para el ajuste de las deflexiones de los pavimentos asfálticos por efecto de la temperatura.** Esta guía busca analizar algunas de las ecuaciones y gráficas de ajuste que aparecen en la bibliografía y establecer si la fórmula

que se ha tenido mayor aplicación en Colombia desde hace unos 25 años para corregir las deflexiones Benkelman por temperatura requiere alguna revaluación y, además, si ella resulta aplicable a la corrección de las deflexiones medidas con deflectómetros de impacto.

- **Metodología de Gustav Rohde.** Ecuación para el cálculo de una aproximación del número estructural efectivo.

- **Modelo Bells 3.** Modelo conocido que permite a partir de parámetros como la temperatura ambiente y la temperatura superficial, estimar la temperatura de la capa asfáltica.

5.3. MARCO CONCEPTUAL

5.3.1. Concepto de Deflexión

Las solicitaciones de carga inducen a la estructura de pavimento a un desplazamiento en sentido vertical en magnitudes muy pequeñas, generalmente del orden de centésimas o milésimas de milímetro. Este desplazamiento vertical es conocido con el nombre de deflexión. Cuando este desplazamiento vertical se presenta bajo una carga normalizada producto de la utilización de un equipo como el deflectómetro de impacto, sus resultados son útiles para poder interpretar el estado o condición estructural de un pavimento.

Las deflexiones pueden determinar el estado crítico existente en alguna de las capas interiores de la estructura de un pavimento, razón por la cual se podrá encontrar un pavimento con daños superficiales que presente bajas deflexiones y otro en buen estado con altas deflexiones.

Entre las deflexiones más utilizadas se encuentran: la deflexión máxima o valor máximo de desplazamiento vertical bajo la aplicación de la carga y el área del cuenco de deflexiones¹⁴.

Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo su aplicación, produciendo una deflexión máxima, sino que también se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de la carga, que se denomina cuenco de deflexión (ver Figura 4)¹⁵

5.3.2. Método No Destructivo

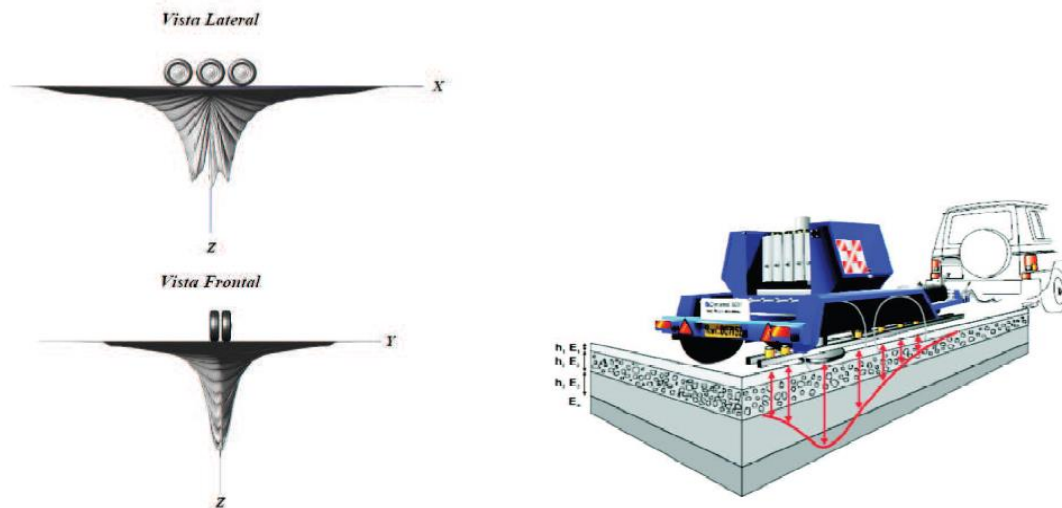
Los métodos de evaluación no destructivos se han venido implementando debido a que presentan ventajas importantes frente a otros métodos convencionales, entre las que se pueden mencionar: rapidez en su ejecución, confiabilidad en los datos recopilados, economía, no requieren toma o extracción de muestras para ensayos de laboratorio, las cargas que se utilizan simulan la acción de un vehículo en movimiento, entre otros¹⁶.

¹⁴ LEAL NORIEGA, Mario Helberto. Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. 2010.p 31

¹⁵ HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. 2009. P. 74

¹⁶ *Ibid*, p31

Figura 4. Esquema de Cuenco de deflexión



Fuente. C.H. Higuera Sandoval

5.3.3. Carga de Impacto

Se incluyen los equipos que entregan una carga de impacto transiente sobre el pavimento (Falling Weight Deflectometer, FWD). Variando el peso y la altura de caída se pueden generar diferentes cargas de impacto. La ventaja principal de estos equipos es su mecanismo de carga, ya que permite modelar bastante bien la magnitud como la duración de una carga real de tránsito¹⁷.

Los FWD aplican un impulso que simula medio seno, con un pick mínimo de fuerza de 50KN, con una duración de impulso de 20 a 60 milisegundos y un tiempo de caída de 10 a 30 milisegundos. Para realizar la medición de deflexiones se utiliza geófonos o transductores de velocidad (Dynatest) y sismómetros o una combinación de acelerómetros (KUAB).

¹⁷ DE SOLMINIHAC T. Henán. Gestión de Infraestructura vial. Ediciones Universidad Católica de Chile. Segunda Edición, Santiago de Chile, 2001. p. 147 a 150.

5.3.4. Temperatura

Es necesario normalizar las deflexiones de acuerdo a la temperatura en que se realizaron las mediciones. La importancia de ellos radica en que durante el transcurso de un ciclo diario las losas experimentan variaciones en las deflexiones por efecto de los cambios térmicos y la condición termo – sensible de los asfaltos, que afecta la magnitud de la deflexión de pavimento para las mismas condiciones de carga¹⁸.

En caso de los pavimentos asfálticos se han desarrollado métodos para corregir la deflexión máxima, las cuales se definen con normalización de deflexiones. Ellos se utilizan para tomar un valor de la deflexión obtenida en determinadas condiciones de carga y temperatura, al valor que correspondería a una temperatura de referencia. En Chile, para el caso de pavimentos asfálticos se han desarrollado expresiones que permiten corregir la deflexión a una temperatura de referencia de 20°C.

5.3.5. Humedad

La humedad puede afectar las mediciones de deflexiones debido a su influencia en las bases, subbases y subrasantes, ya que algunos materiales con los que se construyen están en terreno y pueden ser sensibles a su presencia. No hay posibilidad de saber la humedad de los estratos/capa, esta es una falencia de los métodos no destructivos porque el comportamiento mecánico de los suelos es dependiente del grado de saturación del mismo.

5.3.6. Tiempo de Carga

El efecto del tiempo de carga o la frecuencia con la que es aplicada, tiene una gran influencia en los valores obtenidos a partir de las mediciones, por ejemplo:

Materiales ligados con asfalto: Están fuertemente influenciados por el tiempo de carga debido a la naturaleza viscoelástica de este material. Este efecto se reduce a bajas temperaturas.

Materiales ligados con cemento: El módulo dinámico para materiales cementados puede ser de aproximadamente el doble del módulo estático si la

¹⁸ *Ibíd.* P. 30

frecuencia de carga es muy alta, este efecto se reduce a medida que el módulo aumenta.

Suelos Finos: Manifiestan rigidez mayor en respuesta a cargas dinámicas.

5.3.7. Cuenco de Deflexión

5.3.7.1. Medido Respuesta Dinámica de Pavimento Asfáltico bajo FWD carga

Para estudiar la verdadera regularidad respuesta dinámica de la estructura del pavimento de asfalto bajo carga dinámica, se llevó a cabo una prueba en carretera para los tres tipos de pavimento típico asfalto. Se establecieron las cuencas de deflexión estática y dinámica. Se estudiaron las características de las cuencas de deflexión.

Los resultados muestran que la cuenca deflexión estática es más profunda que la cuenca de deflexión dinámica, pero el rango de este último es mayor que el de la primera. Las características de las dos cuencas de deflexión difieren¹⁹.

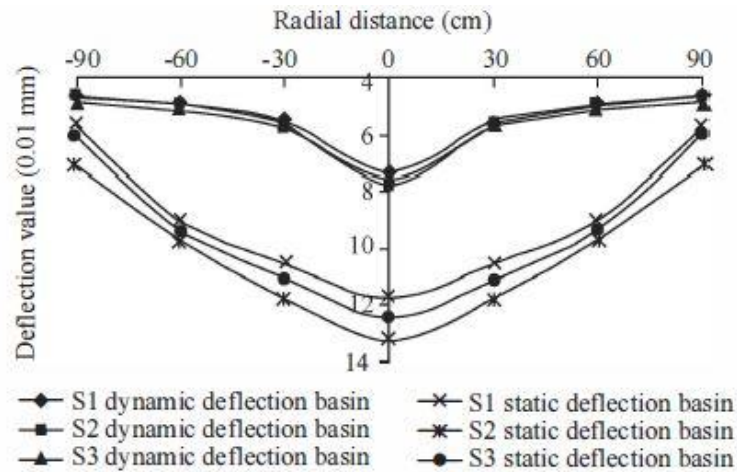
En el análisis comparativo de las cuencas de deflexión dinámica y estática no se considera la anisotropía de la estructura y la carga. Por lo tanto, la cuenca de deflexión fue considerado como un modelo centrosimétrica.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la cuenca de deflexión en base a la característica dinámica de la carga aplicada en la prueba FWD y el comportamiento elastoplástico de la capa de pavimento.

En la figura 4, se puede observar la gráfica que muestra los resultados de la cuenca de deflexión estática y dinámica, con una carga equivalente de 50 kN a 0 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm de distancia desde el punto del centro de carga, verificándose diferencias entre los cuencos de deflexión.

¹⁹ XIAO, Chuan, QIU Yan-jun, ZENG Jie, LI Bao-xian. Measured Dynamic Response of Asphalt Pavement under FWD Load. En: Journal of Highway and Transportation Research and Development Vol.8. No.4 (2014) 001.

Fig. 4 Comparación entre las cuencas de deflexión estática y dinámica



Fuente. XIAO, Chuan, QIU Yan-jun, ZENG Jie, LI Bao-xian. Measured Dynamic Response of Asphalt Pavement under FWD Load. En: Journal of Highway and Transportation Research and Development Vol.8. No.4 (2014) 001.

Las diferencias que se pueden observar son:

- La deflexión dinámica de diferentes estructuras de pavimento de asfalto era más pequeña que la deflexión estática.
- El valor de deflexión de cada punto de medición de la cuenca de deflexión dinámica y estática disminuye gradualmente con el aumento de la distancia radial.
- La disminuciones oscilan entre el 23.83% (S1), 25,95% (S2), y 23. 79% (S3). El valor de deflexión disminuyó gradualmente al aumentar la distancia radial, de manera que el descensor de la curva de deflexión cuenca dinámico reduce a 6.20% (S1), 6,83% (S2), y 6.21% (S3) en las localizaciones de 60 cm a 90 cm.
- Los resultados muestran que la capacidad de pavimento para difundir carga dinámica fue mayor que la de difundir de carga estática, y la influencia alcance de la cuenca de deflexión dinámica fue más amplio que el de la cuenca deflexión estática.²⁰

²⁰ Ibid, pag 30

5.3.8. Metodología Asstho

La Guía AASHTO de 2002 para el Diseño Estructural de Pavimentos, presenta tres métodos para determinar el Número Estructural Efectivo (SN_{eff}) de un pavimento flexible convencional. Uno de esos métodos, denominado Método NDT (Non Destructive Testing), Se basa en la medición e interpretación de Ensayos No Destructivos por medio de deflexiones. Este método supone que la capacidad estructural de un pavimento depende de su espesor total y de su rigidez.

La relación entre SN_{eff}, el espesor y la rigidez en la Guía AASHTO es:

$$SN_{eff} = 0.0045 h_p \sqrt[3]{E_p}$$

Donde:

h_p = espesor total de las capas del pavimento por encima de la subrasante, en pulgadas.

E_p = modulo efectivo de las capas del pavimento por encima de la subrasante, en psi.

La guía AASHTO recomienda retrocalcular el valor de E_p en base a datos deflectométricos usando el modelo bi-capa elástico lineal (también conocido como el modelo de Burmister). La búsqueda de soluciones al problema de determinar el número estructural efectivo basado en la interpretación de deflexiones medidas con el deflectómetro de impacto – FWD (Falling weight deflectometer) se conoce hace tiempo.

La mayoría de los métodos se basa en la relación intrínseca entre los parámetros derivados del cuenco de deflexiones y los coeficientes de capa, o módulos de elasticidad y espesores del sistema pavimento-subrasante.

La idea de relacionar características de carga-deformación (cuencos de deflexiones del FWD) con parámetros estructurales (el SN) del pavimento es atractiva ya que refleja una relación fundamental de la mecánica clásica. Por otro lado, la idea de combinar postulados mecanistas con el Número Estructural de AASHTO puede parecer un tanto controversial debido a la naturaleza empírica de SN.

Sin embargo, el empiricismo forma parte integral de la ingeniería de pavimentos desde el establecimiento de la relaciones como $MR = 1,500 \text{ CBR}$, (donde MR es el módulo de resiliencia de la subrasante expresado en psi, y CBR es el California Bearing Ratio).

La evaluación del número estructural SN de un pavimento en servicio es útil ya que refleja su aptitud o deficiencia, y se presta a determinar directamente las necesidades estructurales. Obviamente, el valor de SN sólo no es suficiente y un valor bajo de SN no es necesariamente malo, dependiendo del tráfico y la capacidad portante de la subrasante. Si esta capacidad es alta y la demanda de tráfico es baja, entonces todo lo que se necesita es un SN bajo.

²¹De esta manera, la evaluación estructural es útil cuando esta proporciona el valor de SN conjuntamente con la capacidad portante de la subrasante. Una de las mayores desventajas del esquema de AASHTO y de otros métodos derivados de él es su gran dependencia de los espesores de capas y del pavimento. Esta fuerte dependencia de los espesores de capas existe también en los métodos de retrocálculo que utilizan los cuencos de deflexiones medidos con el FWD para la determinación de módulos de elasticidad en base a técnicas de comparación.

²¹ Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on FWD Deflections", Transportation Research Record 1860, TRB, Washington DC, 2003

6. DISEÑO METODOLOGICO

6.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es correlacional - experimental, ya que se tiene como propósito determinar con la mayor confiabilidad posible, la relación de causa y efecto, además que se requirió de una manipulación rigurosa de variables (deflexiones) o factores experimentales y de control directo relacionados con variables climatológicas, con el fin de comparar resultados obtenidos para el desarrollo la presente investigación.

6.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACION

El método de estudio utilizado en esta investigación fue deductivo con un enfoque mixto, ya que se usaron magnitudes numéricas que fueron tratadas mediante estadísticas y se analizaron datos a través de conceptos y variables.

6.3. DISEÑO METODOLÓGICO

Tabla 2. Fases de la Investigación

FASE 1	
ESTABLECER LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO A PARTIR DE LAS DIFERENTES VARIABLES CLIMATOLÓGICAS	
ACTIVIDAD	
1	Se realizará la medición de la deflexión en forma no destructiva con el deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD), cuyo sistema consiste en aplicar una carga dinámica en el pavimento causada por la caída de una o dos masas, según el equipo, sobre un plato circular (diámetro 0.30 m), cuya superficie de contacto se asemeja a la de la rueda de un camión, esta información se recopilara mensualmente.
2	Se determinaran los espesores mediante Georadar en el tramo vial objeto de estudio. Se describirá el perfil estratigráfico.

3	Procesar los datos obtenidos del FWD con el propósito de analizar la información tomada en campo con la ayuda de una hoja de cálculo que permiten obtener los datos tabulados para su análisis y cálculo de determinadas propiedades de los pavimentos la cual fue desarrollada por GEVIAL S.A.S.
FASE 2	
DESCRIBIR LOS RESULTADOS DE LA DEFLECTOMETRÍA Y CÁLCULO DE LAS VARIABLES ESTRUCTURALES, EXISTENTE	
ACTIVIDAD	
1	Determinar las variaciones de las deflexiones según el procesamiento realizado con la hoja de cálculo a los datos de campo.
2	Hallar las variables estructurales (MR, EP y Sne), teniendo en cuenta las variaciones de la deflexión.
3	Recopilar información de las precipitaciones pluviales en la estación meteorológica más cercana a lugar de la medición.
FASE 3	
ANALIZAR LA VARIACIÓN EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO, MEDIDO EN FWD CON RESPECTO A LAS DISTINTAS ÉPOCAS DEL AÑO.	
ACTIVIDAD	
1	Analizar la variación en la respuesta estructural del pavimento, con el análisis previo de las variables estructurales, la variación en la deflectometría y las precipitaciones con respecto a las distintas épocas del año.
FASE 4	
MODELAR Y COMPARAR LA CUENCA DE DEFLEXIÓN DINAMICA Y ESTATICA	
ACTIVIDAD	
1	Comparar la cuenca de deflexión Dinámica y Estática teniendo en cuenta los datos tomados en campo con el deflectometro FDW y el tiempo estipulado en el artículo Modeling of the FWD deflection Basin to evaluate.

6.4. INSTRUMENTOS

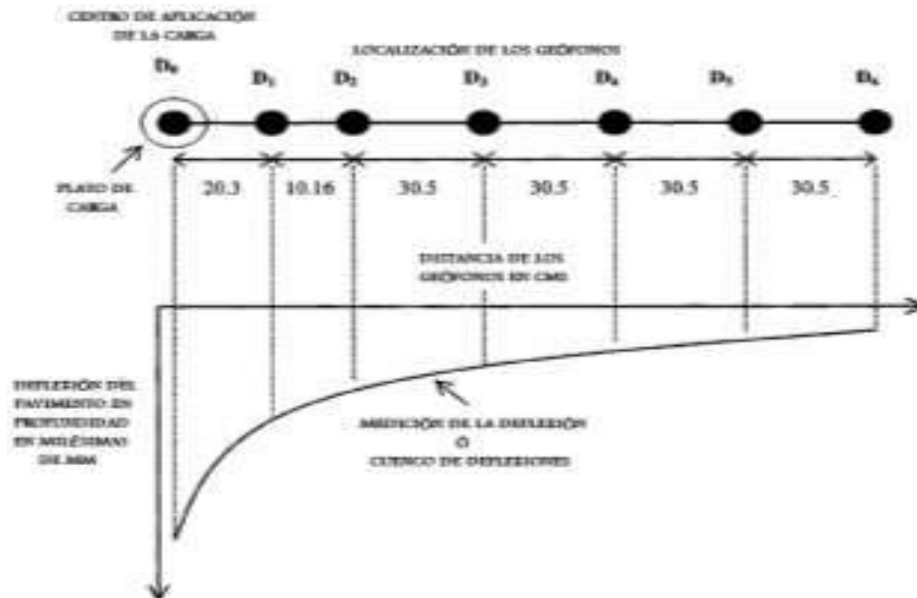
6.4.1. Deflectómetro de Impacto

El deflectómetro de impacto o también conocido como FWD, es el equipo técnicamente más avanzado que existe en la actualidad para simular y medir la respuesta de un pavimento, presentando dos características importantes a saber.

La primera de ellas es el sistema de aplicación de carga, la cual se genera a través de un pulso producido por dejar caer un determinado peso sobre la superficie del pavimento, simulando en forma bastante aproximada el efecto de un vehículo circulando sobre él a 60 o 70 Km/hr.

La segunda característica es que el FWD no sólo mide la deflexión del pavimento bajo el área de aplicación de la carga, sino que lo hace en una serie de 6 a 9 puntos localizados a distancias que varían entre 20 y 180 cm del centro del impacto (Ver Figura 5).

Figura 5. Cuenco de deflexiones bajo la aplicación de la carga.



Fuente. webidu.idu.gov.co julio 16 2014

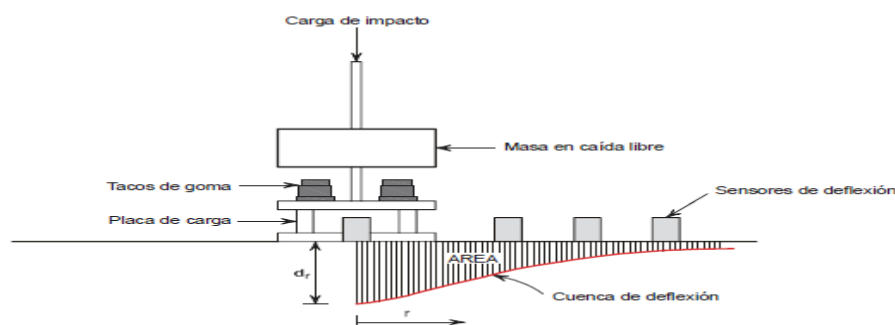
Los dispositivos encargados de captar la deformación superficial del pavimento son denominados sismómetros y están localizados en la parte inferior del FWD, separados entre sí por un espaciamiento predefinido. Como complemento a los dispositivos de medición de carga y deflexiones, el deflectómetro cuenta con un par de sensores de temperatura, los cuales captan la temperatura del ambiente y superficial del pavimento al momento de la ejecución de la prueba.

Conocer la temperatura del pavimento al momento del ensayo es muy importante, debido a que el asfalto a bajas temperaturas posee un comportamiento resistente pero frágil, opuesto al que se presenta a altas temperaturas, en donde se comporta de forma débil y dúctil; razón por la cual, la rigidez del pavimento debe ser corregida por efectos de temperatura.

El deflectómetro de impacto se fundamenta en la generación de una onda de carga en el pavimento o sobre la capa por estudiar. La onda es ocasionada por el impacto de la caída de una masa, y es transmitida al pavimento por medio de un sistema de amortiguadores elásticos apoyados sobre una placa de carga.

Un pulso de carga se aplica a la superficie del pavimento. El pulso de carga se puede repetir automáticamente varias veces en una variedad de niveles de carga. El valor de pico de la deflexión de la superficie se mide y registra en el centro de la zona cargada y en un número de puntos en el cuenco de deflexión, y se almacena junto con la fuerza aplicada, temperatura del aire, temperatura de la superficie del pavimento y la posición del punto de prueba.

Figura 6 Esquema de Funcionamiento del deflectómetro de impacto



Fuente. webidu.idu.gov.co julio 16 2014

Tanto la masa como su altura de caída y el sistema de amortiguadores elásticos pueden ser variados, para generar el impacto deseado en el pavimento o en la subrasante por evaluar.

Los sensores, generalmente, se localizan a una distancia "r" de 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 cm, medida entre el eje de carga del sistema y el sitio de ubicación de cada sensor. La deflexión "dr" registrada por un sensor ubicado a una distancia "r" del eje de carga es debida a la deformación de la porción del pavimento que se encuentra dentro de la zona de tensión generada por el impacto sobre el pavimento o la subrasante.

Conocida la carga, la relación de Poisson de la subrasante, el diámetro del plato de carga y la deflexión, se puede calcular el valor del módulo resiliente de la subrasante en pavimentos flexibles y el módulo de reacción de la subrasante en pavimentos rígidos, así como el de las distintas capas de una estructura del pavimento, mediante el procedimiento conocido como retrocálculo o cálculo inverso²². (Anexo 2 Ficha Técnica de Equipos)

6.4.2. Georadar

Es una herramienta tecnológica basada en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en su discontinuidad. (Ver Anexo 3. Metodología y procesamiento Georadar) y (Anexo 2 Ficha Técnica de Equipos)

El equipo empleado para la determinación del perfil de la estructura de pavimento se detalla a continuación:

- **EQUIPO:** Georadar
- **REFERENCIA:** Ground Penetrating Radar (GPR).
- **ANTENAS:**
 - Alta Frecuencia: 1,600 MHz.
 - Baja Frecuencia: 500 MHz.

²² HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. 2009. P. 74

Figura 7. Georradar: Remolque y Antena

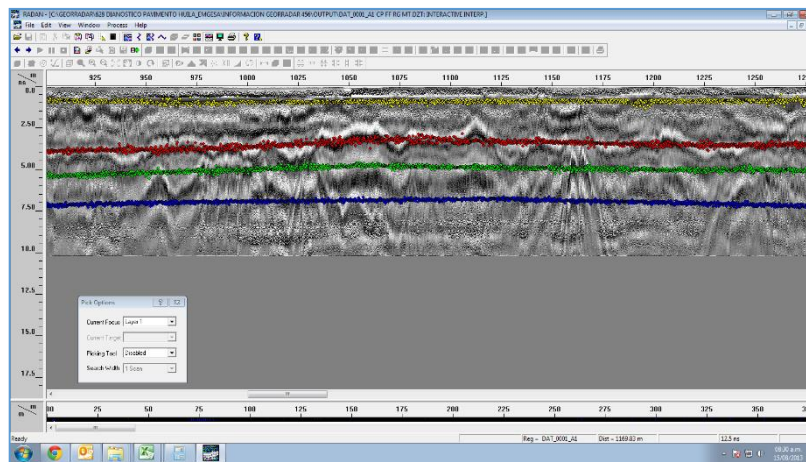


Fuente Gevial SAS

El radagrama corresponde a la identificación gráfica de las interfaces entre capas producidas por la variación de la constante dieléctrica de cada capa, detectada por las variaciones en la refracción de las ondas emitidas por las antenas de alta y baja frecuencia.

