

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Cuantificación del Desplazamiento de Suelo por Efecto de Escorrentía y Tránsito  
de Vehículos en un Camino Forestal Secundario,  
en la Sierra la Martha, Arteaga, Coahuila.

Por:

**JOSÉ DANIEL LUNA FONTES**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO FORESTAL

Cuantificación del Desplazamiento de Suelo por Efecto de Escorrentía y Tránsito  
de Vehículos en un Camino Forestal Secundario,  
en la Sierra la Martha, Arteaga, Coahuila.

Por:

**JOSÉ DANIEL LUNA FONTES**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Gabriela Ramírez Fuentes

Asesor Principal



M.C. Melchor García Valdez

Coasesor



M.C. José Armando Nájera Castro

Coasesor



Dr. Gabriel Callejos Morales

Coordinador de la División de Agronomía



Coordinación  
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2016

Este trabajo no forma parte de ningún proyecto de investigación, ni fue apoyado con recursos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

## **DEDICATORIA**

### **A mis padres**

A ellos por demostrarme su cariño y su amor incondicional durante mi formación personal y profesional. Gracias por haber creído en mí y darme todo el apoyo indispensable para seguir adelante y tener el mejor regalo de mi vida.

José Raúl Luna Flores y Erika Fontes Cortes

### **A mis hermanos**

Por todo el apoyo y cariño que he recibido de ellos durante toda mi vida. ¡Hermanos! ! Muchas gracias por brindarme su amistad, sus consejos y sobre todo sus palabras de motivación que me han servido para estar de pie y seguir adelante.

José Antonio Luna Fontes, Francisco Luna Fontes, Raúl Alejandro Luna Fontes y Luis Ángel Luna Fontes,

### **A mi segunda familia**

Por todo su apoyo que me han brindado desde que los conocí hasta el momento. Espero que Dios los cuide mucho para seguir conviviendo el

tiempo que sea necesario, además muchas gracias por haberme dado su confianza, su amistad, su cariño y sobre todo por haber creído en mí a lo largo del tiempo.

Agustín Castro Ponce y Familia

Gracias por estar presente en mi vida y haberme brindado toda la confianza y el cariño durante el tiempo que hemos convivido. Te admiro mucho por el carácter fuerte que tienes para seguir adelante y porque sé que nunca te darás por vencida. Recuerda que tú eres alguien muy especial para mí y que siempre estarás presente.

Alejandra Castro Alonso

Ella es una gran persona que aprecio con mucho cariño por apoyarme y tener paciencia en los momentos buenos y difíciles durante mi formación profesional y personal. Muchas gracias por tus consejos e ideales que me sigues compartiendo

Lourdes Zendejas Juan

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios

Por darme conocimiento, paciencia y valor para seguir adelante en las situaciones fáciles y difíciles que se presentaron a lo largo de esta etapa, que ahora culmina.

A mi “Alma Mater” la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Por darme la oportunidad de entrar a la máxima casa de estudios y prepararme profesionalmente para desarrollar mi especialidad en el campo laboral. Gracias por haberme brindado todos los servicios de calidad durante mi estancia, lo cual genero un carácter competitivo y capaz.

A mis asesores:

A la Dra. Gabriela Ramírez Fuentes, por el apoyo, la dedicación, la asesoría y la motivación que me brindó durante mi estancia profesional en la Universidad, así como para realizar el presente trabajo. Muchas gracias

Al M.C. José Armando Nájera Castro, por el apoyo, la asesoría y la dedicación que me prestó para enriquecer el presente trabajo. Muchas gracias.

Al M.C. Melchor García Valdez, por el apoyo, la asesoría y las ideas que aportó para realizar el presente trabajo. Muchas gracias.

Al M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez por el apoyo y las asesorías que me brindó para realizar el presente trabajo. Muchas gracias.

A mis compañeros y amigos

A mis compañeros y amigos de la generación CXXI de la carrera de Ingeniero Forestal, por convivir con ellos durante los 5 años de esta etapa universitaria, además por brindarme su apoyo y su amistad en todos los momentos.