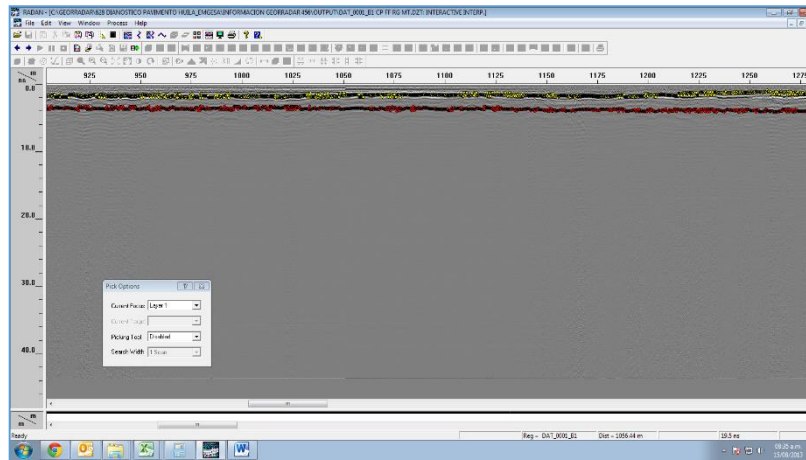
La antena de baja frecuencia (onda larga) permite la identificación de interfaces a altas profundidades (hasta 2 a 3 m), mientras que la de alta frecuencia (onda corta) permite la identificación de capas de menores espesores (hasta 0.6 m).

Figura 8. Ejemplo de Radagrama – Antena de Baja Frecuencia



Fuente Gevial SAS

Figura 9. Ejemplo de Radagrama – Antena de Alta Frecuencia



Fuente Gevial SAS

Para la exploración de espesores de pavimentos, es recomendable utilizar las dos antenas, es importante tener en cuenta que la frecuencia de esta es inversamente proporcional a la amplitud de la onda que emite, es decir que a menor frecuencia la profundidad que penetra es mayor y viceversa.

- Antena de baja frecuencia: Realiza una penetración de 2.5 a 3.0 metros de profundidad; Esta determina el espesor del material granular, rellenos y profundidad a la que se encuentra el material de Subrasante
- Antena de alta frecuencia: Realiza una penetración de hasta 60 cm de profundidad; Esta determinar el espesor de losas de concreto, carpetas asfálticas y refuerzos.

Este equipo procesa la información obtenida con imágenes en el software RADAN 6.6 de la compañía GSSI.

7. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

7.1 DATOS MEDICIÓN DE LA DEFLEXIÓN

Se tomaron medidas con equipo FWD cada 20 m lineales por carril, en los dos carriles del tramo objeto del presente documento. Las deflexiones se midieron en milésimas de milímetros.

En el anexo 4 se presentan los datos que nos arroja el equipo de las mediciones que se realizaron en diferentes épocas del año, estos datos no tienen ningún tipo de procesamiento.

7.2 ESPEORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

A partir de las mediciones realizadas mediante el empleo del equipo georadar se realizó la determinación de los espesores que componen la estructura de pavimento (Carpeta asfáltica y material granular) a lo largo del tramo, como se verifica a continuación:

En el anexo 5 se presentan las tablas de los espesores de capa de la estructura de pavimento para cada carril, así como los valores promedio por segmento y la variación de los mismos

Se observa una condición uniforme de los espesores de carpeta y material granular a lo largo del tramo, con un valor promedio de espesor de carpeta asfáltica por lo general de 0.16 m, con valores entre 0.14 m y 0.20 m, y un coeficiente de variación en los valores obtenidos de 6.37% para el carril derecho y 7.56% para el carril izquierdo.

Figura 10. Espesores de Capa Georradar – Carril derecho

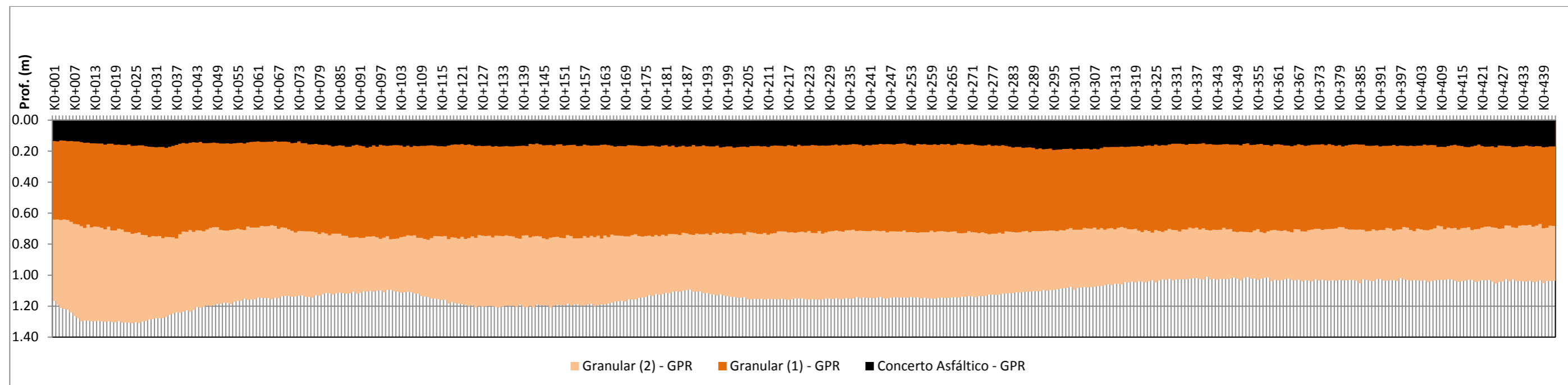
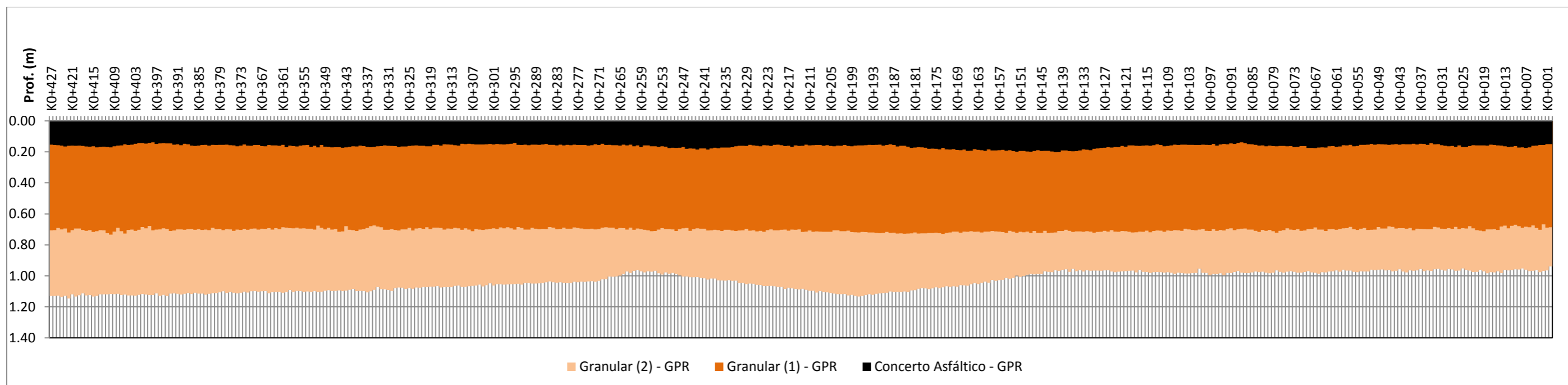


Figura 11. Espesores de Capa Georradar – Carril Izquierdo



7.3 PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS CON FWD

Con el propósito de analizar la información tomada en campo se utilizó una hoja de cálculo que permiten obtener los datos tabulados para su análisis y cálculo de determinadas propiedades de los pavimentos la cual fue desarrollada por Gevial S.A.S. (Ver Anexo 6. Metodología para Procesamiento).

- Esta hoja de cálculo proporciona información sobre la condición relativa de un pavimento flexible mediante parámetros cualitativos, los cuales han sido formulados bajo las siguientes premisas y se pueden observar en la Tabla 3 (Ver Anexo 7. Datos FWD Procesados).
- La deflexión bajo el centro de aplicación de la carga representa la deflexión de toda la estructura del pavimento.
- Las diferencias entre las deflexiones cercanas al punto de aplicación de carga reflejan la rigidez relativa en las capas superiores del pavimento.
- Las diferencias entre las deflexiones de la parte media del cuenco de deflexión (entre 300 y 900 mm del punto de aplicación de carga) reflejan la rigidez relativa en las capas granulares o inferiores del pavimento.
- Las deflexiones medidas cerca al extremo del cuenco de deflexión reflejan bastante bien la condición de la Subrasante.

Tabla 3. Parámetros empleados para la Evaluación Deflectométrica Cualitativa.

<i>Parámetro</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Indicador</i>
Índice de curvatura superficial	$ICS=d_0-d_{300}$	Junto con otros parámetros, proporciona una idea sobre la rigidez de las capas asfálticas
Índice de daño de la base	$IDB=d_{300}-d_{600}$	Deformación compresiva sobre las capas de apoyo de las capas asfálticas
Índice de curvatura de la base	$ICB=d_{600}-d_{900}$	Deformación compresiva sobre la Subrasante

Recientemente, Horak y Emery²³, han encontrado rangos de comportamiento para los parámetros del cuenco de deflexión en pavimentos flexibles, los cuales son descritos en la Tabla 4.

²³ *Ibíd.*, pag 39

Tabla 4. Parámetros Evaluación Deflectométrica Cualitativa

Tipo de Base	Condición Estructural	D ₀ (μm)	ICS (μm)	IDB (μm)	ICB (μm)
Granular	Buena	< 500	< 200	< 100	< 50
	Regular	500 - 750	200 - 400	100 - 200	50 - 100
	Mala	> 750	> 400	> 200	> 100
Cementada	Buena	< 200	< 100	< 50	< 40
	Regular	200 - 400	100 - 300	50 - 100	40 - 80
	Mala	> 400	> 300	> 100	> 80
Bituminosa	Buena	< 400	< 200	< 100	< 50
	Regular	400 - 600	200 - 400	100 - 150	50 - 80
	Mala	> 600	> 400	> 150	> 80

Donde:

Do: Deflexión máxima.

ICS: Índice de curvatura superficial, característico de las capas superficiales.

IDB: Índice de daño de la base, característico de las capas de apoyo de la capa asfáltica.

ICB: Índice de curvatura de la base, característico de la fundación.

Los resultados de la evaluación cualitativa se presentan a continuación:

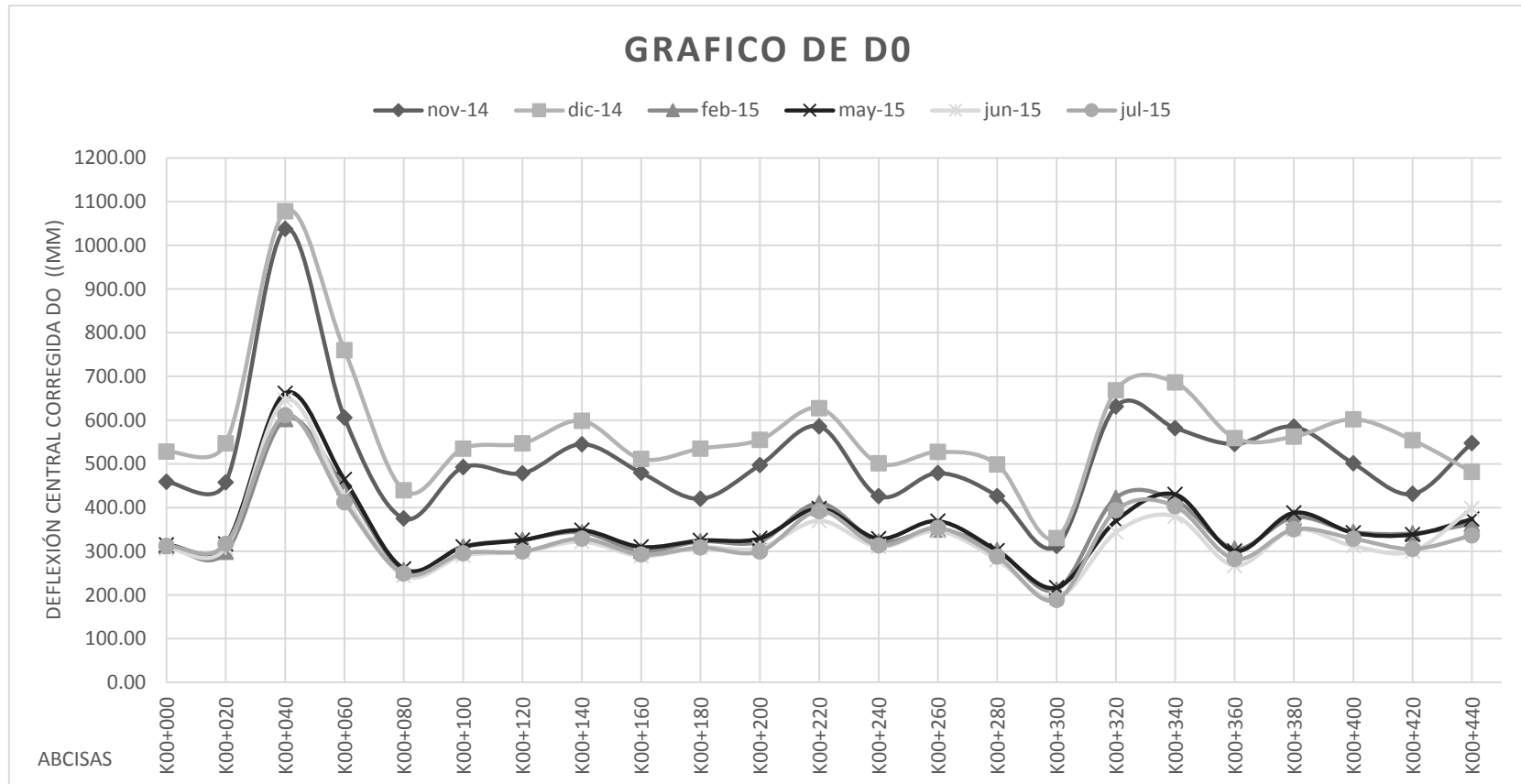
En las figuras anteriores se evidencia un buen comportamiento con relación a esta variable a lo largo de la vía con valores de deflexión bajos, por lo general menores a 188,6 μm en el carril derecho, a 188,6 μm en el carril izquierdo

7.4 VARIACIÓN DE LA DEFLEXION

De acuerdo con los valores de deflexión central D₀ obtenidos y que se muestran en el anexo 8, se puede decir que se obtuvieron valores entre 188,59 (1/1000 mm) y 1077,89 μm para el carril derecho y en el carril izquierdo 138,00 μm y 564,05 μm, con un valor promedio de 409,57 μm y 316.76 μm respectivamente, y un coeficiente de variación de los valores obtenidos de 17.48%. Los mayores valores se presentan entre el k0+020 y el k0+060 en el carril derecho, en donde se

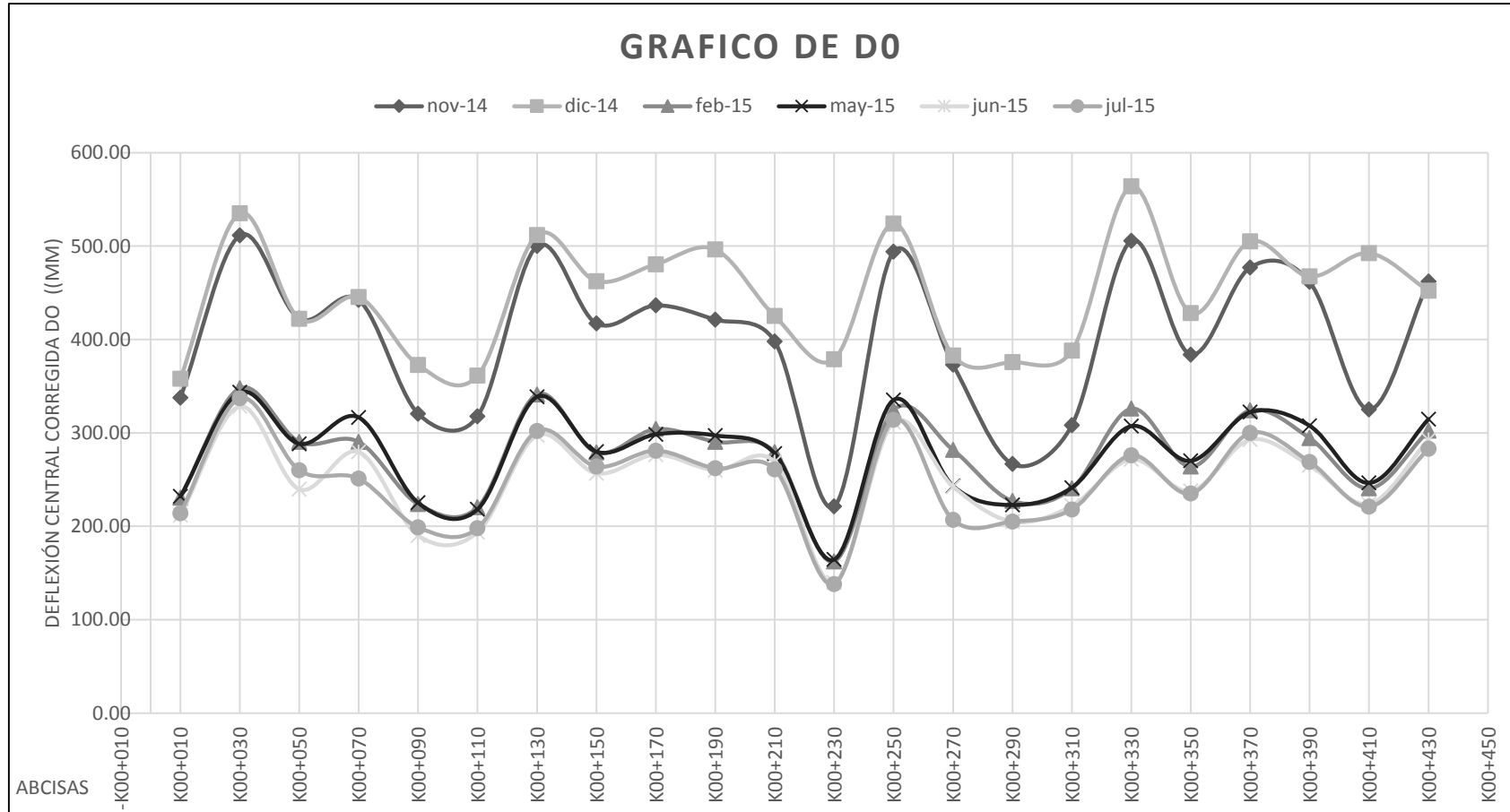
presenta un valor promedio de Df_0 de $555.33 \mu\text{m}$. (Ver Anexo 8. Gráficas variación de la deflexión).

Figura 12. Deflexión central carril derecho Pr 0+000 hasta Pr 0+440



Fuente. Autor

Figura 13. Deflexión central carril izquierdo Pr 0+010 hasta Pr 0+430



Fuente. Autor

7.5 CÁLCULO DE LAS VARIABLES ESTRUCTURALES, EXISTENTE.

7.5.1 Módulo Resiliente

De acuerdo con la metodología AASHTO-93, el cálculo del Módulo Resiliente de la Subrasante puede determinarse a partir de las deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto (FWD)²⁴ (Ver Anexo 7)

La siguiente expresión permite la determinación del Mr de la Subrasante a partir de las deflexiones FWD:

$$M_r = \frac{0.24 * P}{d_r * r} \quad \text{Fuente. Método ASSHTO-93}$$

Donde:

Mr: Módulo Resiliente de la Subrasante, psi

P: Carga aplicada, libras

Dr: Deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga, pulgadas

r: Distancia desde el centro del plato de carga, pulgadas

La mínima distancia debe determinarse por medio de la siguiente relación:

$$r \geq 0.7a_e$$

Donde:

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2} \quad \text{Fuente. Método ASSHTO-93}$$

a_e: Radio del bulbo de esfuerzos en la interface estructura-Subrasante, pulgadas

a: Radio del plato de carga del deflectómetro, pulgadas

D: Espesor de las capas del pavimento, pulgadas

E_p: Modulo efectivo de todas las capas del pavimento por encima de la Subrasante, psi.

²⁴ ASSHTO.1993.ASSHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, Washington, D.C.

El módulo equivalente refleja la capacidad estructural del pavimento existente, es decir, la rigidez equivalente otorgada por la capa asfáltica que la conforma y los materiales que se encuentran bajo ésta. El módulo equivalente se determina empleando la metodología de la AASHTO alimentada con la medición deflectométrica, mediante la siguiente ecuación²⁵:

$$d_0 = 1.5P.a \left(\frac{1}{Mr \sqrt{1 + \left(\frac{D^3}{a} \frac{E_p}{Mr}\right)^2}} + \frac{1 - \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}{E_p} \right) \text{ Fuente. Método ASSHTO-93}$$

Donde:

d_0 : Deflexión central

P: Presión del plato de carga, psi. En este caso 82.3psi=5.76Kg/cm²

a: Radio del plato de carga, pulgadas (5.9 pulg =15 cm)

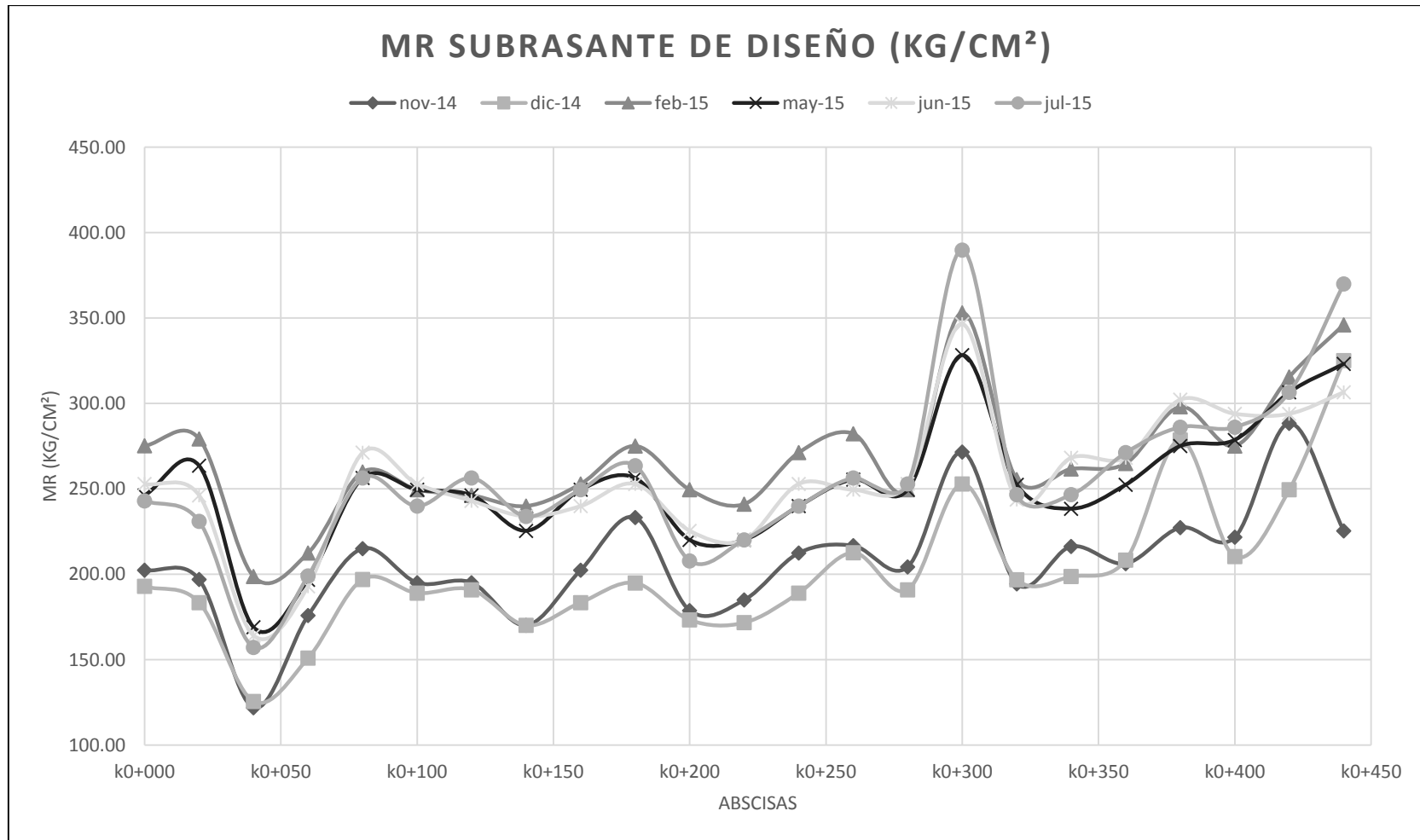
D: Espesor total de las capas del pavimento sobre la Subrasante, pulgadas.