A Profesores e Investigadores

A todos los profesores-investigadores de la Carrera de Ingeniero Forestal por sus enseñanzas que me brindaron durante mi formación profesional.

A mis tíos

Marco Cortes Juárez y Maribel Angulo y primos, por la comprensión, la confianza, la motivación y el apoyo que me brindaron para seguir adelante. Muchas gracias los considero mi segunda familia.

Amigos-Colegas Guardas Forestales

A José Roberto Flores Dueñas y José Jonathan Flores Flores, por brindarme su confianza y ayudarme en el trabajo de campo. Muchas gracias.

Amigos

Gabriel, Uriel, Fernando A., Isait y Fernanda, Muchas gracias muchachos por acompañarme y brindarme su confianza en todos los momentos.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	x
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT .....	xiv
I. INTRODUCCION .....	17
1.1    Objetivos .....	18
1.1.1    Objetivo general.....	18
1.1.2    Objetivos específicos.....	18
1.2    Hipótesis .....	18
1.3    Justificación.....	20
II. REVISION DE LITERATURA .....	21
2.1    Suelo .....	21
2.1.1    Propiedades físicas .....	21
2.1.1.1    Textura .....	21
2.1.1.2    Estructura.....	22
2.1.1.3    Porosidad.....	22
2.1.2    Cualidades del suelo .....	23
2.1.2.1    Permeabilidad .....	23
2.1.2.2    Drenaje interno.....	24

2.1.2.3	Hidrofobicidad .....	24
2.2	Erosión .....	24
2.2.1	Erosión hídrica.....	25
2.2.1.1	Proceso de erosión .....	25
2.2.1.2	Factores de la erosión.....	26
2.2.1.3	Agentes de la erosión .....	27
2.2.1.4	Formas de erosión .....	27
2.2.1.4.1	Salpicamiento.....	28
2.2.1.4.2	Laminar .....	28
2.2.1.4.3	Surcos.....	28
2.2.1.4.4	Cárcavas .....	29
2.2.1.4.5	Remoción en masa .....	29
2.3	Vías de comunicación .....	29
2.3.1	Camino .....	30
2.3.2	Caminos forestales .....	30
2.3.2.1	Clasificación y características de los caminos forestales .....	30
2.3.2.1.1	Caminos primarios .....	31
2.3.2.1.2	Caminos secundarios.....	31
2.3.2.1.3	Caminos terciarios .....	32
2.3.2.2	Importancia de la administración de los caminos forestales .....	32
2.3.2.2.1	Planificación .....	33
2.3.2.2.2	Ubicación .....	34
2.3.2.2.3	Diseño.....	34
2.3.2.2.3.1	Obras de drenaje .....	34
2.3.2.2.3.1.1	Contracuneta .....	35
2.3.2.2.3.1.2	Cuneta .....	35
2.3.2.2.3.1.3	Alcantarilla .....	36
2.3.2.2.3.1.4	Vados .....	36
2.3.2.2.3.1.5	Puentes .....	36
2.3.2.2.4	Construcción de caminos .....	37
2.3.2.2.5	Mantenimiento del camino .....	37

2.3.2.2.5.1	Mantenimiento rutinario .....	38
2.3.2.2.5.2	Mantenimiento periódico.....	38
2.3.2.2.5.3	Mantenimiento de emergencia.....	39
2.3.2.2.6	Cierre del camino.....	39
2.4	Vulnerabilidad y pérdida de suelo en caminos .....	40
2.4.1	Importancia del control de erosión en caminos .....	40
2.5	Métodos para calcular la pérdida de suelo por erosión .....	41
2.5.1	Método de varillas o estacas marcadas.....	41
2.5.2	Parcelas de escurrimiento .....	42
2.6	Trabajos a fines.....	42
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	48
3.1	Descripción del área de estudio .....	48
3.1.1	Localización .....	48
3.1.2	Fisiografía.....	49
3.1.3	Geología .....	49
3.1.4	Edafología.....	49
3.1.5	Hidrología .....	50
3.1.6	Clima.....	50
3.1.7	Vegetación.....	50
3.1.8	Fauna.....	52
3.1.9	Metodología .....	54
3.1.9.1	Método de varillas modificadas .....	54
3.1.9.2	Análisis de suelo.....	55
3.1.10	Muestreo simple aleatorio o al azar simple .....	59
3.1.11	Tamaño de muestra.....	60
3.1.12	Análisis estadístico .....	61
3.1.13	Materiales utilizados .....	65
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	67