Mr: Módulo Resiliente de la Subrasante, psi.

E_p : Módulo efectivo de las capas que conforman el pavimento, psi.

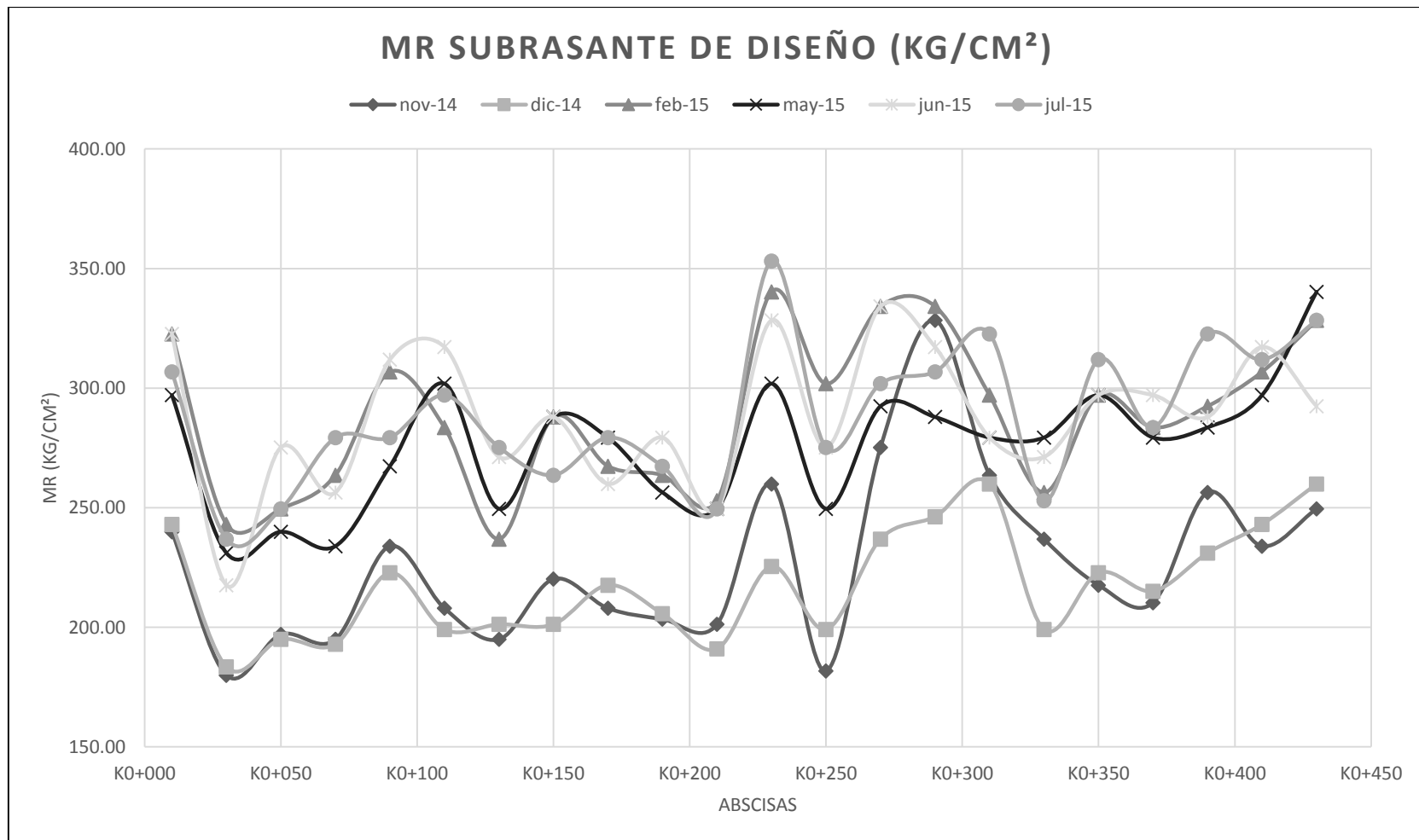
²⁵ ASSHTO.1993.ASSHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, Washington, D.C.

Figura 14. Mr carril derecho.



Fuente. Autor

Figura 15. Mr carril izquierdo.



Fuente. Autor

7.5.2 Módulo equivalente del pavimento EP

El cálculo del módulo equivalente de la estructura de pavimento fue obtenido, igualmente a partir de la metodología AASHTO, con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$d_0 = 1.5 * p * a * \left\{ \frac{1}{M_r \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_r}} \right)^2}} + \left[\frac{1 - \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}{E_p} \right] \right\} \quad \text{Fuente. Método ASSHTO-93}$$

Dónde:

d_0 = Deflexión central.

P = Presión del plato de carga, en psi. En este caso igual a 82.3 psi = 5.76 Kg/cm².

a = Radio del plato de carga, en pulgadas. (5.9 pulgadas = 15 cm.)

D = Espesor total de las capas del pavimento sobre la Subrasante, en pulgadas,

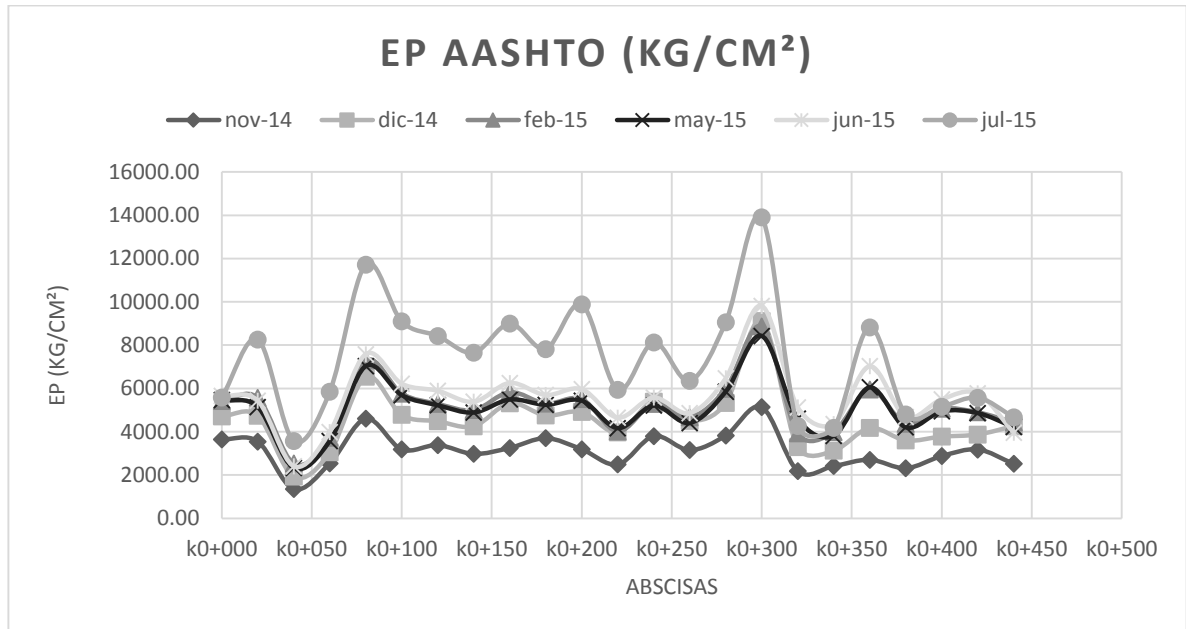
M_r = Módulo Resiliente de la Subrasante, en psi.

E_p = Módulo efectivo de todas las capas del pavimento, en psi.

El módulo equivalente del pavimento, refleja la capacidad estructural del pavimento existente, es decir, la capa asfáltica que la conforma y los materiales granulares que se encuentran sobre la subrasante. La obtención del módulo equivalente se realizó a partir de la metodología de la AASHTO haciendo uso de las deflexiones registradas con el Deflectómetro de Impacto FWD, particularmente de la deflexión central²⁶.

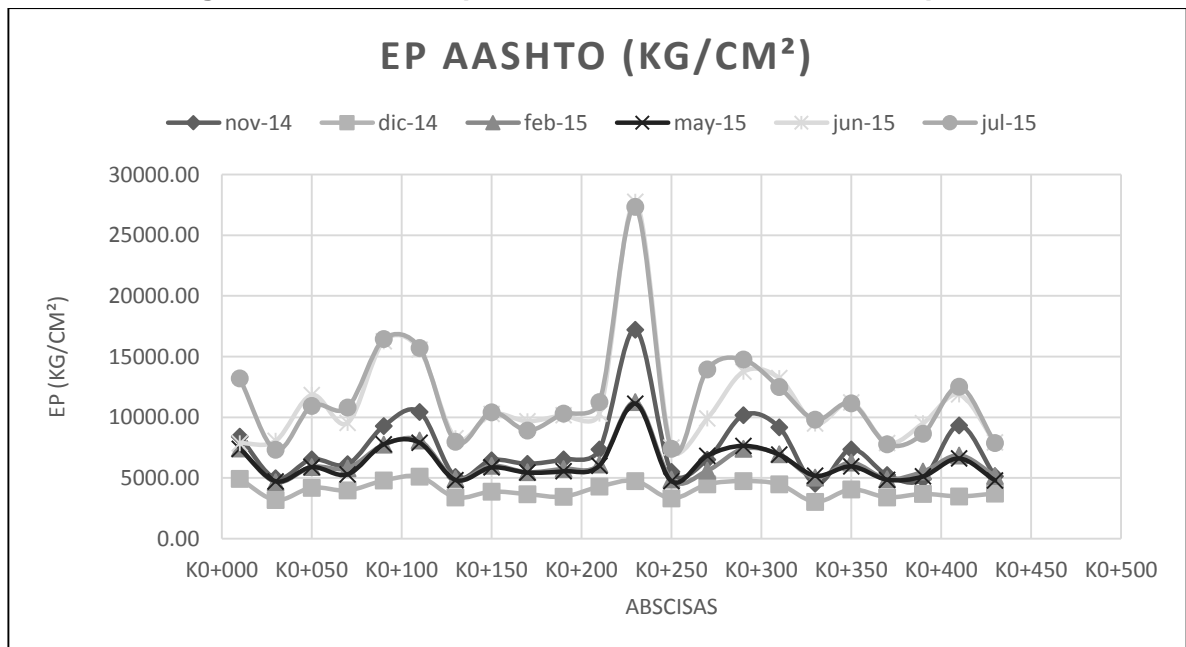
²⁶ ASSHTO.1993.ASSHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, Washington, D.C.

Figura 16. Módulo Equivalente del Pavimento carril derecho



Fuente. Autor

Figura 17. Módulo Equivalente del Pavimento carril izquierdo



Fuente. Autor

7.5.3 Número estructural SN

La variable más relevante en la metodología AASHTO para el diagnóstico de la estructura de pavimento es el Número Estructural – SN, y el cálculo del SN efectivo se realiza mediante la siguiente fórmula²⁷:

$$SN_{Efectivo} = 0.0045 * D * \sqrt[3]{E_P} \quad \text{Fuente. Método ASSHTO-93}$$

Donde D es el espesor de la estructura del pavimento.

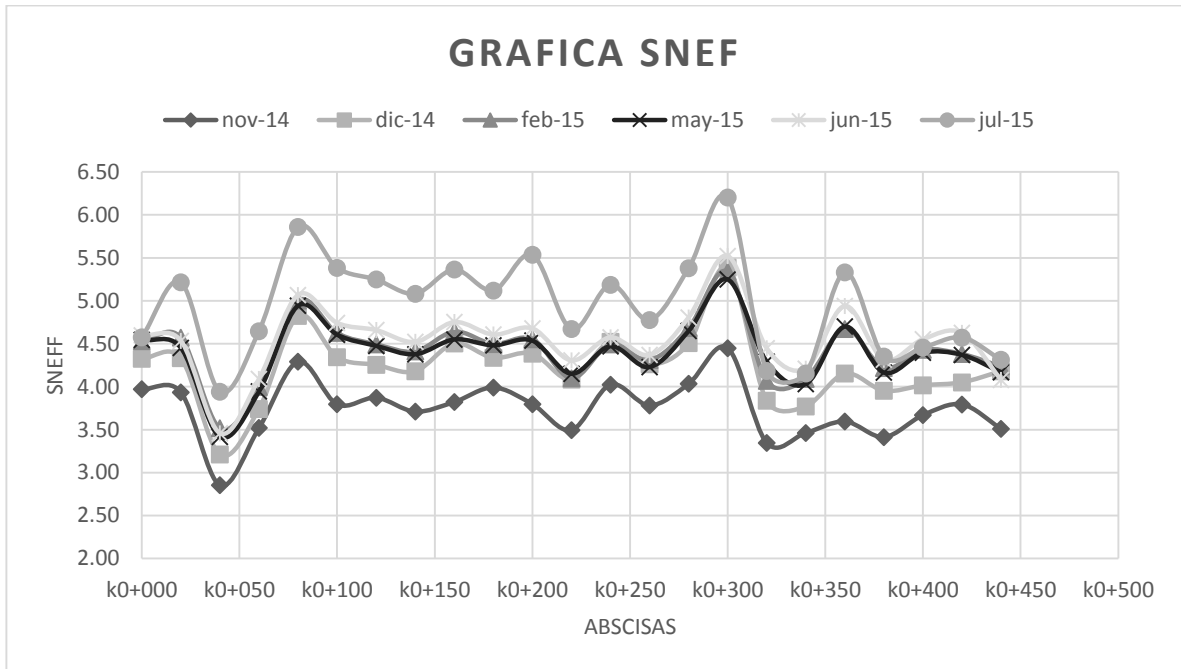
El comportamiento de la estructura de pavimento medido a través del número estructural, se muestra a continuación para cada uno de los carriles evaluados para cada uno de los tramos estudiados.

A continuación se presentan los resultados del Número estructural efectivo obtenido a partir de las mediciones:

Al analizar las figuras anteriores se observa que se obtuvieron valores de número estructural efectivo entre 2.85 y 6.80 con un valor promedio de 4.38 en la calzada derecha y en la calzada izquierda entre 3.73 y 7.81 con un valor promedio de 5.00.

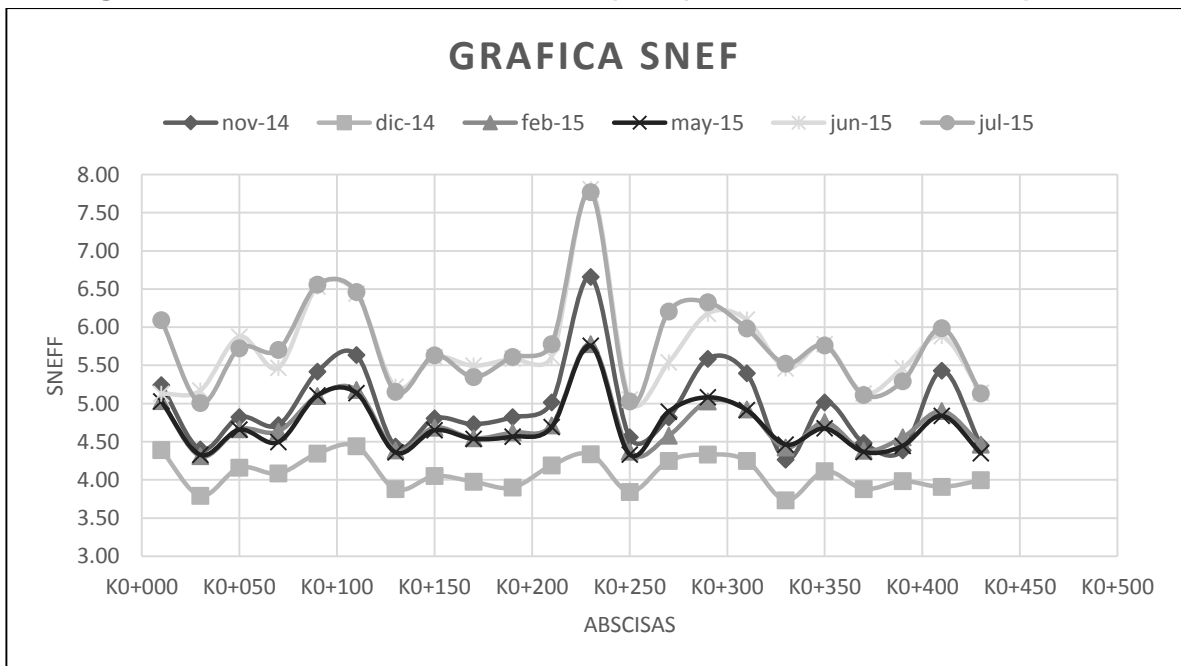
²⁷ ASSHTO.1993.ASSHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, Washington, D.C.

Figura 18. Numero estructura efectivo (SNeF) del Pavimento carril derecho



Fuente. Autor

Figura 19. Numero estructura efectivo (SNeF) del Pavimento carril izquierdo

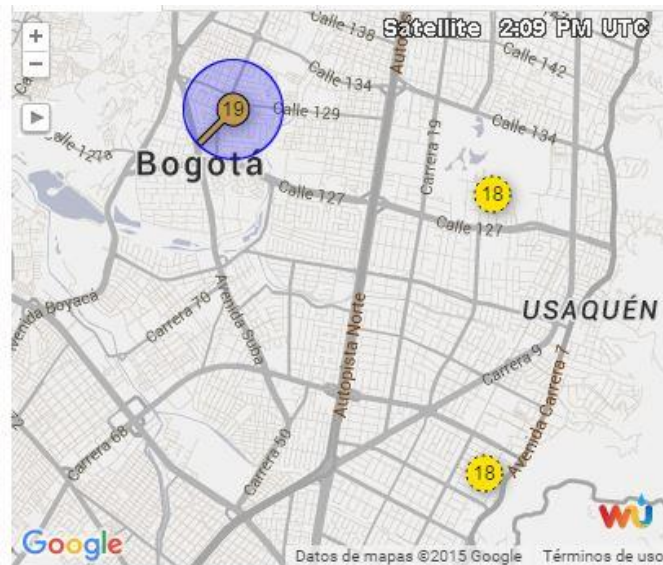


Fuente. Autor

7.6 INDICADORES AMBIENTALES

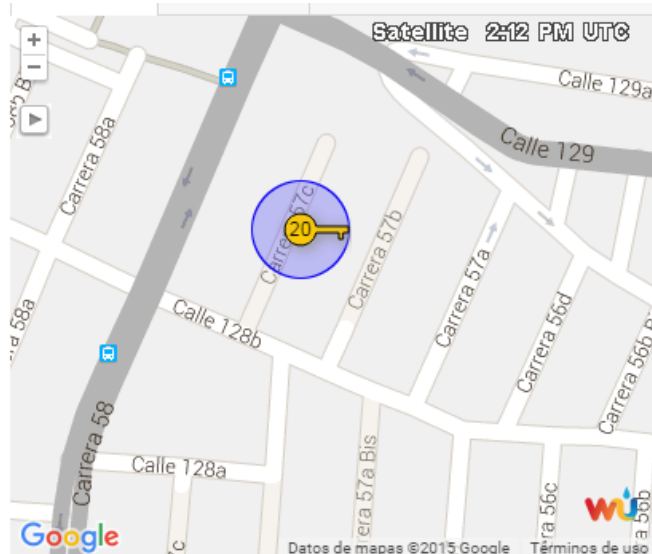
A continuación se muestra la ubicación de la estación meteorológica las Villas, así como los indicadores ambientales encontrados en dicha estación. (Ver Anexo 9. Datos Meteorológicos)

Figura 20. Estaciones meteorológica



Fuente. <http://espanol.wunderground.com/Agto/10/2015>

Figura 21. Ubicación estación meteorológica de Suba

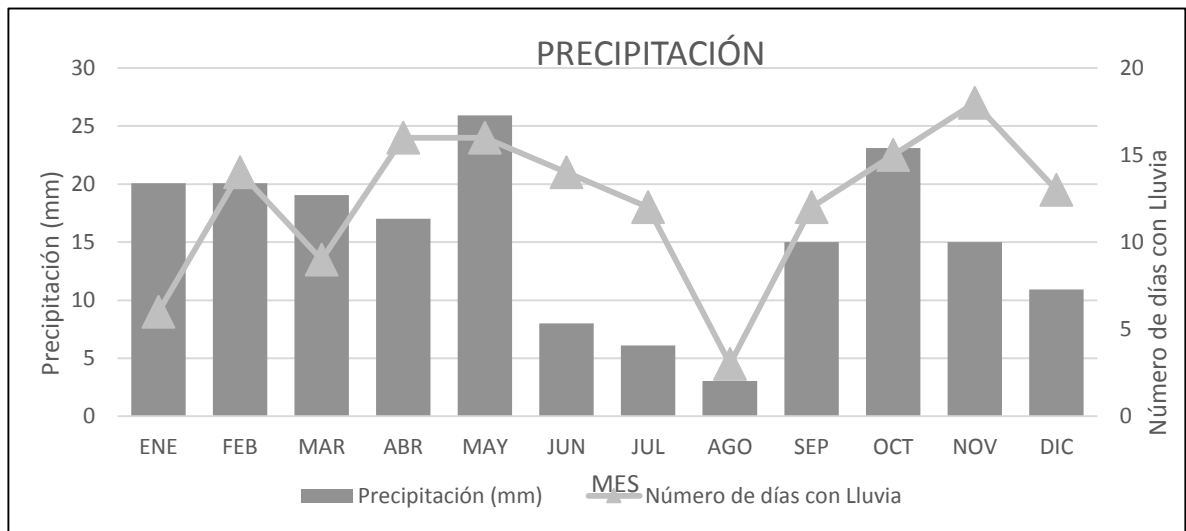


Fuente. <http://espanol.wunderground.com/Agto/10/2015>

En la figura anterior se puede evidenciar que la estación pluviométrica más cercana al lugar de estudio corresponde a la estación de las Villas ubicada en la calle 128 B con carrera 57 C en el Barrio las Villas localidad de Suba.

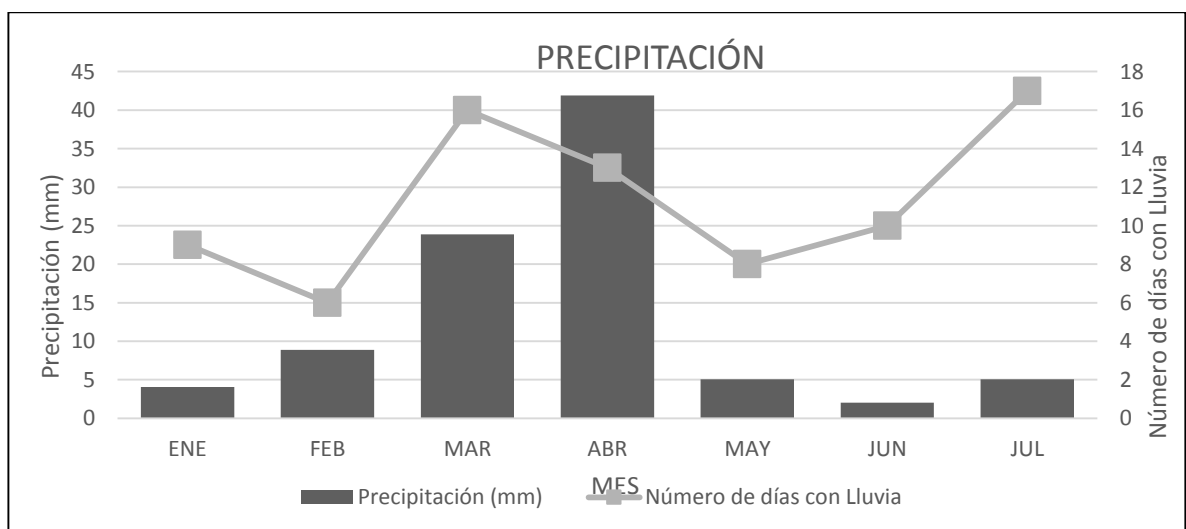
A continuación se presentan una serie de indicadores ambientales de dicha estación:

Figura 22. Precipitaciones Climatológicas Estación Las Villas Año 2014



Fuente: Serie histórica Weather Underground.