V. CONCLUSIONES .....	101
VI. RECOMENDACIONES.....	103
VII. LITERATURA CITADA.....	105
VIII. ANEXOS .....	113

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Principal vegetación en la región boscosa del sur de Coahuila.	48
2	Fauna representativa de los bosques de la Sierra de Arteaga, Coahuila.	49
3	Términos usuales para describir los intervalos del pH en el suelo.	56
4	VARIABLES evaluadas de la carpeta de rodamiento del camino motivo de estudio.	58
5	Rangos altitudinales del camino, volumen de suelo con desplazamiento negativo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	64
6	Rangos altitudinales del camino, volumen de suelo con desplazamiento positivo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	66
7	Exposiciones topográficas francas, volumen de suelo con desplazamiento negativo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	68
8	Exposiciones topográficas francas, volumen de suelo con desplazamiento positivo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	70
9	Rangos del diámetro de los agregados, porcentaje de	72

	agregados en la carpeta de rodamiento, volumen total de suelo desplazado e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	
10	Proporción de los componentes, denominación textural, pH, densidad aparente ( $\text{gr/cm}^3$ ), % de sólidos y % de poros del camino motivo de estudio.	73
11	Formas de erosión presentes en la carpeta de rodamiento del camino, volumen de suelo con desplazamiento negativo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	75
12	Formas de erosión presentes en la carpeta de rodamiento del camino, volumen de suelo con desplazamiento positivo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	77
13	Rangos de porcentaje en el centro del camino, volumen de suelo desplazado e intervalo de confianza para las proporciones estimadas.	79
14	Presencia de vegetación de 1 a 5 cm de altura en las “huellas” de las rodadas del camino.	80
15	Volumen de suelo desplazado (positivo y negativo) en los diferentes anchos del camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	82
16	Dirección de bombeo de la calzada del camino, volumen total de suelo con desplazamiento negativo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	83

Cuadro		Página
17	Dirección de bombeo de la calzada del camino, volumen total de suelo desplazado con desplazamiento positivo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	84
18	Porcentaje de recubrimiento en la calzada del camino, volumen total de suelo desplazado e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	87
19	Volumen de suelo con desplazamiento negativo de los rangos de la pendiente longitudinal (%) del camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	89
20	Volumen de suelo con desplazamiento positivo a lo largo de la pendiente longitudinal del camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	91
21	Rangos de pendiente transversal, volumen de suelo con desplazamiento negativo en el camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	92
22	Rangos de pendiente transversal, volumen de suelo con desplazamiento positivo en el camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	93
23	Volumen total de suelo con desplazamiento positivo y negativo en el camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Mapa de ubicación geográfica del camino motivo de estudio.	45
2	Triangulo de clases texturales básicas del suelo según el tamaño de partículas.	54
3	Volumen de suelo con desplazamiento negativo en los ocho rangos altitudinales presentes en el camino motivo de estudio.	63
4	Volumen de suelo con desplazamiento positivo en los ocho rangos altitudinales presentes en el camino motivo de estudio.	65
5	Volumen de suelo con desplazamiento negativo presente en las exposiciones topográficas francas del camino.	67
6	Volumen de suelo con desplazamiento positivo en las diferentes exposiciones topográficas francas del camino.	69
7	Volumen total de suelo desplazado en los porcentajes de agregados de la carpeta de rodamiento del camino.	71
8	Volumen total de suelo con desplazamiento negativo por la erosión hídrica presente en la carpeta de rodamiento.	74
9	Volumen de suelo con desplazamiento positivo hacia las diferentes formas de erosión presentes en la carpeta de rodamiento.	76
10	Volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) en el	78

centro del camino por efecto de la vegetación.