Figura 23. Precipitaciones Climatológicas Estación Las Villas Año 2015



Fuente: Serie histórica Wheather Underground.

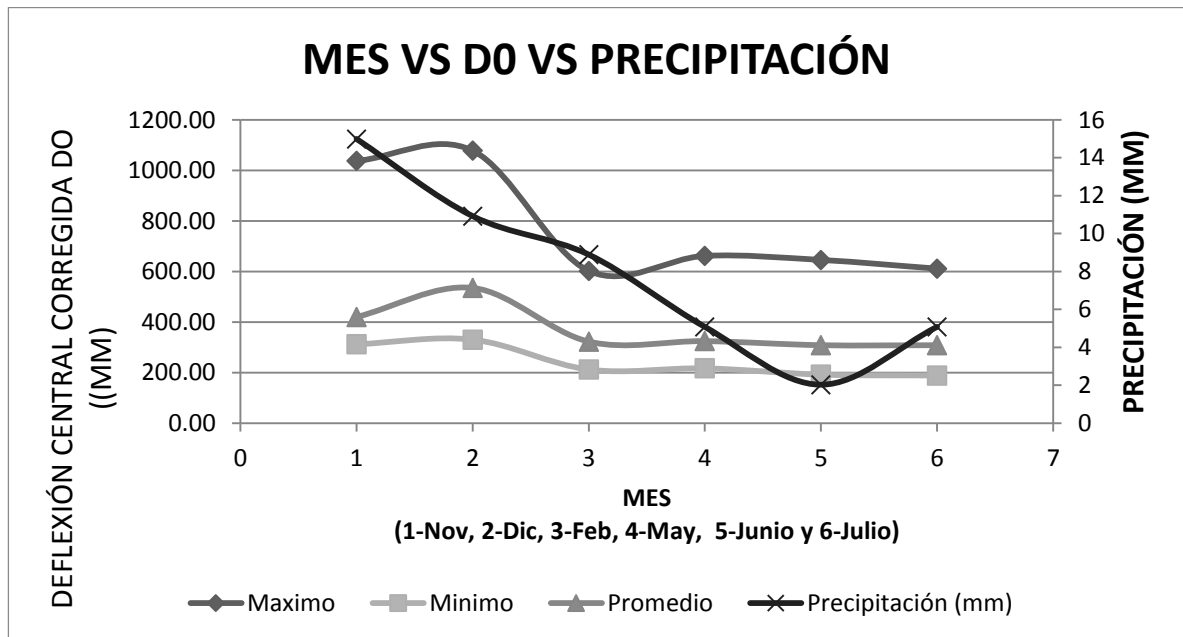
En el anexo 10 podemos observar que la zona de estudio presenta temperaturas entre 7°C y 20°C, una temperatura media anual promedio de 14°C, una humedad relativa de hasta 98%.

Para el área de estudio, los meses más secos son: Enero y Junio; y los meses que representan más lluvias comprenden los meses Octubre 2014 y Abril de 2015.

7.7 ANALIZAR LA VARIACIÓN EN LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO, CON EL ANÁLISIS PREVIO DE LAS VARIABLES ESTRUCTURALES, LA VARIACIÓN EN LA DEFLECTOMETRIA Y LAS PRECIPITACIONES CON RESPECTO A LAS DISTINTAS ÉPOCAS DEL AÑO.

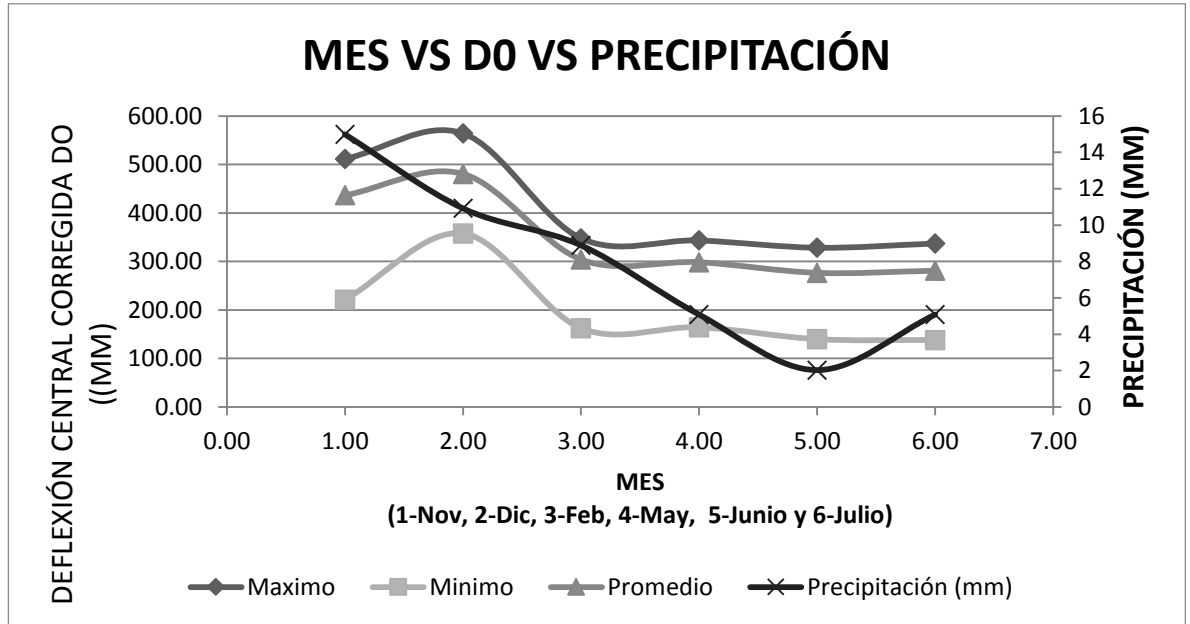
Se realizó los respectivos análisis verificando el comportamiento de las deflexiones (D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6) vs el tiempo y la Precipitación, vs el tiempo y la temperatura, en tres puntos, donde se presenta la máxima, el promedio y la mínima deflexión (ver anexo 10 tablas de datos).

Figura 24. Deflexión Corregida D0 (µm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



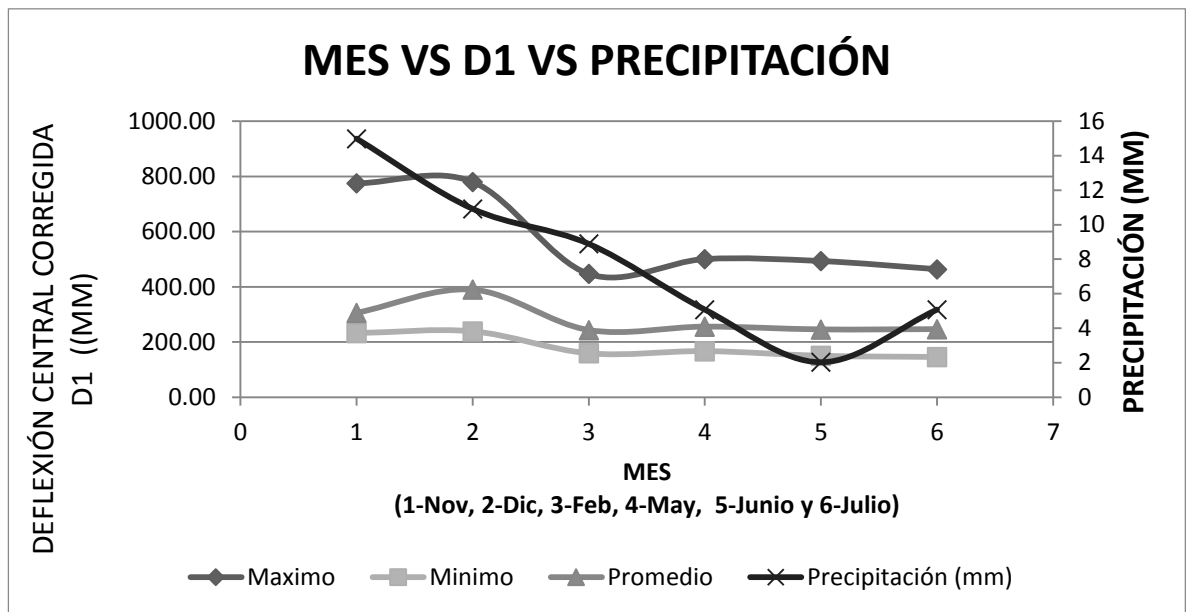
Fuente. Autor

Figura 25. Deflexión Corregida D0 (µm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



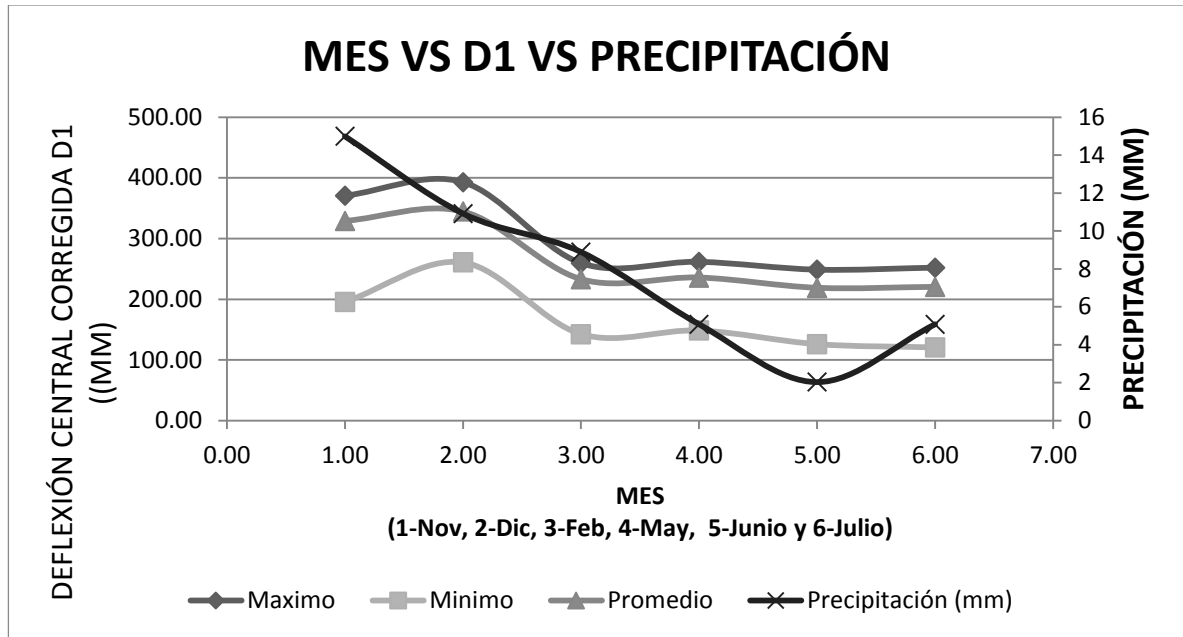
Fuente. Autor

Figura 26. Deflexión Corregida D1 (µm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



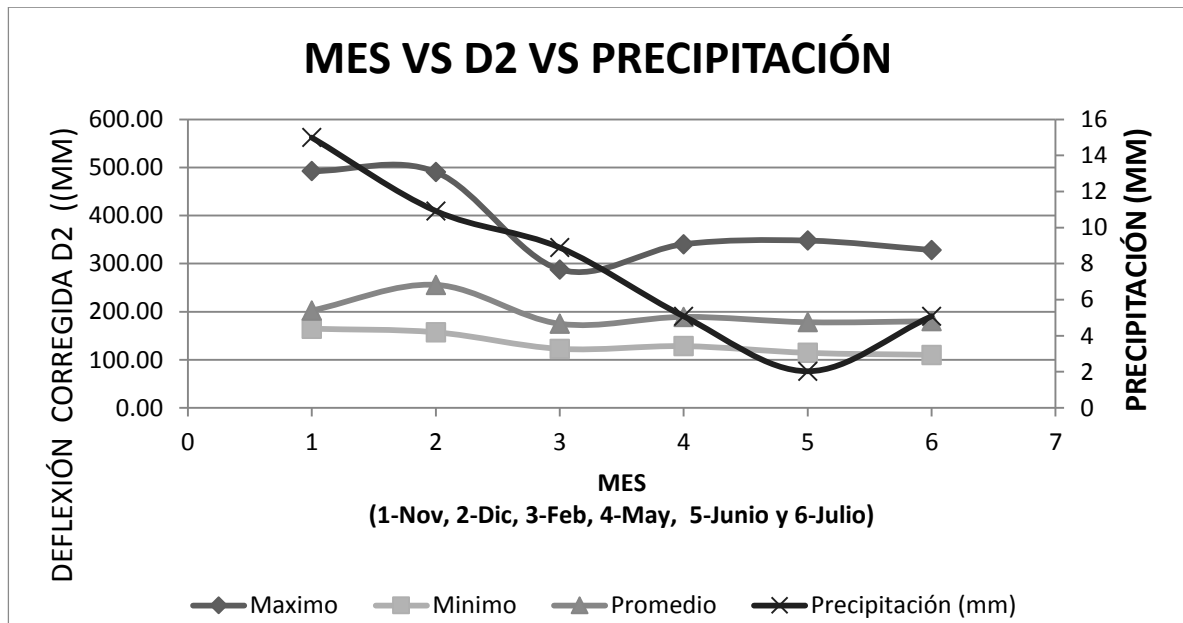
Fuente. Autor

Figura 27. Deflexión Corregida D1 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



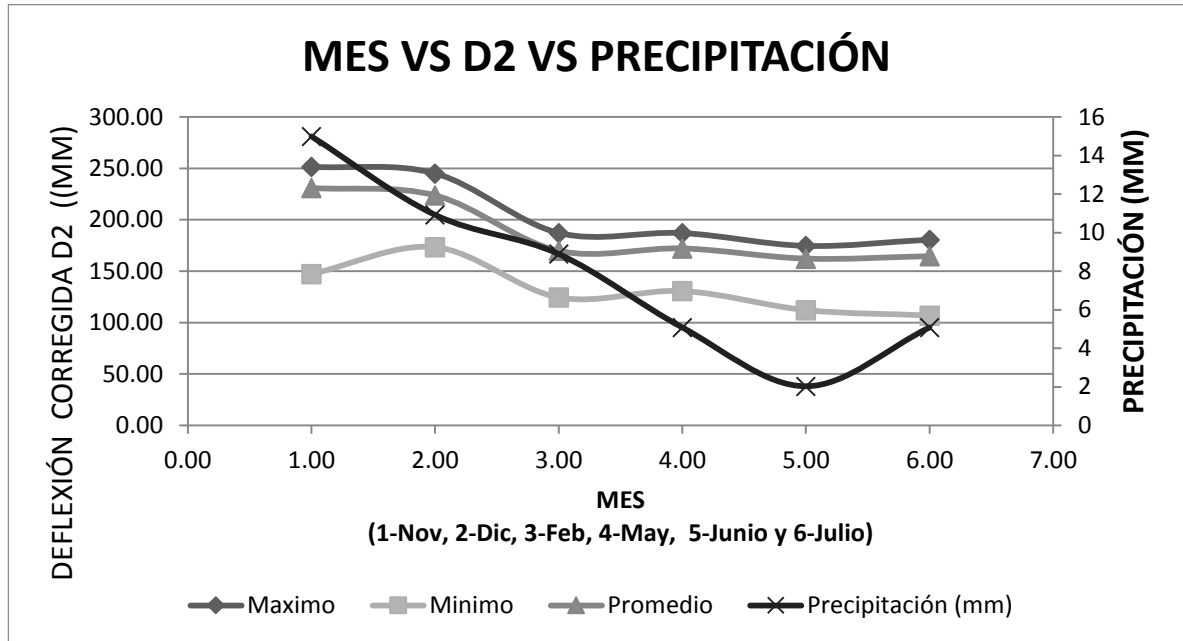
Fuente. Autor

Figura 28. Deflexión Corregida D2 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



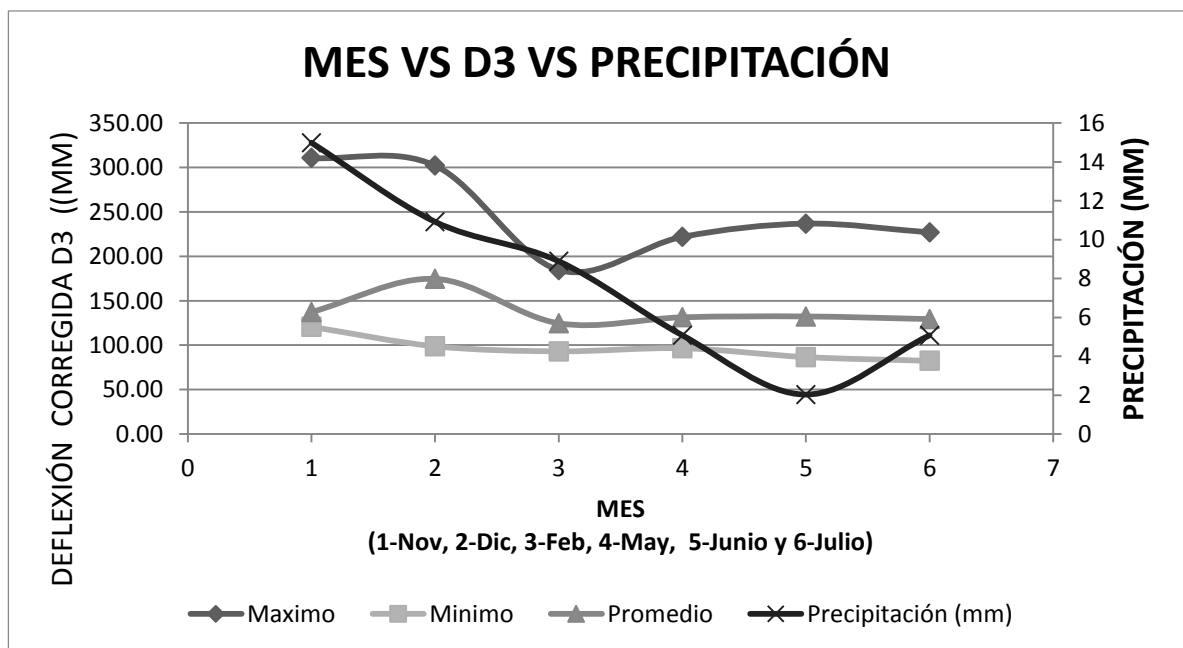
Fuente. Autor

Figura 29. Deflexión Corregida D2 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



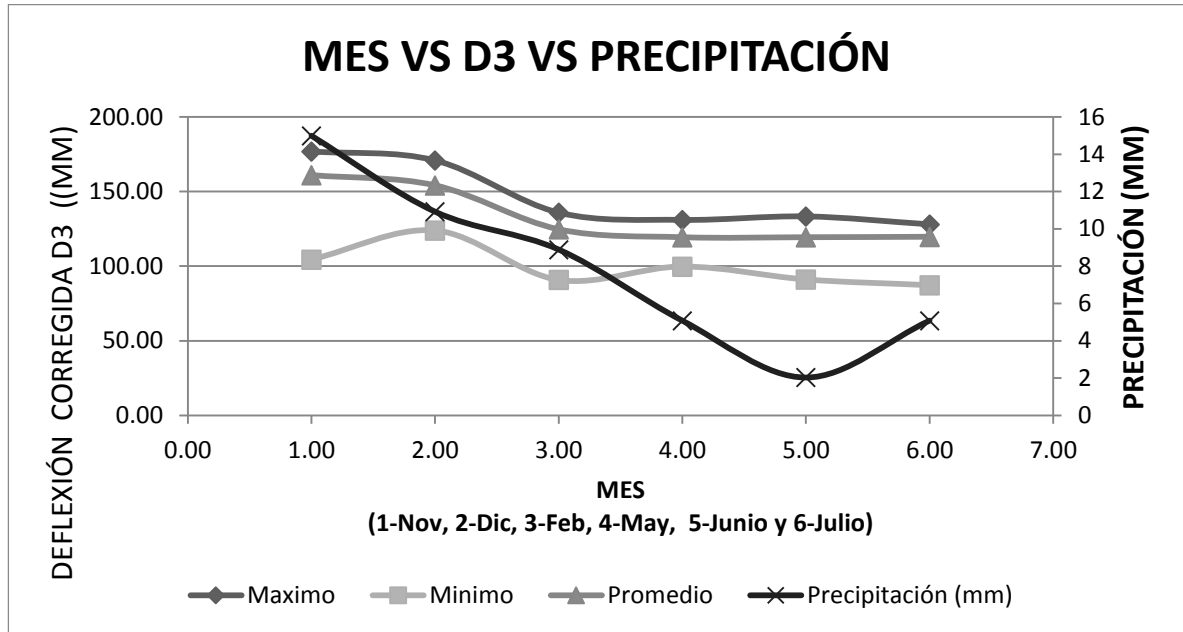
Fuente. Autor

Figura 30. Deflexión Corregida D3 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



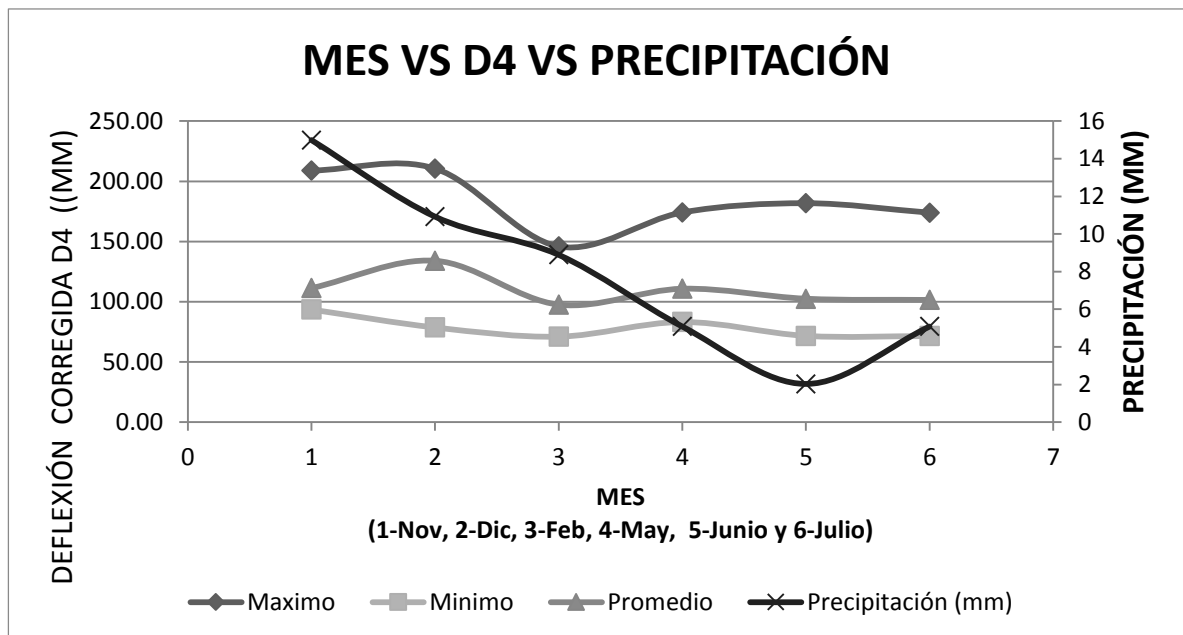
Fuente. Autor

Figura 31. Deflexión Corregida D3 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



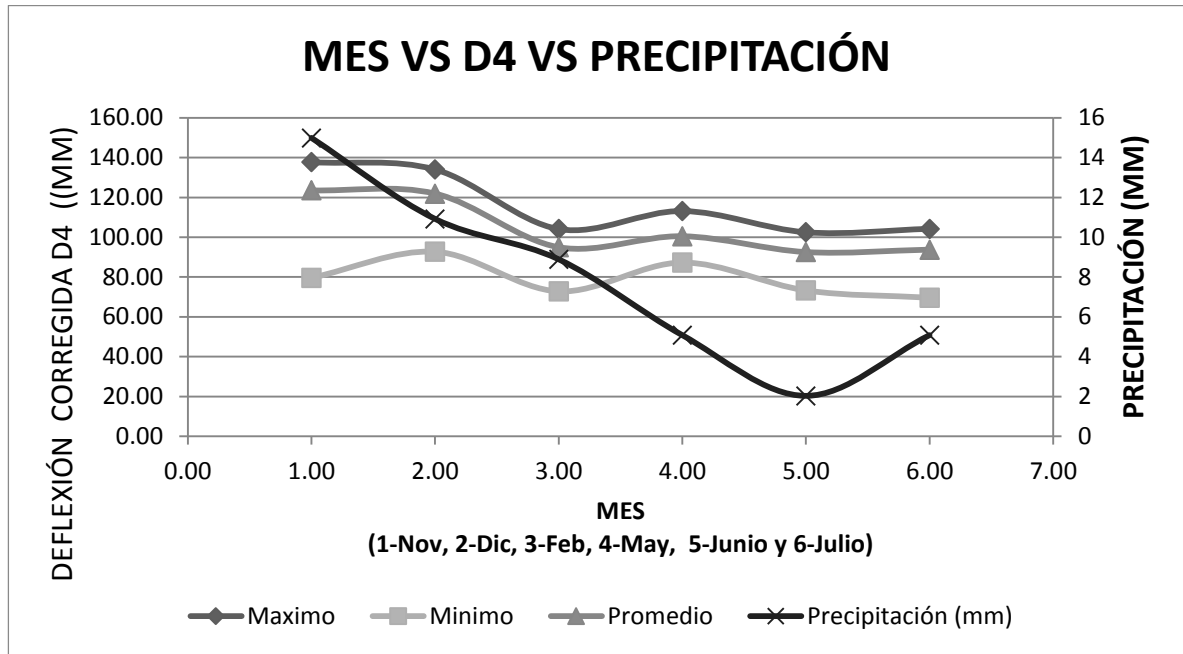
Fuente. Autor

Figura 32. Deflexión Corregida D4 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



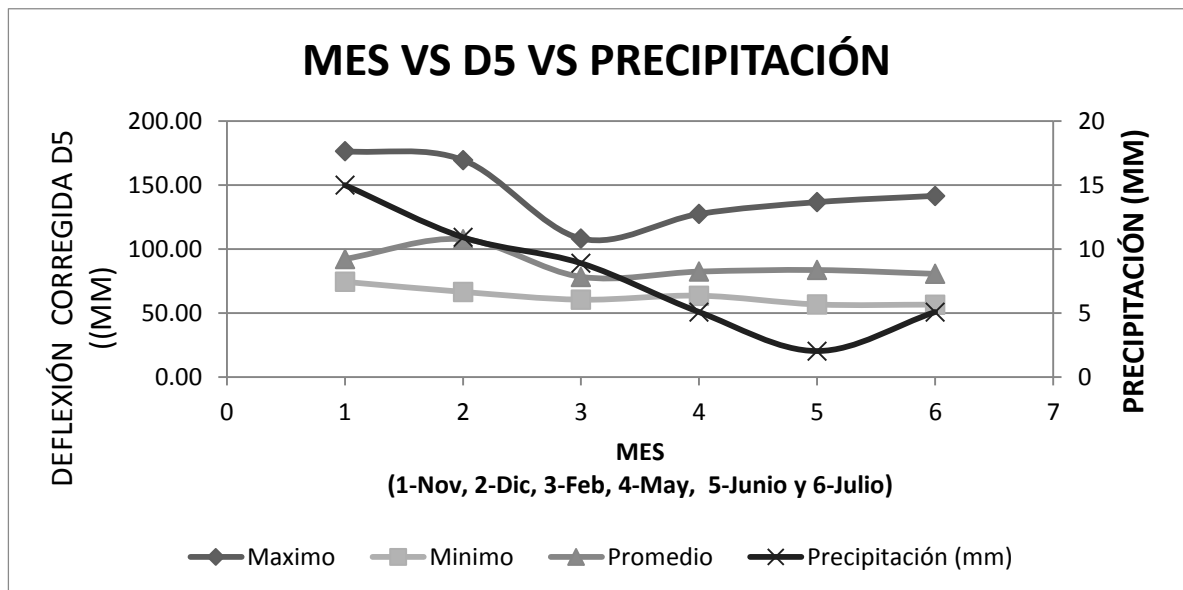
Fuente. Autor

Figura 33. Deflexión Corregida D4 (µm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



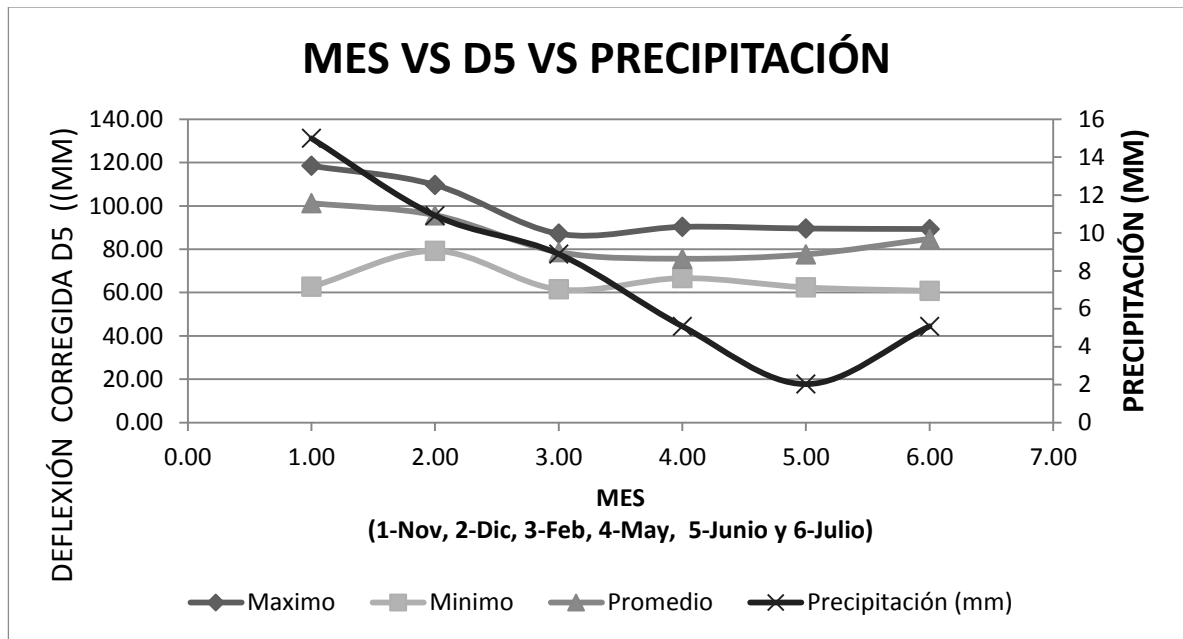
Fuente. Autor

Figura 34. Deflexión Corregida D5 (µm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



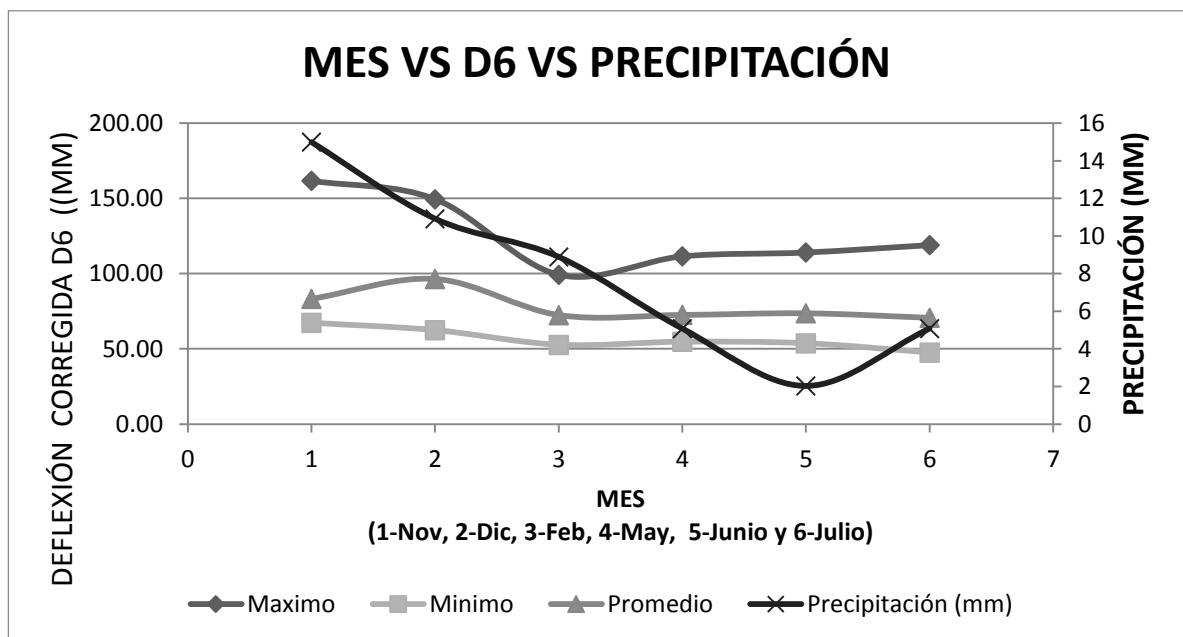
Fuente. Autor

Figura 35. Deflexión Corregida D5 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



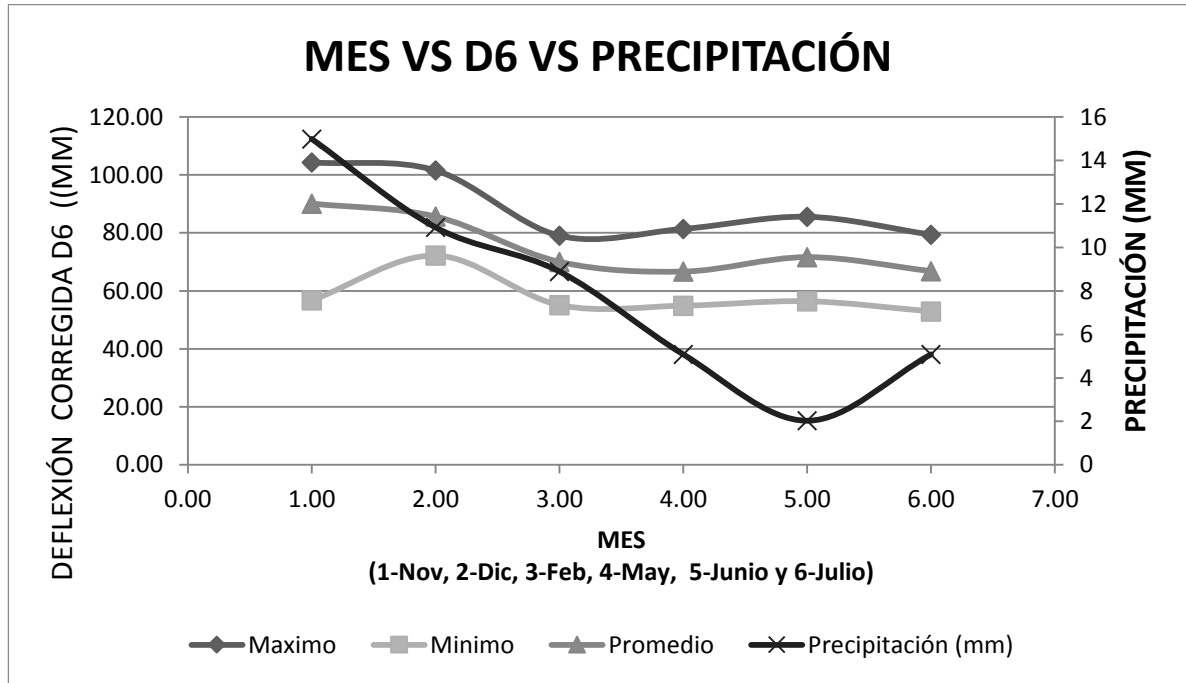
Fuente. Autor

Figura 36. Deflexión Corregida D6 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



Fuente. Autor

Figura 37. Deflexión Corregida D6 (μm) Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.

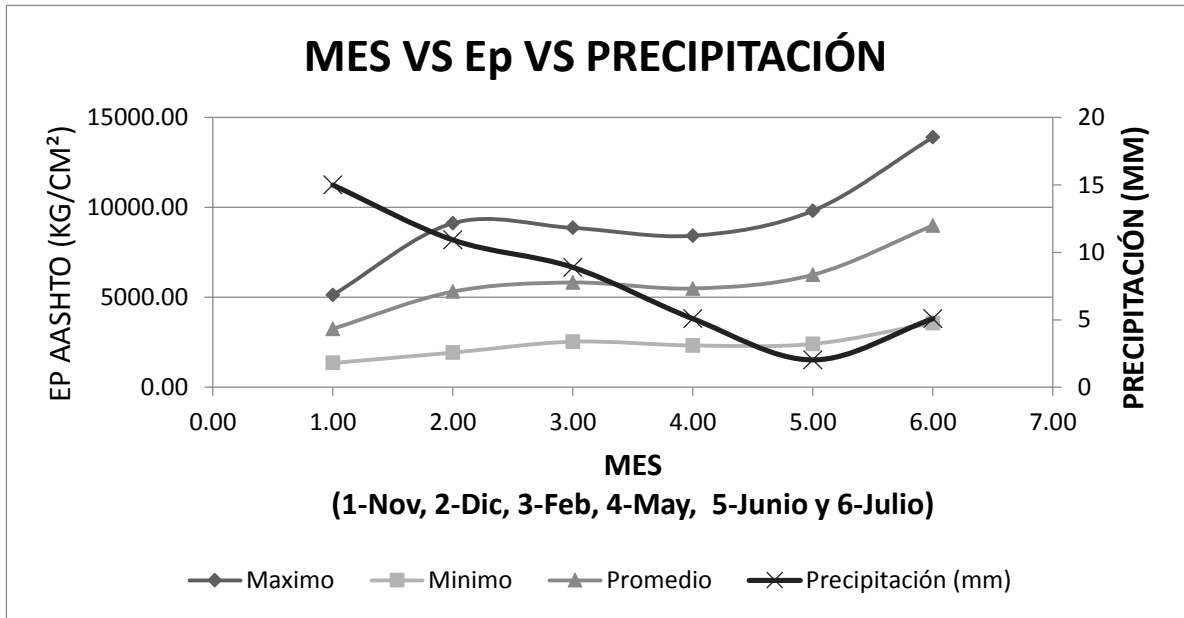


Fuente. Autor

En los gráficos anteriores se puede observar que a medida que hubo aumento en la precipitación, fueron aumentando así mismo las deflexiones en cada uno de los sismómetros.

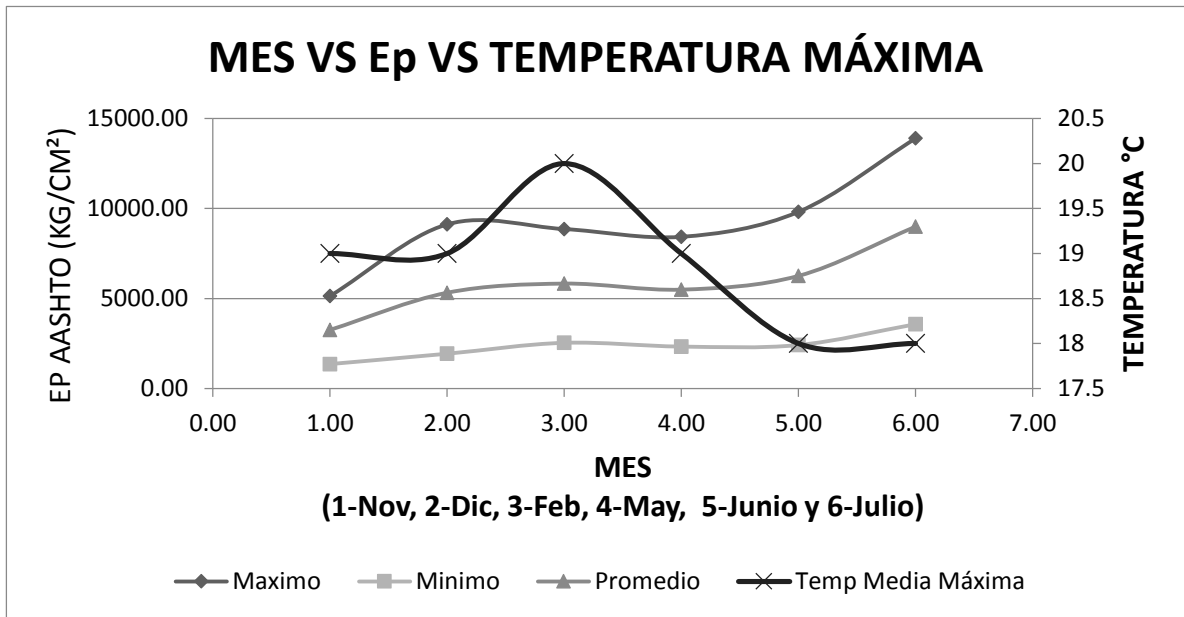
Por otra parte, se procedió a comparar las variables estructurales (M_r , E_p y S_{Neff}) en los mismos tres puntos (máximo, promedio y mínimo) vs el tiempo y la precipitación y vs el tiempo y la temperatura (ver anexo 11. Tablas de datos)

Figura 38. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho



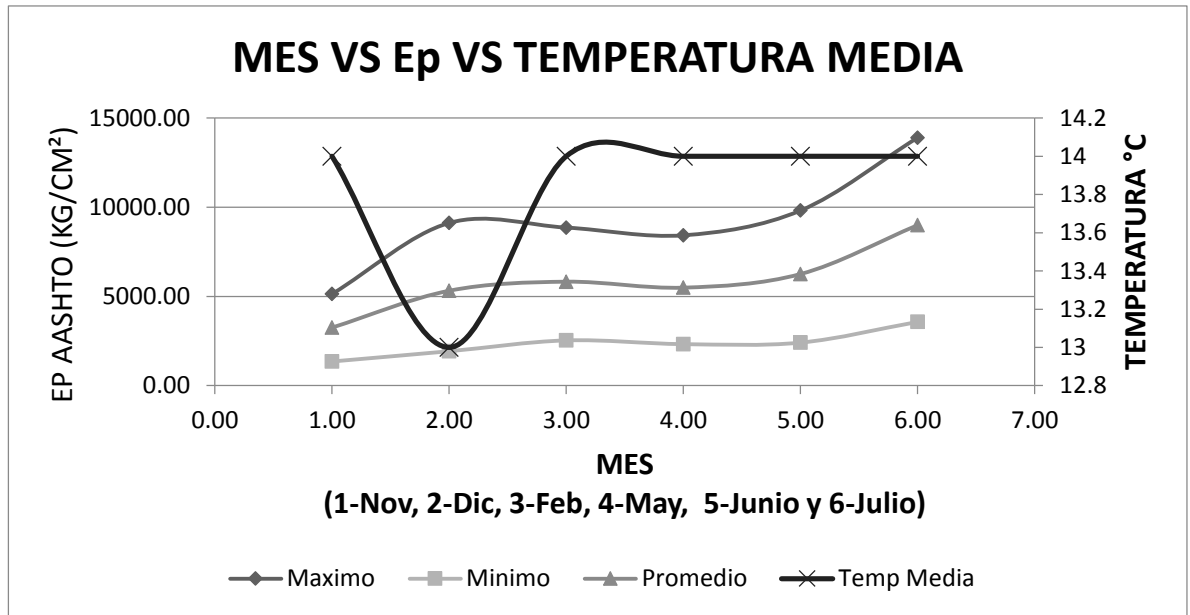
Fuente. Autor

Figura 39. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Derecho.



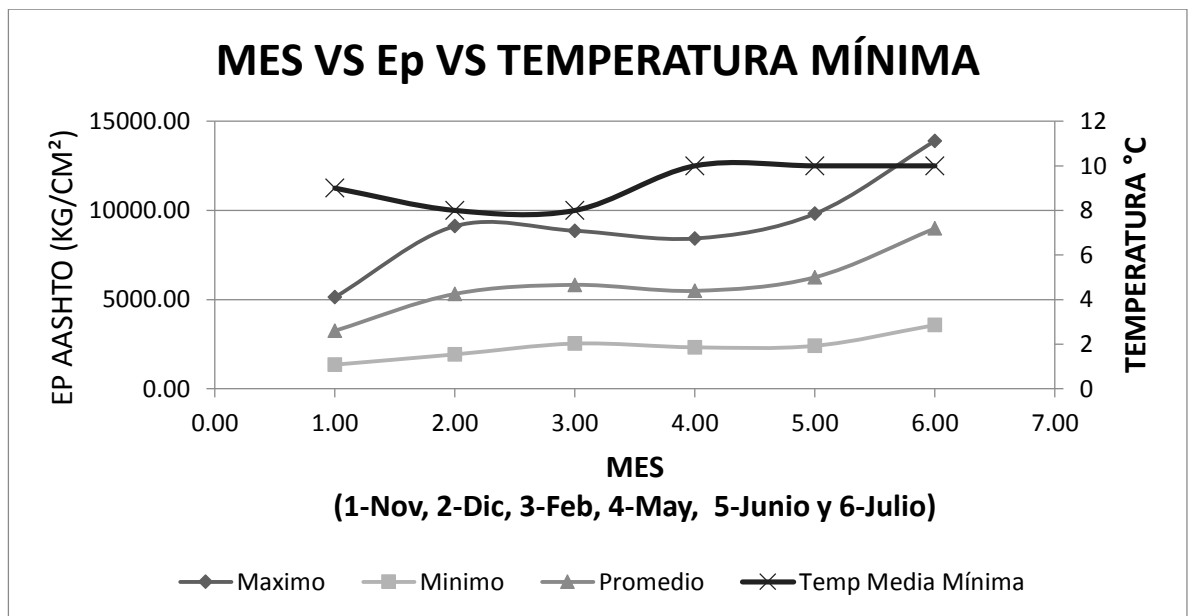
Fuente. Autor

Figura 40. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Derecho.



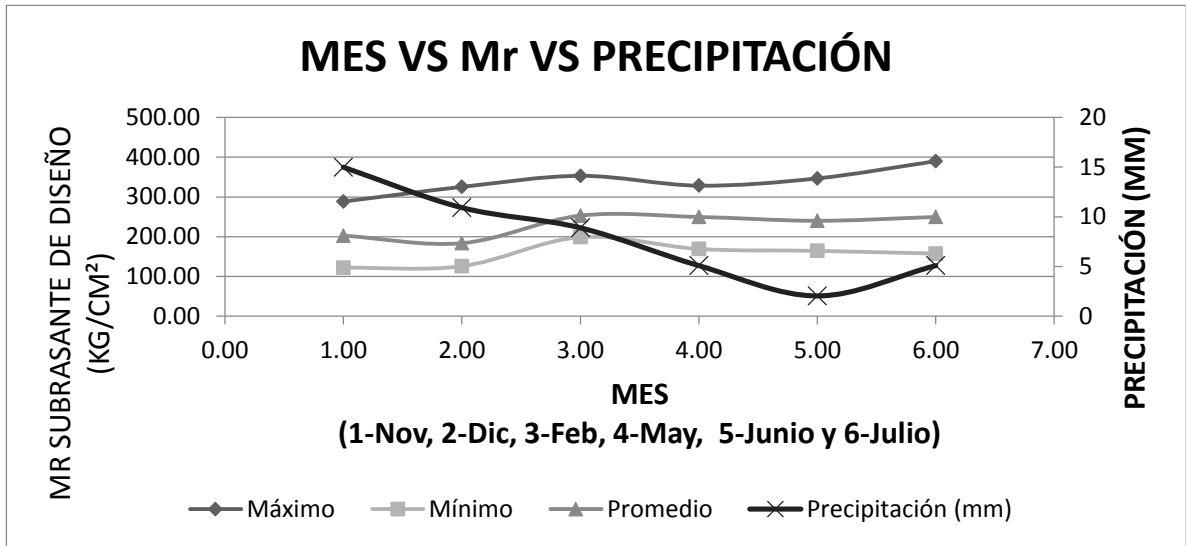
Fuente. Autor

Figura 41. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Derecho.