11	Volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) en el ancho del camino que están entre los 2.8 y 5.2 m.	81
12	Volumen total de suelo con desplazamiento negativo y positivo en direcciones de bombeo del camino.	85
13	Volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) por efecto del recubrimiento de la carpeta de rodamiento del camino.	87
14	Volumen de suelo con desplazamiento negativo a lo largo de la pendiente longitudinal del camino.	88
15	Volumen de suelo con desplazamiento positivo a lo largo de la pendiente longitudinal del camino.	90
16	Volumen de suelo con desplazamiento positivo y negativo en los rangos predominantes de la pendiente transversal del camino.	93
17	Volumen total de suelo desplazado (negativo y positivo) en el camino por efecto de la escorrentía superficial.	95

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Sub provincia fisiográfica Gran Sierra Plegada.	108
2	Los estados físicos de mezclas de suelos y agregados.	109
3	Perfiles transversales de las estaciones del camino con desplazamiento negativo de suelo.	110
4	Perfiles transversales de las estaciones del camino con desplazamiento positivo de suelo.	114
5	Imágenes que corresponden a la primera toma de datos en campo (finales de abril del 2015).	124
6	Imágenes que corresponden a la segunda toma de datos en campo (enero del 2016).	127

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objeto cuantificar el volumen ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ) de suelo con desplazamiento negativo y positivo (pérdida y acumulación) por efecto de la escorrentía y del tránsito de los vehículos en un camino forestal secundario, en la Sierra la Martha, Arteaga, Coahuila. El propósito de este estudio es valorar las especificaciones técnicas y características físicas del camino, para poder determinar el volumen de suelo con desplazamiento positivo y negativo, que se pueden presentar en un periodo de lluvias, que para este caso, dicho periodo está considerado como atípico por las precipitaciones que se registraron. Lo cual nos permitirá conocer el volumen desplazado y la forma en que se desplaza el suelo sobre la carpeta de rodamiento por efecto de la escorrentía superficial.

En esta investigación se utilizó un muestro simple aleatorio, el tamaño de muestra se determinó mediante la fórmula para una proporción, en donde la proporción esperada fue del 50 % (porque no se sabía lo que se pudiera esperar) obteniéndose una “ $n$ ” igual a 93 estaciones. Se muestrearon 100 estaciones, cada una con una longitud de 30 m. La metodología se basó en el procedimiento de varillas marcadas propuesto por Becerra (1999) y Hudson (1997) el cual se modificó para este estudio; las varillas permanecieron en el camino 37 semanas; la primera toma de datos fue a finales de abril del 2015 y la segunda en enero del 2016. Las variables evaluadas más importantes fueron: la altitud (msnm), la exposición, la erosión presente en la carpeta de rodamiento, el recubrimiento del camino, el diámetro de los agregados, el gradiente de la pendiente transversal y longitudinal del camino, y finalmente, se hizo el análisis físico del suelo.

Con la primera y la segunda medición del registro de datos, se determinó la cuantificación de pérdida de suelo con la expresión matemática de rodadas o huellas máximas propuesta por Hernández, et al. (2013):  $P_s = (N_i - N_f) * 10,000 \text{ m}^2$ ; donde:  $P_s$  = Pérdida de promedio de suelo en las huellas de los vehículos

forestales  $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ,  $N_i$  = Nivel inicial de la rodada del vehículo forestal y  $N_f$  = Nivel final de la rodada de los vehículos.

De acuerdo a la información recabada de la cuantificación del desplazamiento de suelo y las variables evaluadas, se manejó por medio de la estadística descriptiva y se analizó en base a intervalos de confianza para promedios y para proporciones: el 51.91 % del volumen de suelo con desplazamiento negativo (VSDN) se presentó en la exposición norte (N), mientras que en la exposición oeste (W) se obtuvo un volumen de suelo con desplazamiento positivo (VSDP) del 46.48 %; el 45 % del volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) se presentó en el rango de agregados en diámetro de 0.1-2.0 cm; de acuerdo al análisis físico de suelo se obtuvo una denominación textural predominante arcillosa; se presentó una mayor pérdida de suelo en la pendiente longitudinal en el rango de 16-20 % y en el rango de 0-5 % se presentó un mayor acumulamiento de suelo; mientras que en el rango 0-5 % de la pendiente transversal se presentó un VSDN de 64.97 % y en el rango de 6-10 % se mostró VSDP de 54.22 %. Se estimó un volumen total de suelo con desplazamiento negativo de  $1,842.23 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  en 22 estaciones muestreadas, mientras que en las 56 restantes, se determinó un volumen total de suelo con desplazamiento positivo de  $9,217.43 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ . De acuerdo a lo expuesto, el camino presenta alta vulnerabilidad en el desplazamiento positivo y negativo de suelo por presentar especificaciones técnicas deficientes y características físicas que inciden directamente en la afectación de la carpeta de rodamiento del camino.

Correo electrónico; Jose Daniel Luna Fontes, [forestal.fontes@gmail.com](mailto:forestal.fontes@gmail.com)

**Palabras clave:** camino forestal secundario, erosión hídrica, escorrentía, volumen de suelo con desplazamiento positivo y negativo



## ABSTRACT

This research aims to quantify the volume ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ) soil, with negative and positive displacement (loss and buildup) due to runoff and transit of vehicles in a secondary forest road in the Sierra la Martha, Arteaga, Coahuila. The purpose of this study is to assess the technical specifications and physical characteristics of the road, in order to determine the volume of soil with positive and negative displacement, which in this case, this period is considered atypical by rainfall were recorded. This will allow us to know the displaced volume and how the soil on the folder bearing moves by the effect of surface runoff.

In this research a simple random sampling was used, the sample was determined by the formula for a ratio, where the expected proportion was 50 % (because it was not known what might be expected) to obtain an “n” equal to 93 stations. 100 stations were sampled, each with a length of 30 m. The methodology was based on the procedure proposed by road marked Becerra (1999) and Hudson (1997) which was modified for this study; the rods remained on the road 37 weeks; the first data was in late April 2015 and the second in January 2016. The most important variables were evaluated: the altitude (m) exposure, this erosion in the folder bearing, the lining of the road, the diameter of the aggregates, the gradient of the transverse and longitudinal slope of the road, and finally, the physical soil analysis was done.

With the first and second measurement data recording, quantifying soil loss was determined by the mathematical expression of ruts or maximum traces proposal by Hernandez *et al.* (2013):  $P_s = (N_i - N_f) * 10,000 \text{ m}^2$ ; where:  $P_s$ = average soil loss in the footsteps of forest  $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$  vehicles,  $N_i$ = initial level vehicles rolled forest and  $N_f$ = final level of the vehicles rolled.

According to information gathered from the quantification of soil displacement and evaluated variables, is was handled by descriptive statistics and analyzed based on confidence intervals for averages and proportions: the 51.91 % of the volume of soil displacement negative (NSDN) occurred in the northern exposure (N), while in the western exposure (W) a volume of soil was obtained with positive displacement (VSDP) of 46.48 %; 45 % of the total volume of displaced soil (positive and negative) are presented in the range of aggregates in diameter 0.1- 2.0 cm; according to the physical analysis of soil a loamy textural predominant denomination was obtained; showed a greater loss of soil the longitudinal slope in the range of 16-20 % and range 0-5 % was presented a greater accumulation of soil; while in the range 0-5 % of the outstanding cross was presented a VSDN of 64.97% and in the range of 6-10 % showed VSDP of 54.22 %. It was estimated a total volume of soil with negative displacement  $1,842.23 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  in 22 sampled stations, while in the remaining 56, in a total of soil was determined with positive displacement  $9,217.43 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ . According to the above, the road has high vulnerability in the positive and negative displacement of soil present poor technical specifications and physical characteristics that directly affect the involvement of the folder bearing the road.

**Keywords:** secondary forest road, water erosion, runoff, soil volume with positive and negative displacement



## I. INTRODUCCION

México posee una superficie nacional de 1,964, 374 km<sup>2</sup>, de la cual, el 42 % (825,037.08 km<sup>2</sup>) del territorio nacional se encuentra dentro de la zona de susceptibilidad del proceso físico de erosión hídrica (SEMARNAT-UACH, 2002). El territorio mexicano cuenta con una superficie muy accidentada e irregular (Rzedowski, 2006), y por ello se presenta diferentes grados de erosión (Alvarado *et al.*, 2007).