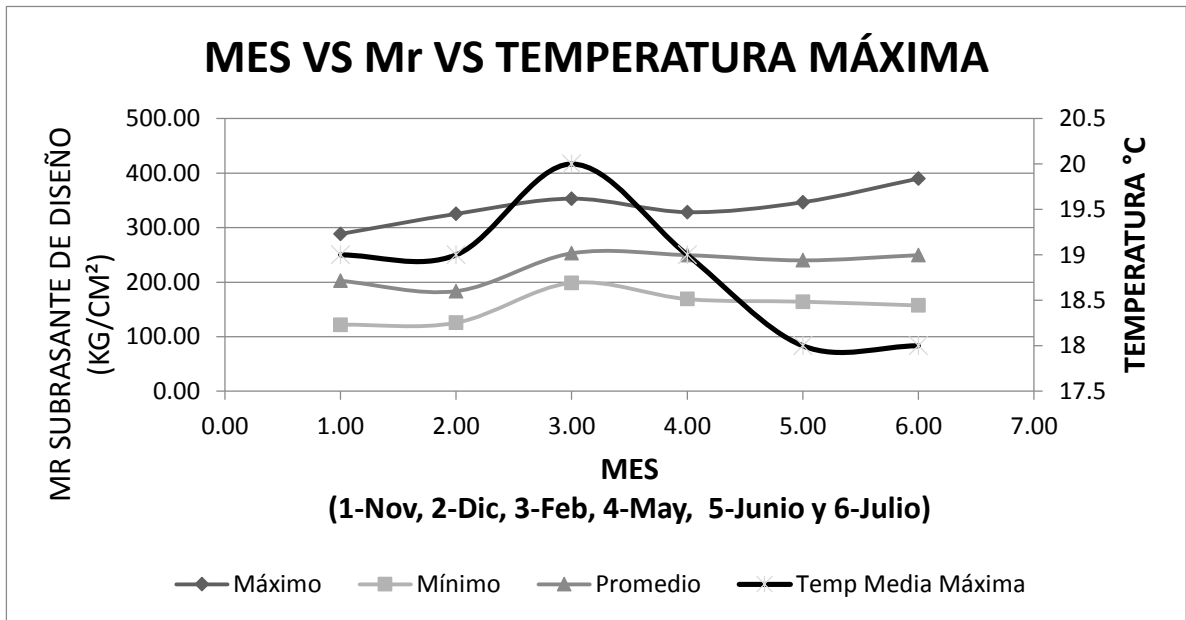
Fuente. Autor

Figura 42. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



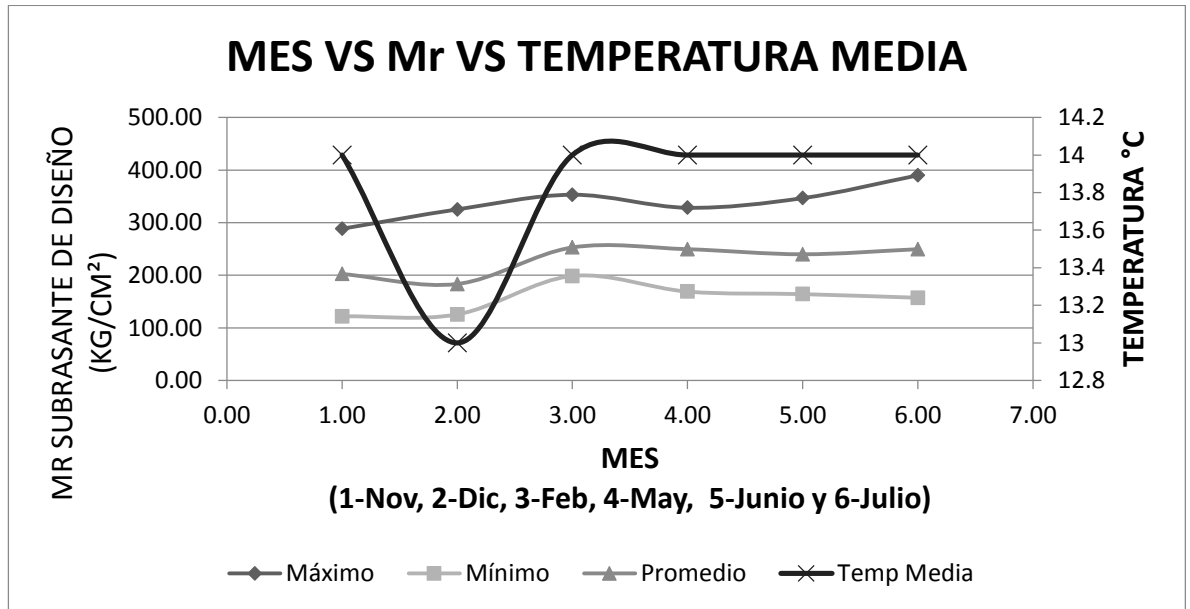
Fuente. Autor

Figura 43. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Derecho.



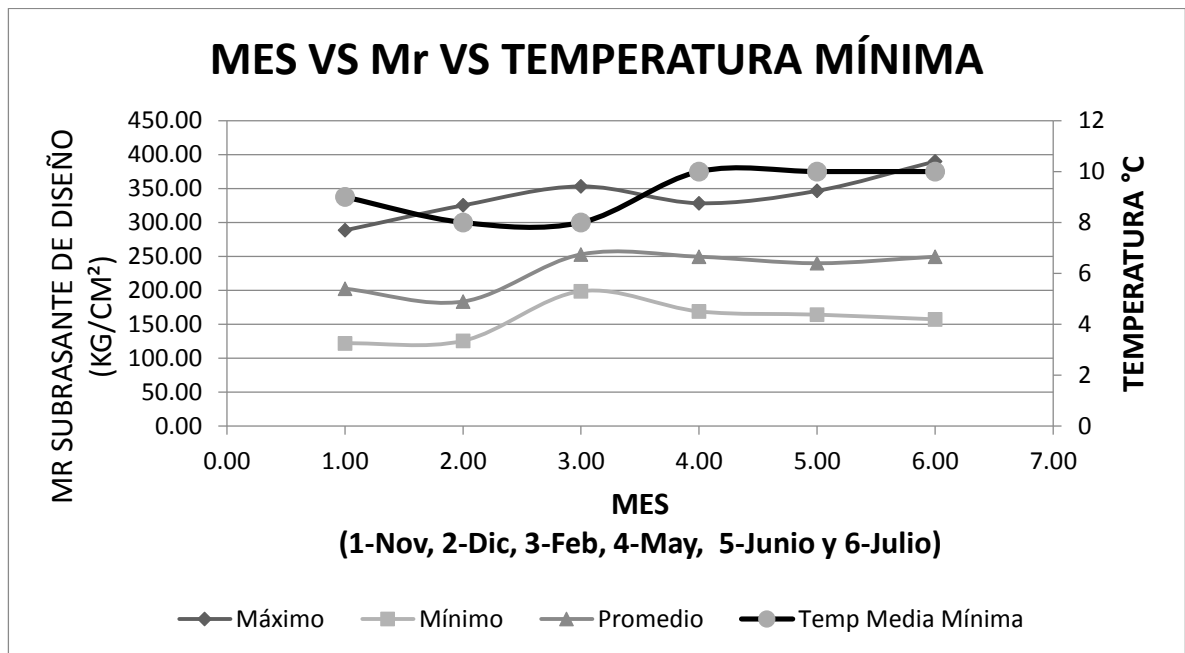
Fuente. Autor

Figura 44. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Derecho.



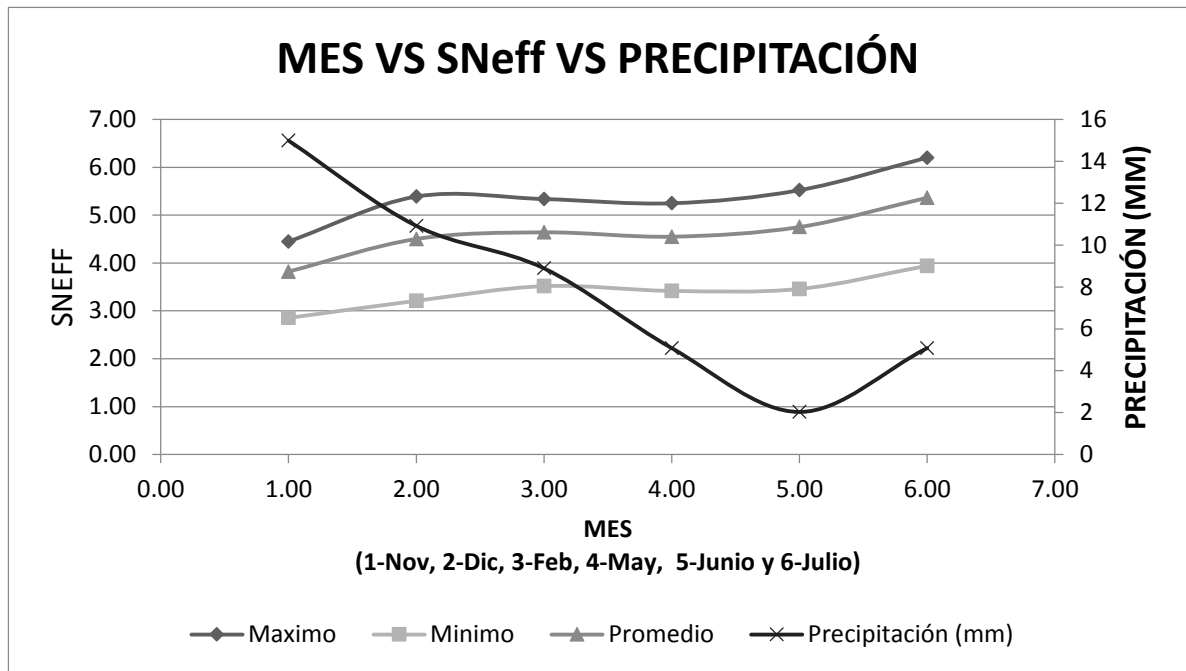
Fuente. Autor

Figura 45. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Derecho.



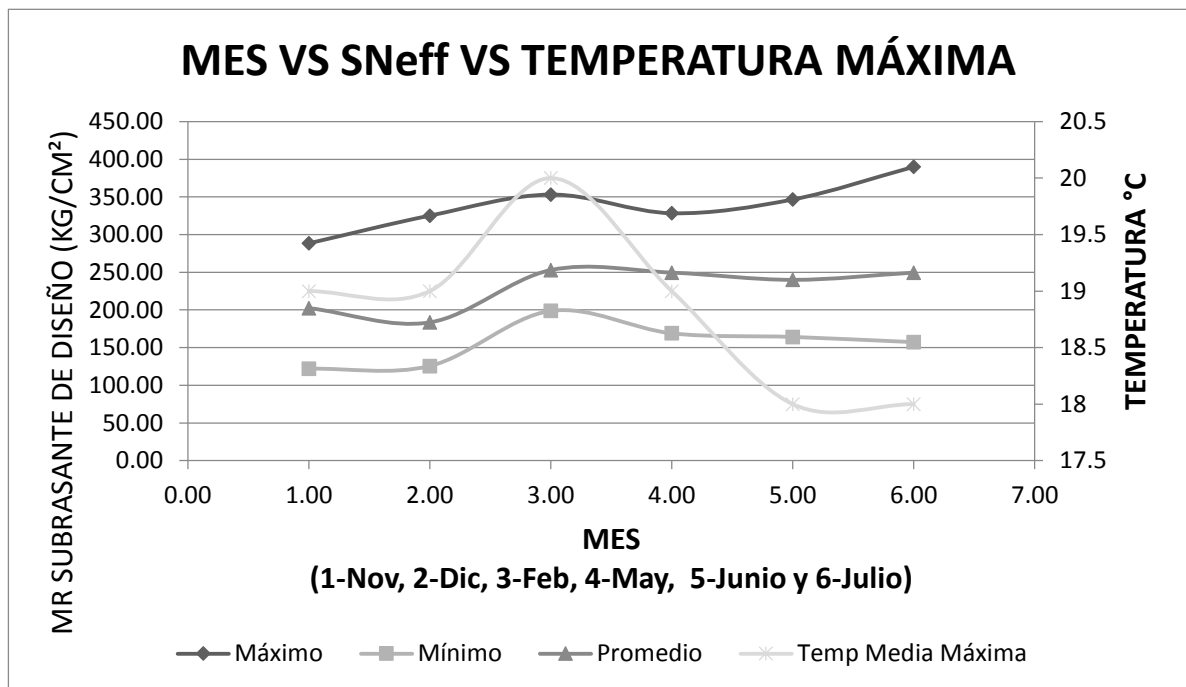
Fuente. Autor

Figura 46. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Derecho.



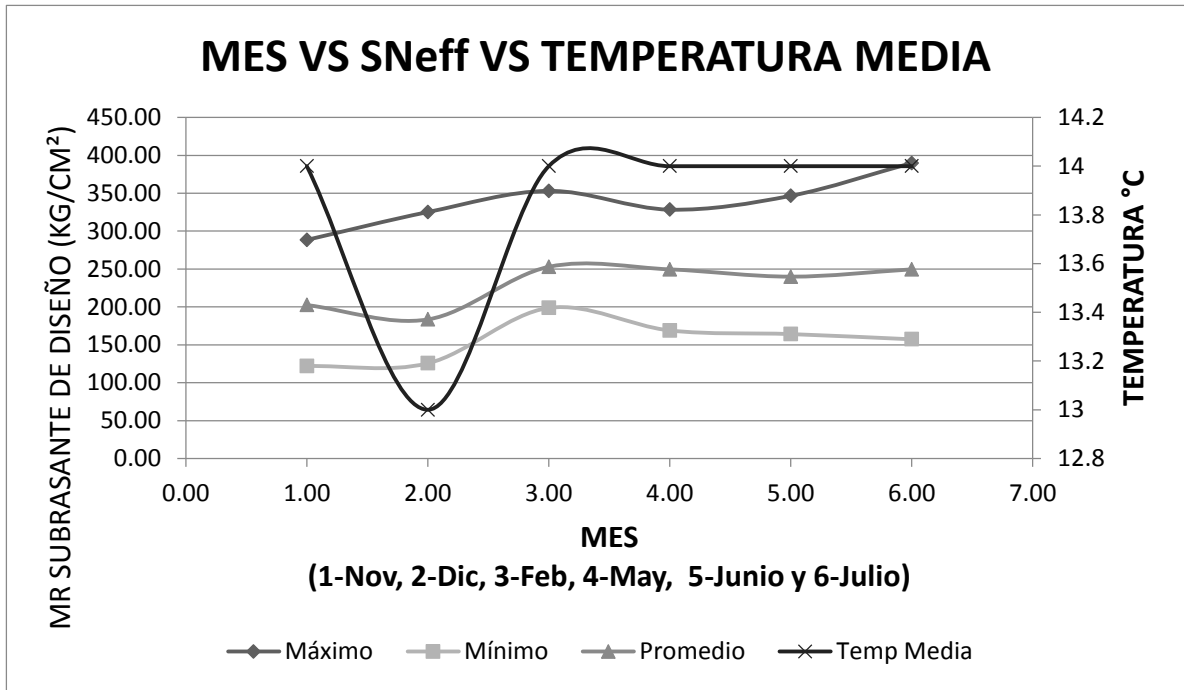
Fuente. Autor

Figura 47. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Derecho.



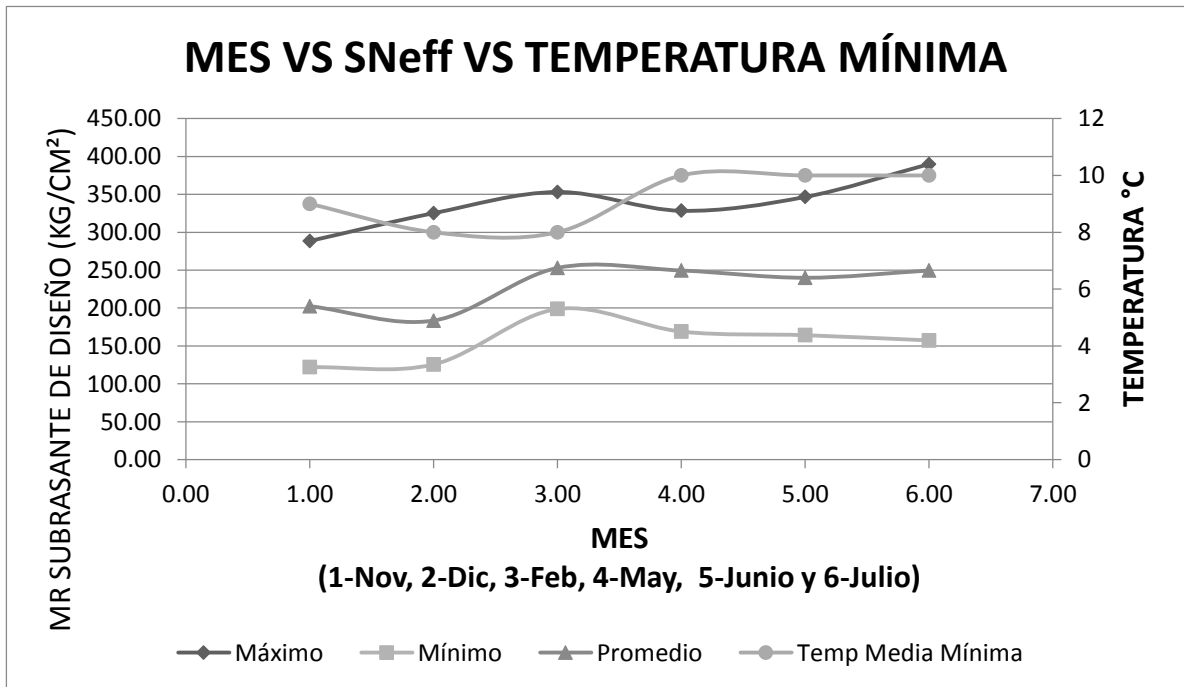
Fuente. Autor

Figura 48. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Derecho.



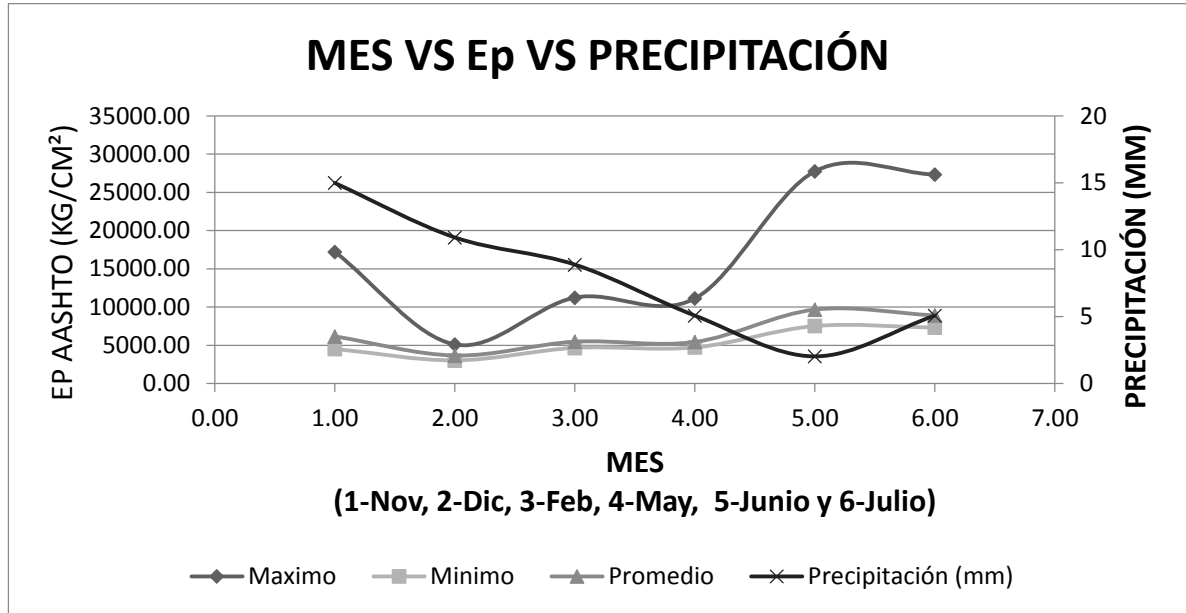
Fuente. Autor

Figura 49. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Derecho.



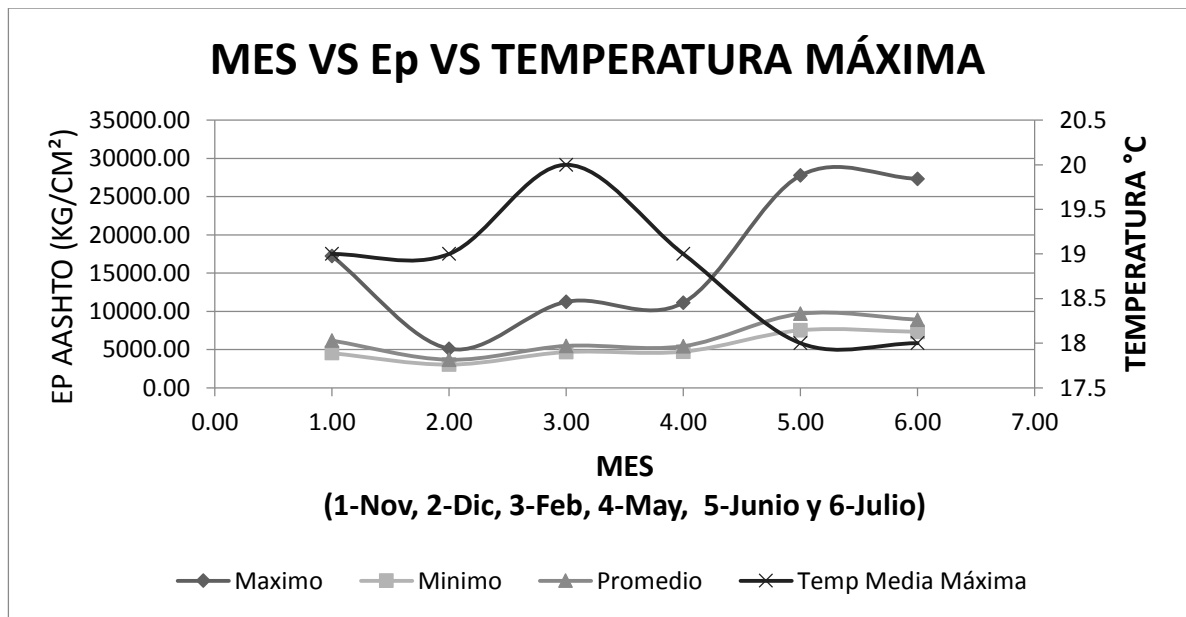
Fuente. Autor

Figura 50. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



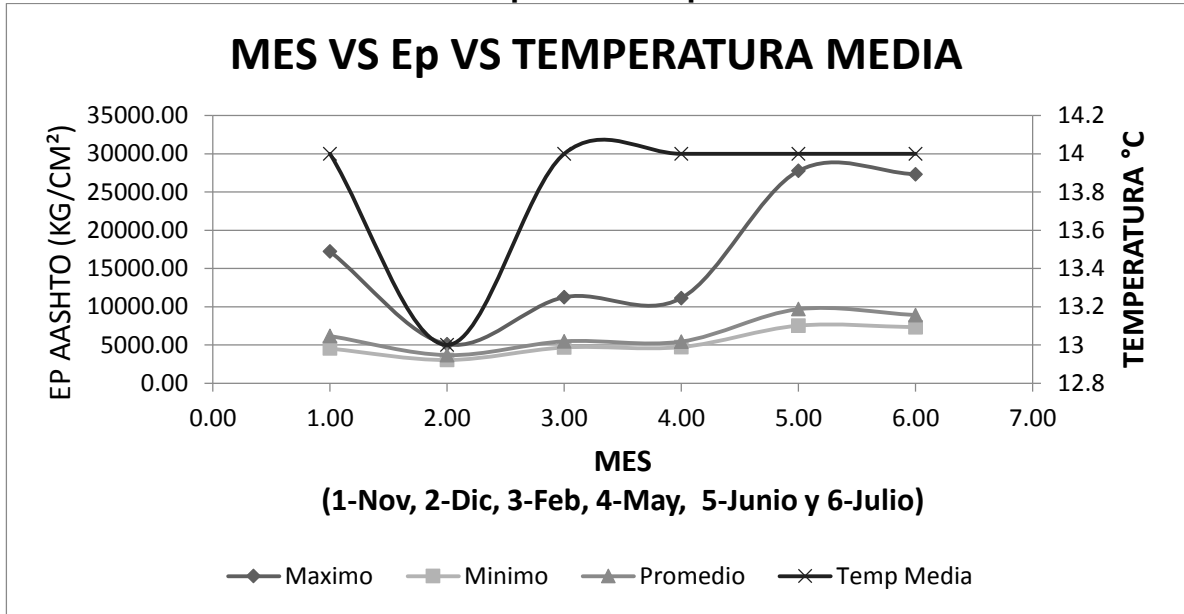
Fuente. Autor

Figura 51. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



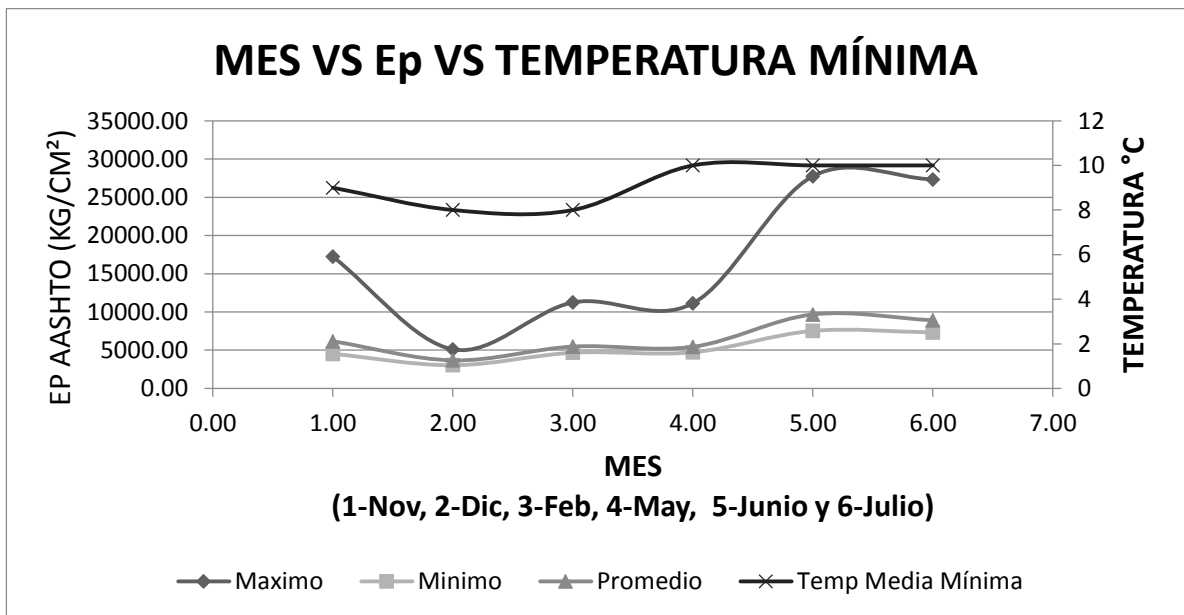
Fuente. Autor

Figura 52. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



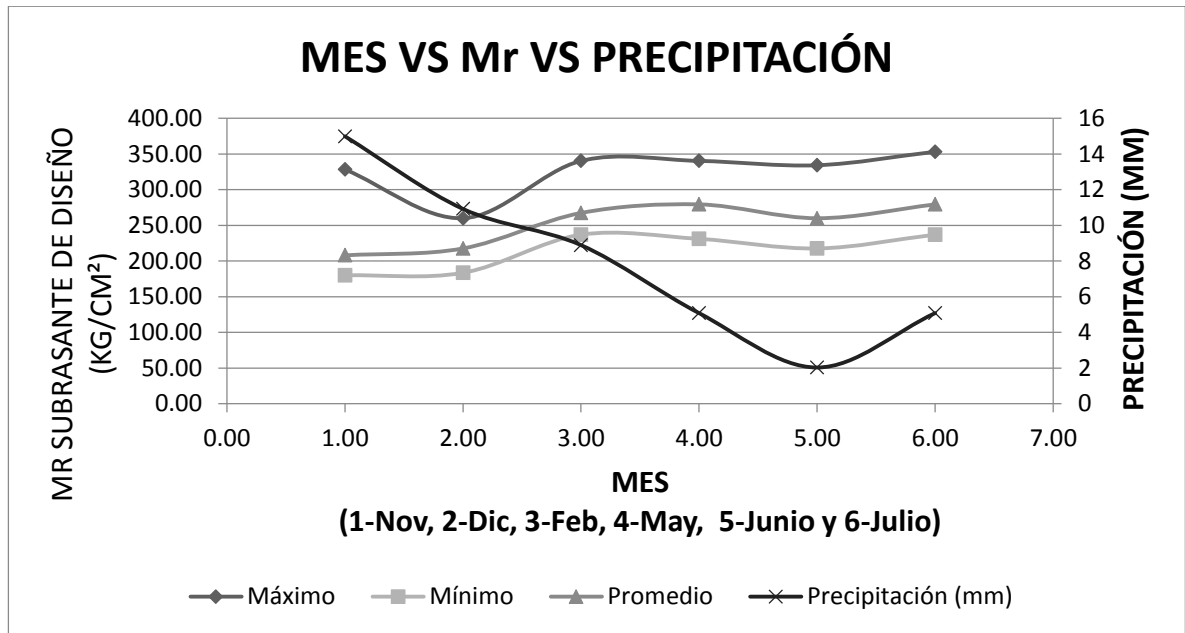
Fuente. Autor

Figura 53. Ep Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



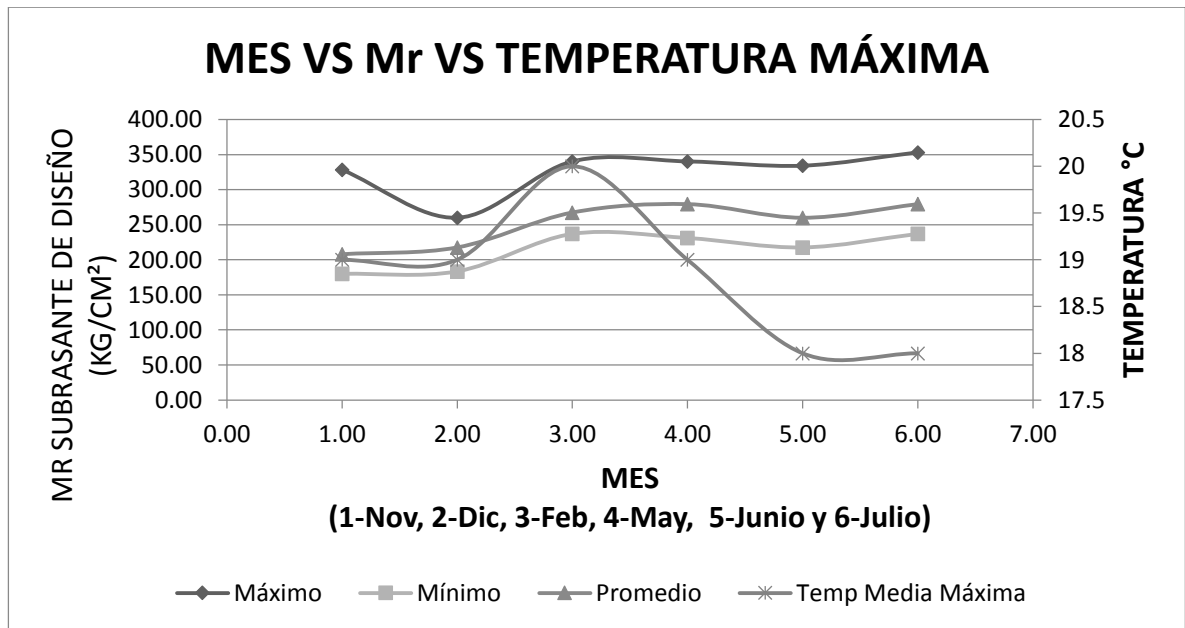
Fuente. Autor

Figura 54. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



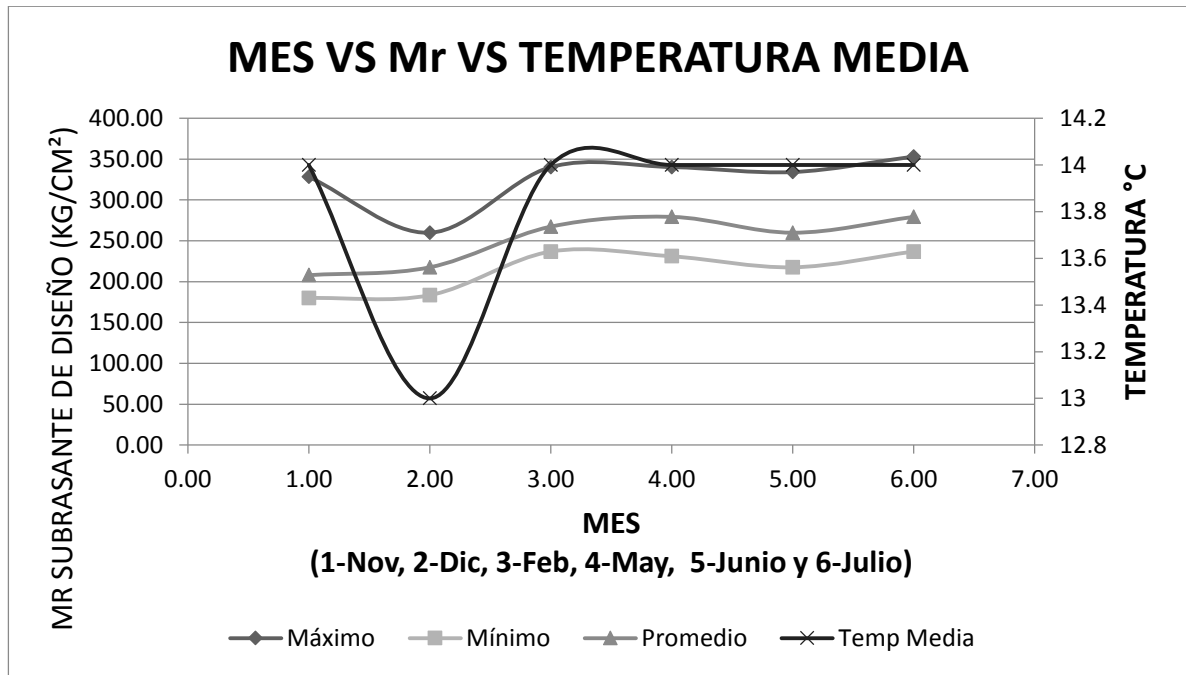
Fuente. Autor

Figura 55. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



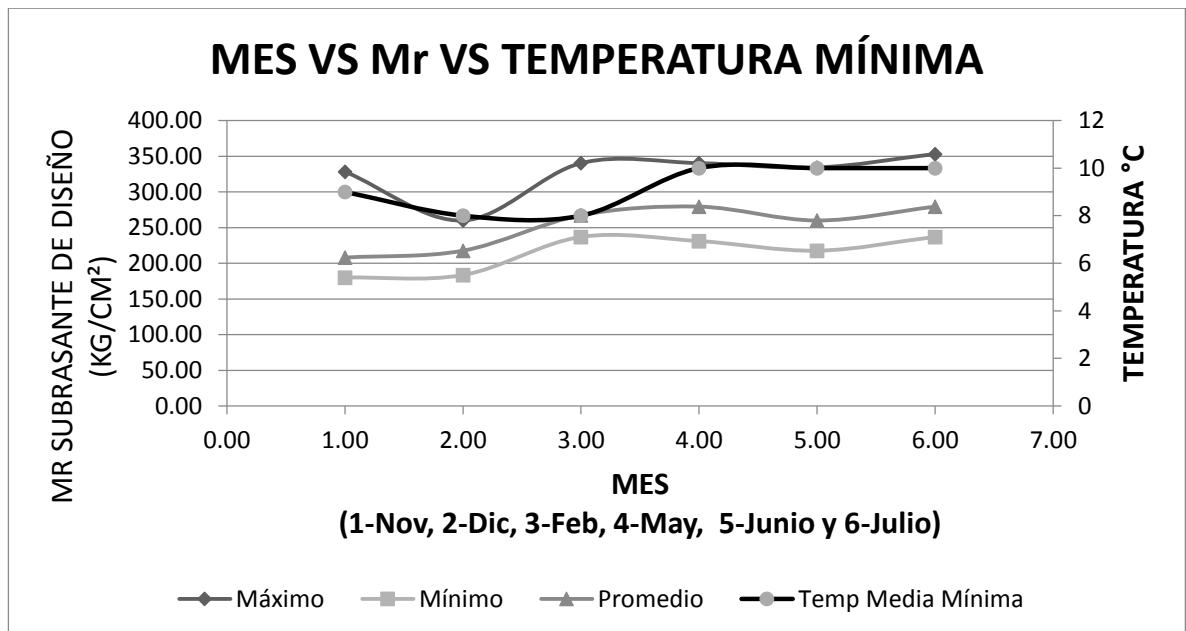
Fuente. Autor

Figura 56. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



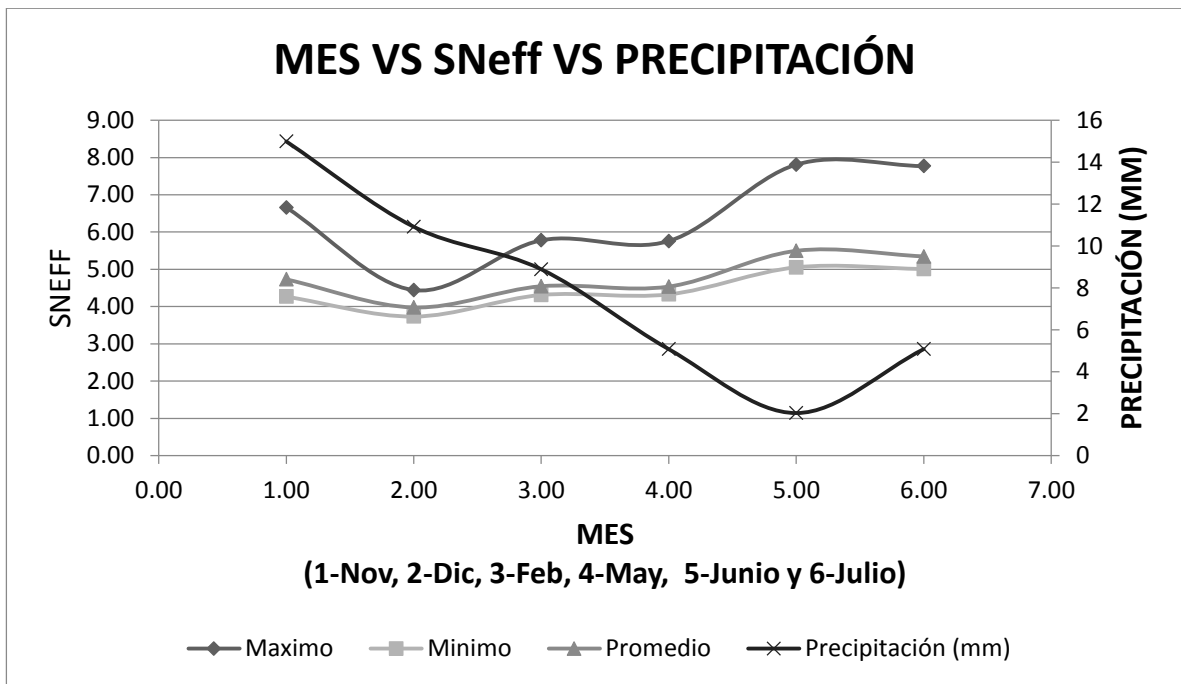
Fuente. Autor

Figura 57. Mr Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



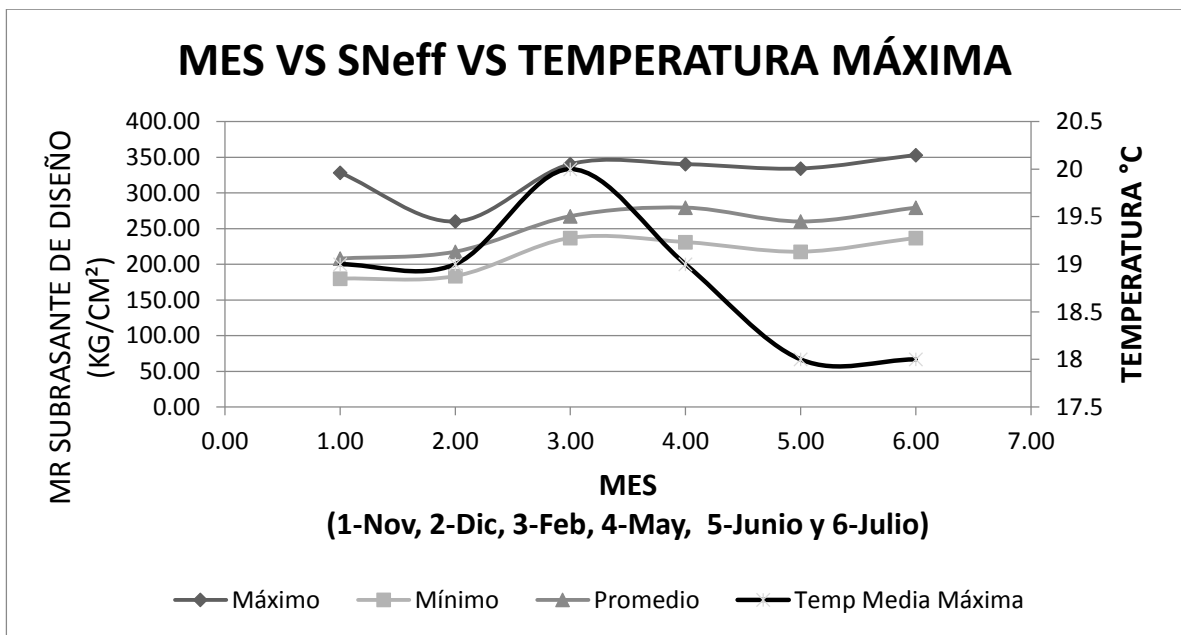
Fuente. Autor

Figura 58. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Precipitación a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



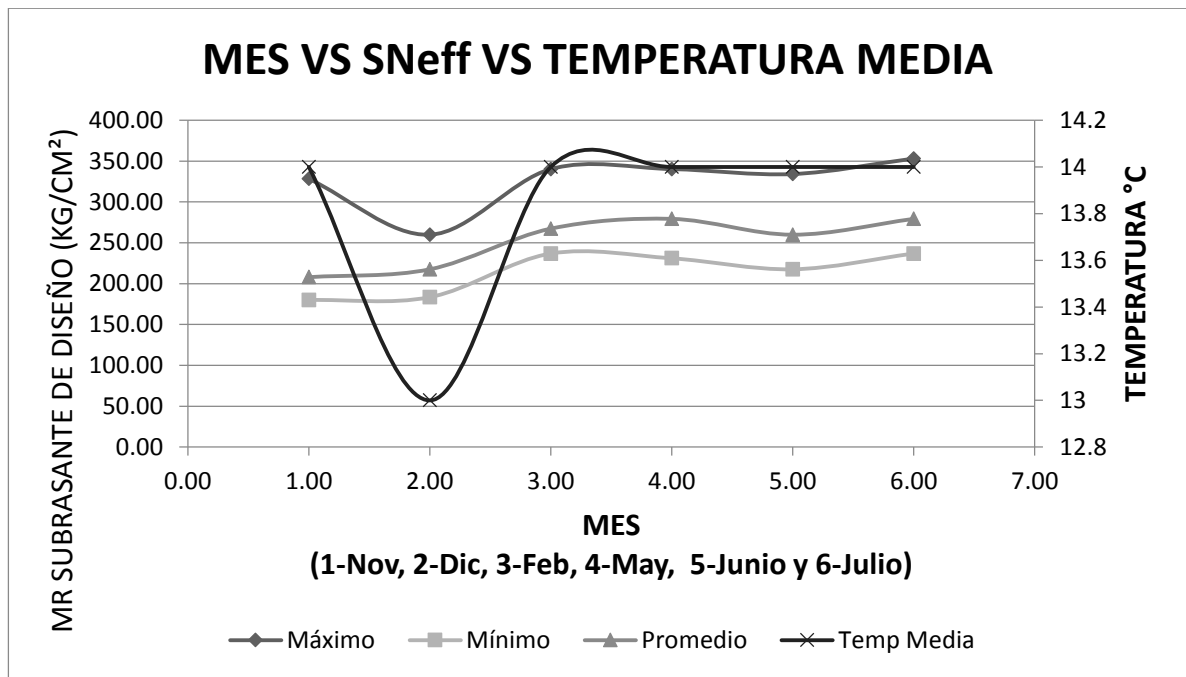
Fuente. Autor

Figura 59. SNeff Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Máxima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



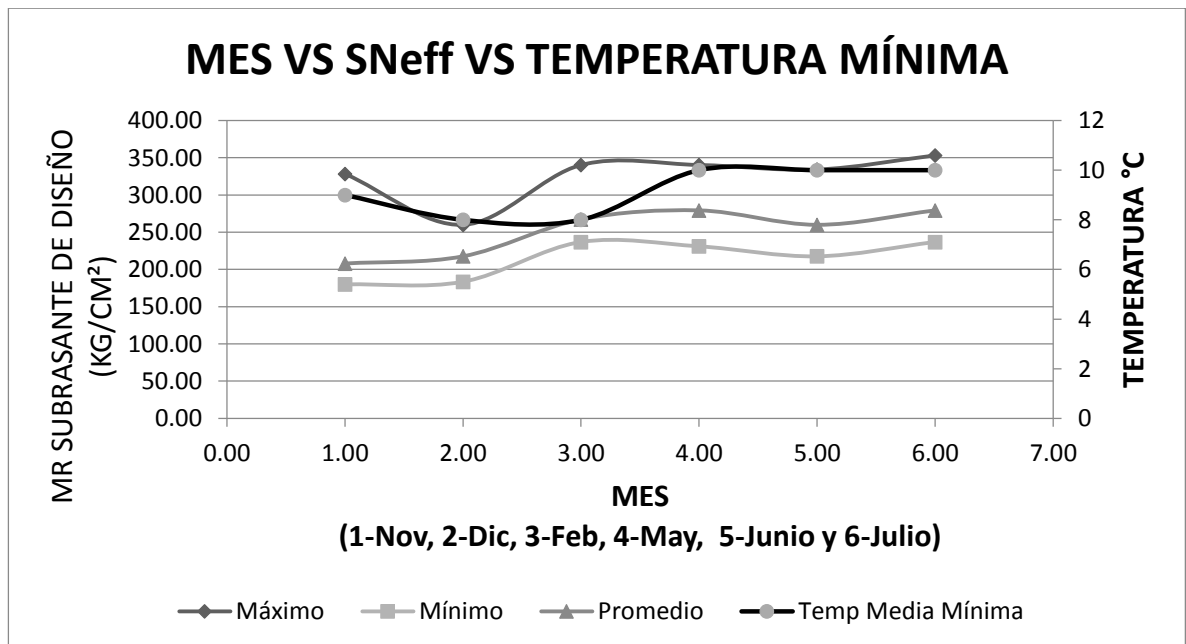
Fuente. Autor

Figura 60. S_{Neff} Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Media a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



Fuente. Autor

Figura 61. S_{Neff} Máximo Mínimo y Promedio Vs Temperatura Mínima a lo largo del tiempo Carril Izquierdo.



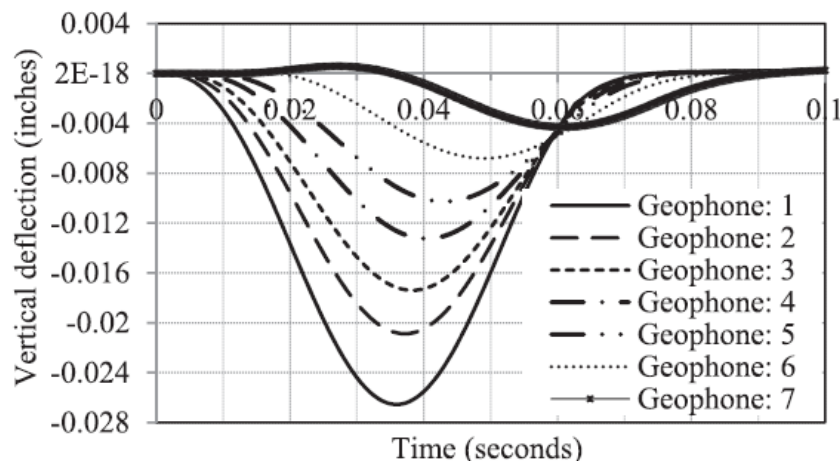
Fuente. Autor

Podemos observar que en los periodos que hubo aumento de la precipitación las deflexiones crecen, mientras los parámetros estructurales fueron disminuyendo

7.8 MODELAR Y COMPARAR LA CUENCA DE DEFLEXIÓN DINAMICA Y ESTÁTICA.

Para la comparación de la cuenca de deflexión dinámica y estática nos basamos en un artículo llamado “Modeling of the FWD Deflection Basin to Evaluate Airport Pavements (Rafiqul A. Tarefder, M.ASCE; and Mesbah U. Ahmed, S.M.ASCE)”, en el cual determina mediante un análisis de elementos finitos unos valores en los cuales muestran una variación de desviación el cual es dependiente del tiempo para siete (7) geófonos situados en diferente desplazamientos radiales. Se puede observar que la deflexión vertical aumenta con el tiempo hasta que alcanza su deflexión máxima, después de alcanzar el valor pico la deflexión comienza a disminuir. Esta tendencia es similar para todos los siete puntos de los sensores.

Figura 62. Historial Tiempo - Deflexiones de los Geófonos



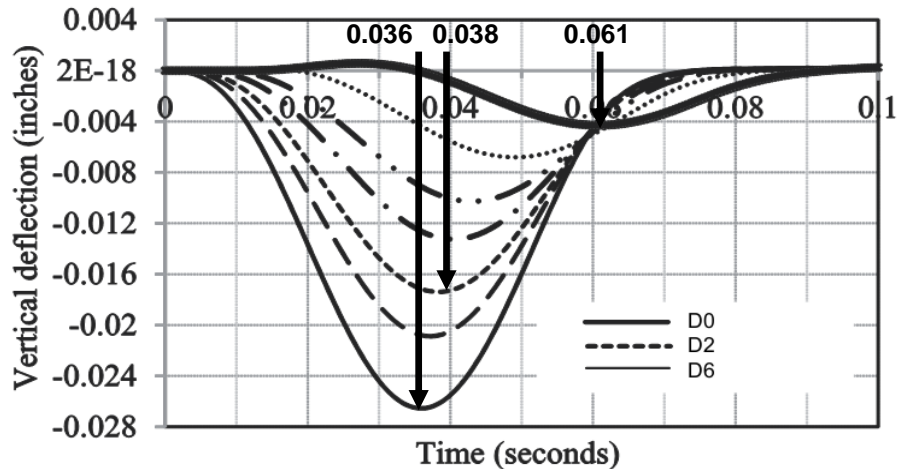
Fuente: International journal of geomechanics © ASCE / march/April 2014

Esto indica que la respuesta del pavimento es elástica, las deflexiones máximas de los geófonos están disminuyendo gradualmente con un aumento en la distancia, además el tiempo que transcurre entre las deflexiones máximas es insignificante para algunos geófonos cerca de la zona de carga. Sin embargo, esto se hace notable para el sensor más retirado de la zona de carga, esto es debido al tiempo de viaje de la onda de tensión.

De acuerdo a lo anterior se determinó con la ayuda de la Figura 62, hallar una magnitud en porcentaje la cual nos determine la diferencia de las deflexiones entre

los geófonos cuando cada una de estas es la máxima en un tiempo determinado así:

Figura 63. Muestra tomada para el análisis de las deflexiones.

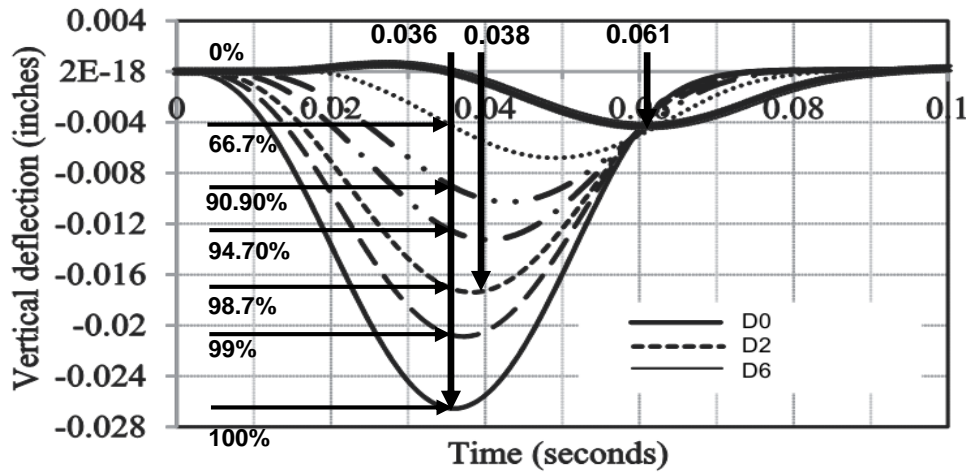


Fuente: International journal of geomechanics © ASCE / march/April 2014

Se determinó para nuestro análisis tomar tres geófonos D0 – D2 – D6, y se hallaron los porcentajes de la siguiente forma:

1. Ubicar la deflexión vertical máxima para los geófonos en estudio.
2. Trazar una línea desde el punto máximo de la deflexión hasta el eje del tiempo y hallar el valor.
3. Teniendo como referencia las deflexiones máximas dadas para los geófonos analizados, determinar los puntos de corte en las demás curvas de los geófonos, hallar el porcentaje de la deflexión en los puntos de corte para cada curva como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 64. Determinación del % de deflexión para los Geófonos con respecto a D0.



Fuente: International journal of geomechanics © ASCE / march/April 2014

4. Este mismo procedimiento se realiza para los dos siguientes geófonos.

Al realizar los pasos anteriores se en los tres geófonos se hallaron los siguientes datos:

Tabla 5. Deflexiones (μm) Noviembre de 2014 Carril Derecho.

Sismómetro	Deflexiones a tiempo 0.036 (Segundos) en D0	Deflexiones a tiempo 0.038 (Segundos) en D2	Deflexiones a tiempo 0.061 (Segundos) en D6
D0	100.00%	99.00%	17.60%
D1	99.00%	98.00%	22.50%
D2	98.70%	100.00%	26.70%
D3	94.70%	97.00%	35.70%
D4	90.90%	90.00%	45.50%
D5	66.70%	76.00%	66.70%
D6	0.00%	15.00%	100.00%

Para saber los valores nuevos de las deflexiones teniendo en cuenta los porcentajes hallados anteriormente, se tomaron los datos de las deflexiones para el carril derecho arrojados en la medición realizada en noviembre de 2014 sin procesar, para cada sismómetro (D0, D1, D2, D3, D4, D5 Y D6) como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Deflexiones (μm) Noviembre de 2014 Carril Derecho.

Carril	Abscisa	Deflexiones (μm) Noviembre de 2014						
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Derecho	K0+000	459	346	232	162	125	106	94
Derecho	K0+020	454	341	234	161	129	105	94
Derecho	K0+040	988	738	469	296	199	168	154
Derecho	K0+060	595	433	275	190	150	120	105
Derecho	K0+080	374	282	204	150	120	98	87
Derecho	K0+100	491	352	235	166	128	110	97
Derecho	K0+120	476	356	246	173	133	109	94
Derecho	K0+140	541	397	272	191	146	122	109
Derecho	K0+161	476	303	199	156	126	105	94
Derecho	K0+180	419	305	202	137	111	92	83
Derecho	K0+200	497	388	274	194	152	120	105
Derecho	K0+220	577	414	265	183	139	114	101
Derecho	K0+240	423	320	231	161	124	100	89
Derecho	K0+260	474	351	237	159	121	98	89
Derecho	K0+280	425	330	237	168	130	105	92
Derecho	K0+300	313	233	165	121	99	79	70
Derecho	K0+320	622	427	268	178	136	108	97
Derecho	K0+340	576	397	240	156	123	96	85
Derecho	K0+360	540	382	244	162	126	103	93
Derecho	K0+380	576	409	252	158	116	94	85
Derecho	K0+400	491	360	239	155	119	94	86
Derecho	K0+420	429	307	187	120	93	74	67
Derecho	K0+440	542	385	242	155	118	96	88

Se hallaron las deflexiones máximas para este carril en los datos obtenidos y se obtuvo que para este mes fue en la abscisa K0+040 como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 7. Deflexiones Máximas (μm) Noviembre de 2014 Carril Derecho.

Sismómetro	Deflexiones (μm) Máximas
D0	988
D1	738
D2	469
D3	296
D4	199
D5	168
D6	154

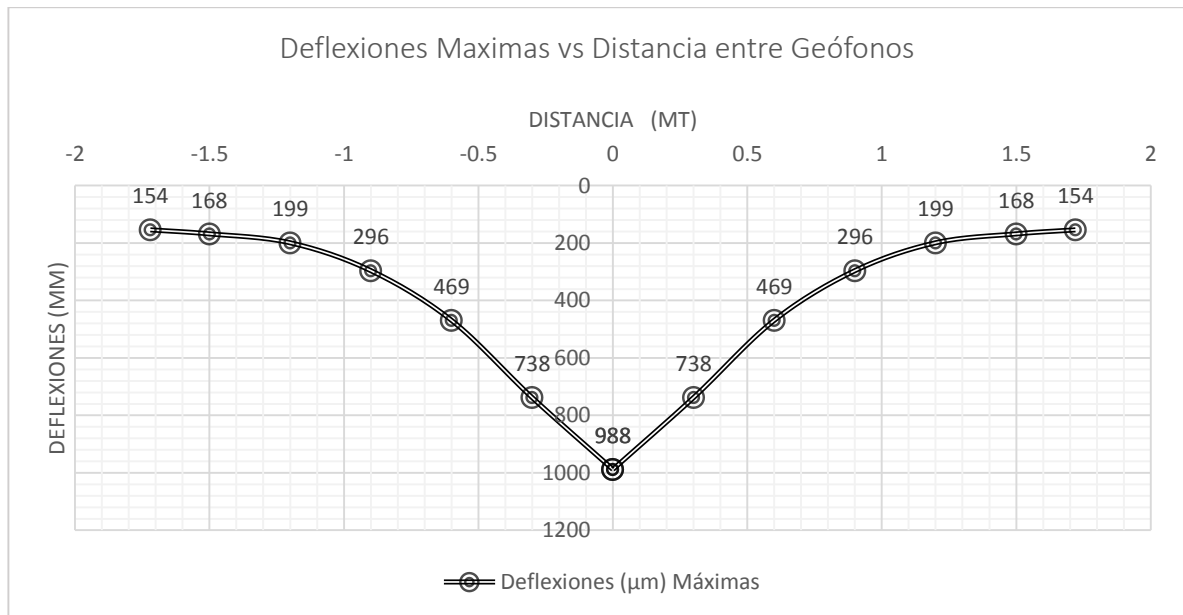
Obtenidas las deflexiones máximas y los porcentajes para los sismómetros en análisis, hallamos las nuevas deflexiones multiplicando las deflexiones máximas por el porcentaje cuando D0 – D2 – D6 son los máximos:

Tabla 8. Nuevas deflexiones D0 – D2 – D6.

Sismómetro	Distancia entre Sismómetros		Deflexiones (μm) Máximas	Deflexiones Cuenco de tiempo a 0.036 en D0		Deflexiones Cuenco de tiempo a 0.038 en D2		Deflexiones Cuenco de tiempo a 0.061 en D6	
				%	% x Deflexiones (μm) Máximas	%	% x Deflexiones (μm) Máximas	%	% x Deflexiones (μm) Máximas
D0	0	0	988	100%	988.00	99.00%	978.12	17.60%	173.89
D1	-0.3	0.3	738	99.00%	730.62	98.00%	723.24	22.50%	166.05
D2	-0.6	0.6	469	98.70%	462.90	100%	469.00	26.70%	125.22
D3	-0.9	0.9	296	94.70%	280.31	97.00%	287.12	35.70%	105.67
D4	-1.2	1.2	199	90.90%	180.89	90.00%	179.10	45.50%	90.55
D5	-1.5	1.5	168	66.70%	112.06	76.00%	127.68	66.70%	112.06
D6	-1.72	1.72	154	0.00%	0.00	15.00%	23.10	100 %	154.00

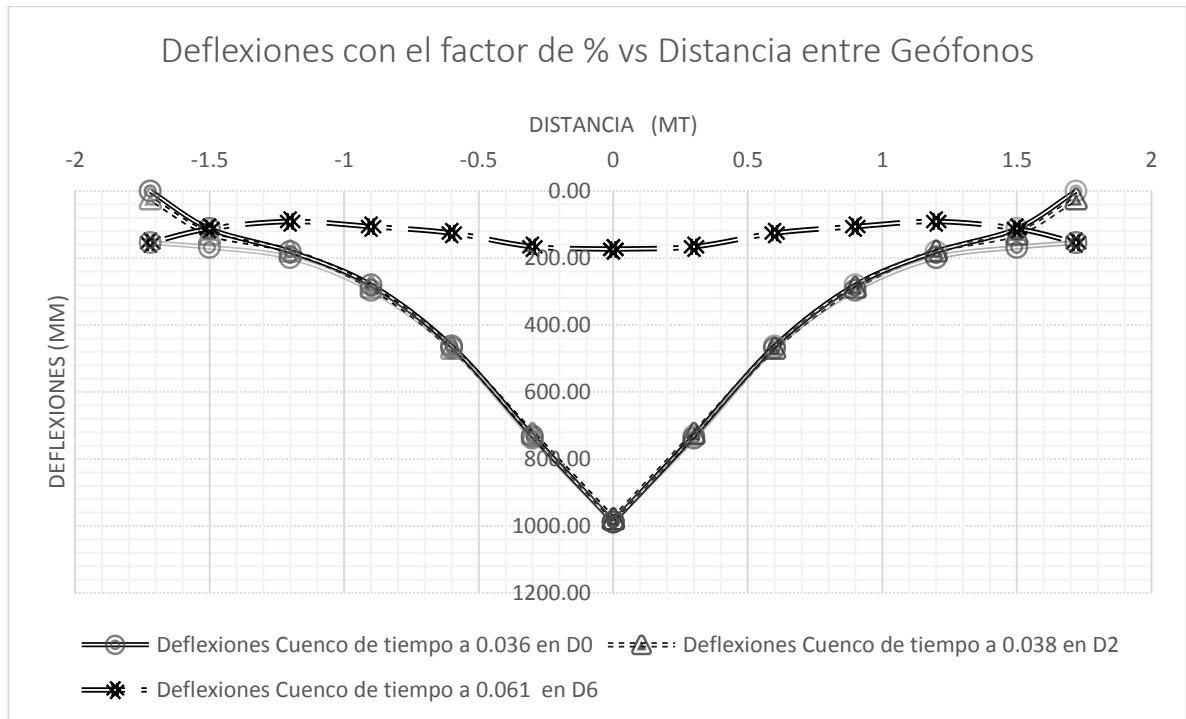
Con la tabla anterior se obtuvieron las siguientes figuras:

Figura 65. Deflexiones Máximas vs Distancia entre Geófonos.



Fuente. Autor

Figura 66. Deflexiones con el factor de % vs distancia entre Geófonos.



Fuente. Autor

Con las nuevas deflexiones hallamos las variables estructurales (M_r , E_p y S_{nef}) para realizar una comparación con las obtenidas directamente con el equipo:

Tabla 9. Variables estructurales para el mes de Noviembre.

Variables estructurales para el mes de Noviembre			
Abscisa	M_r Subrasante de diseño (Kg/cm ²)	E_p AASHTO (Kg/cm ²)	S_{nef}
K0+040	121.94	1352.72	2.85

Tabla 10. Variables estructurales para el mes de Noviembre con el factor de % determinado.

Variables estructurales para el mes de Noviembre con el factor de % determinado			
Abscisa	M_r Subrasante de diseño (Kg/cm ²)	E_p AASHTO (Kg/cm ²)	S_{nef}
K0+040	181.87	1170.88	2.72

De las tablas anteriores se puede analizar que los factores de las variables estructurales cambian de la siguiente forma:

1. Mr Subrasante de diseño hay un aumento del 49% del inicial.
2. Ep AASHTO hay una disminución del 13% del inicial.
3. Snef hay una disminución del 5% del Inicial.

Figura 67. Comparativo Variable Estructural Snef

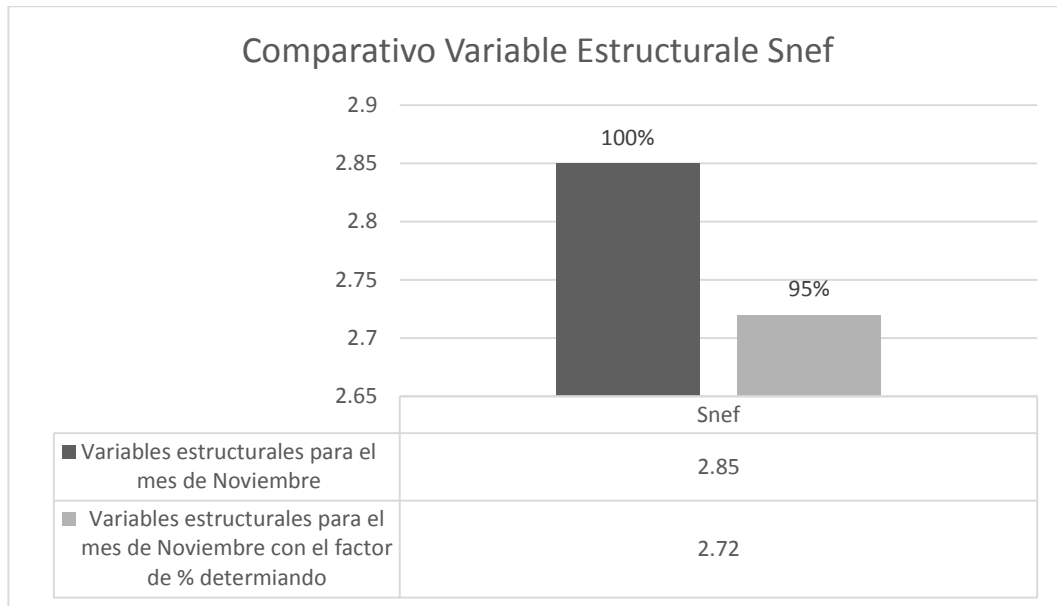
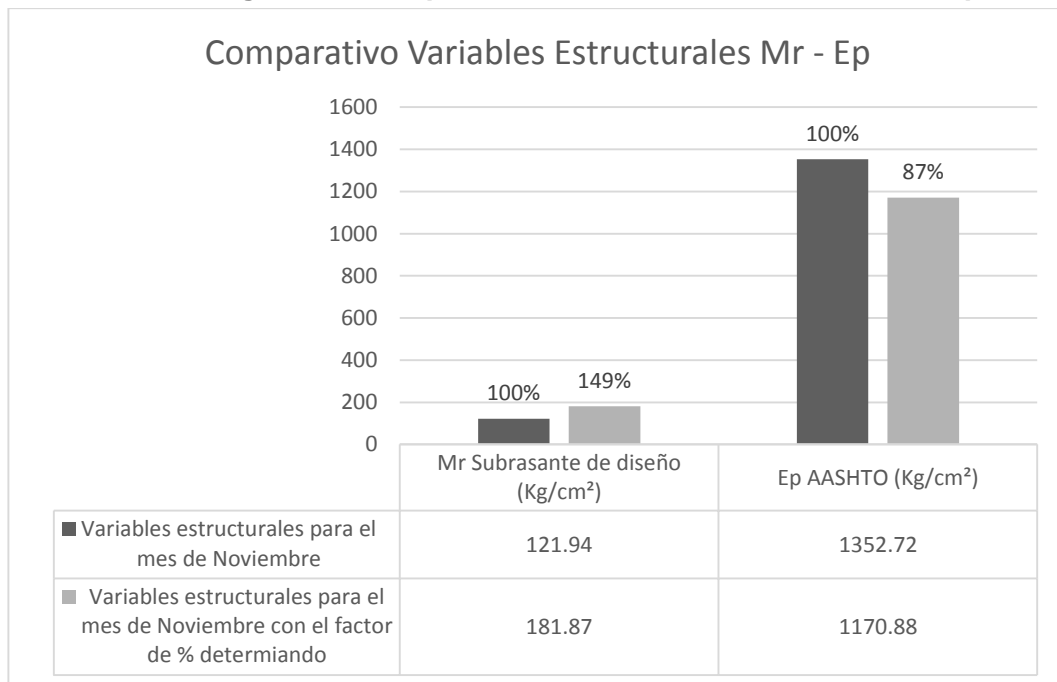


Figura 68. Comparativo Variables Estructurales Mr - Ep



8. CONCLUSIONES

- En el presente documento se consignaron los resultados de las mediciones con equipo FWD y cálculo de Deflexiones en la carrera 49 entre calle 102 A hasta la calle 105A, en la ciudad de bogota con una longitud de 440 mts. Se realizaron mediciones de deflexiones cada 20 m/Carril, a partir de los cuales mediante la metodología AASHTO se determinó el Módulo resiliente de la subrasante Mr, Módulo equivalente del pavimento EP y Número Estructural Efectivo SNEff.
- El Módulo Resiliente de la Subrasante por el carril derecho reportó un promedio de 240.10 kg/cm², un valor mínimo de 121.94 Kg/cm², y un máximo de 389.91 Kg/cm² y por el carril izquierdo un promedio de 316.76 kg/cm², un valor mínimo de 138 Kg/cm², y un máximo de 564.05 Kg/cm². Es importante considerar que estos valores reflejaron el comportamiento típico de materiales de la sabana de Bogotá. Se obtuvieron valores de número estructural efectivo entre 2.85 y 6.20 con un valor promedio de 4.38 en la calzada derecha y en la calzada izquierda entre 3.73 y 7.81 con un valor promedio de 5.00.
- Se analizó la variación del cuenco de deflexión en diferentes épocas del año, donde se observó la influencia de los efectos climáticos en la estructura de pavimento, debido a que se registra gran diferencia en las deflexiones de hasta 251 μm el máximo valor y la mínima diferencia es de 101 μm por el carril izquierdo y por el derecho 269.5 μm el máximo valor y el mínimo 118 μm , sin embargo se observarán sectores donde esta diferencia no es tan marcada.
- Al realizar la comparación con los resultados obtenidos del artículo "Modeling of the FWD Deflection Basin to Evaluate Airport Pavements

(Rafiqul A. Tarefder, M.ASCE; and Mesbah U. Ahmed, S.M.ASCE)” con los datos que nos arroja el ensayo con el FWD, existe variación en los resultados del Mr, EP y SNef, los resultados de estos parámetros con el ensayo FWD son MR= 121,94, EP=1352,72 y el SNef= 2.85 y con la prueba según el artículo en mención son MR= 181.87, EP=1170.88 y el SNef= 2.72, se observó un aumento del 49% para el MR, una disminución para EP de 13% y para el SNef del 5% para una misma abcisa.

- La gráfica 62 nos muestra la forma de la cuenca de deformación cuando los sismómetros Do, el D2 y el D6 alcanza sus máximos valores, ninguna de estas cuencas de deformación se parecen a la cuenca que tiene en cuenta el FWD, si aplicamos la metodología del FWD con estas diferentes formas de cuencas obtenemos valores de Mr diferentes a los hallados inicialmente por el FWD ya que estos valores están afectados por el tiempo que transcurre en llegar la deflexión máxima de cada sismómetros.

RECOMENDACIONES

- ✓ Las mediciones realizadas en la presente investigación, se realizarán durante fenómeno de la niña, se recomienda realizarlas durante el fenómeno del niño y así determinar la diferencia de las variaciones entre una y otra.
- ✓ Debido a que no fue posible determinar el proceso que realiza internamente el equipo para llegar al dato que arroja de deflexión, se recomienda investigar más afondo este tema, adicionalmente realizar la misma obtención de datos con equipos de otras marcas para verificar el comportamiento de los datos obtenidos.
- ✓ Se recomienda realizar el ensayo durante el periodo de un año con mediciones mensuales preferiblemente se realice a una misma hora, para tener en cuenta la variación de temperatura.
- ✓ Por otra parte realizar el ensayo en un (1) día a diferentes horas (6:00 a.m. – 12:00 m – 6:00pm - 12:00 p.m) con el fin de determinar el comportamiento de la deflexión durante un (1) día.

9. BIBLIOGRAFIA

- CORREDOR AMEZQUITA, Román Andrés y JIMENEZ HERRERA, John Alexander. Modelación inversa de estructura de pavimento. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.2006.p9
- CORREDOR AMEZQUITA, Román Andrés y JIMENEZ HERRERA, John Alexander. Modelación inversa de estructura de pavimento. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.2006.p10
- HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. 2009. P. 74.
- HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. 2009. P. 76
- HOFFMAN, Mario S. y DEL AGUILA, Pablo M. Estudios de Evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos): Ingenieros Consultores, 1085.p 2.
- HOFFMAN, Mario S. y DEL AGUILA, Pablo M. Estudios de Evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos): Ingenieros Consultores, 1085.p 3.
- <https://www.google.es/maps/@4.6898133,74.0601939,3a,75y,22.41h,58.31t/data=!3m4!1e1!3m2!1sQYEI-PDQdM0rATHxIEuMQQ!2e0>
- LEAL NORIEGA, Mario Helberto. Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. 2010.p 31.
- LEAL NORIEGA, Mario Helberto. Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocálculo y el encontrado en ensayos de laboratorio. Universidad Nacional de Colombia. 2010.p 28
- PEREZ SALAZAR, Alfonso. GARNICA ANGUAS. Paul. GOMÉZ LÓPEZ, José Antonio. y MARTINEZ PEÑA, Guadalupe Evangelina. Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos. Publicación Técnica No. 252, Sanfandila, Qro, 2004.

- THENOUX Z, Guillermo, HALLES A, Felipe y GONZÁLEZ V, Álvaro. Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. Centro de Ingeniería e Investigación vial, DICTUC S.A, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2002.p.1
- ZORNOSA PRIETO, Carlos Felipe .Reseña Histórica, Editor del periódico "Pasadena mi Barrio". Abril 2013.

ANEXOS