La erosión hídrica es considerada como la remoción del suelo por agentes del medio físico (Alvarado *et al.*, 2007). Parcker *et al.* (2014), mencionan que el principal agente que deteriora la carpeta de rodamiento de los caminos de terracería, es la escorrentía superficial, ya que éstos, tienen una baja capacidad de infiltración y se encuentran desnudos a lo largo del año (Úbeda *et al.*, 1998). Además Sherar y Keller (2008) mencionan que los caminos de terracería pueden presentar mayor erosión que otras actividades extractivas.

Madrigal *et al.* (1994), mencionan que las brechas temporales presentan mayor susceptibilidad de erosión entre los dos y los cuatro años a partir de la construcción del mismo; mientras que los caminos permanentes, son fuente continua de sedimentos, cuya cantidad, depende de la ubicación, el diseño, la construcción, la superficie, los materiales de relleno, la intensidad de uso y la frecuencia del mantenimiento. De acuerdo con Sherar y Keller (2008), la ubicación de los caminos de terracería es un punto clave para garantizar que las especificaciones técnicas y características físicas mantengan rangos de seguridad para el tránsito de los vehículos.

Sherar y Keller (2008), indican que los caminos pueden inducir una erosión significativa, lo cual puede afectar la fauna y la vegetación, los valores escénicos y la estructura social; pero Packer *et al.* (2014) y Úbeda *et al.* (1998), añaden que también se afectan las redes del drenaje natural subterráneo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Cuantificar el volumen ( $m^3ha^{-1}$ ) de suelo con desplazamiento negativo y positivo (pérdida y acumulamiento) por efecto de la escorrentía y del tránsito de los vehículos en un camino forestal secundario, en la Sierra la Martha, Arteaga, Coahuila.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

1. Valorar técnicamente las características cualitativas y cuantitativas del camino
2. Cuantificar la pérdida de suelo con el método de varilla modificado.
3. Determinar las propiedades físicas del suelo.
4. Generar los perfiles transversales de cada una de las estaciones de muestreo

## **1.2 Hipótesis**

Ho: No existe diferencia entre el volumen de suelo perdido y el volumen de suelo acumulado por efecto de escorrentía y tránsito de vehículos en un camino forestal secundario.



### 1.3 Justificación

La Sierra la Martha, Arteaga, Coahuila presenta características topográficas, vegetativas y climáticas que permiten una fuerte demanda para el uso recreativo del sector social; por tal motivo, la conservación y preservación de los recursos naturales debiera ser prioritario por los servicios y los bienes que brindan a la sociedad. Sin embargo, los recursos naturales están enfrentando una problemática de manera directa e indirecta por el efecto de la presión turística, los incendios forestales, las plagas y la extracción de madera ilegal. Por lo anterior, es necesario atender la problemática que enfrenta los caminos de terracería o vecinales, para reducir los impactos negativos que puedan prevalecer en el “medio ambiente” por efecto de la escorrentía superficial. En particular, los caminos de terracería son los principales generadores de sedimentos, por presentar una superficie desnuda que permite la susceptibilidad al desplazamiento de suelo por efecto de la escorrentía superficial.

El camino motivo de estudio presenta serios problemas de erosión hídrica, debido a la deficiencia de su diseño y construcción que se realizó ante la premura de atender el incendio forestal que se presentó aproximadamente hace 18 años; desde entonces, la carpeta de rodamiento ha sido afectada por las escorrentías superficiales, deteriorándose y deformándose sus características y especificaciones técnicas, a no respetarse su temporalidad ni su deshabilitamiento oportuno, con un uso permanente hasta la fecha.

De acuerdo a lo expuesto, se tuvo la inquietud de cuantificar el desplazamiento de suelo positivo y negativo que se presentó a lo largo de la desnuda carpeta de rodamiento del camino. Aunado a ésto el año 2015 se caracterizó por la intensidad de sus precipitaciones, no vistas desde hace 40 años, lo cual, pudo provocar mayor desprendimiento de suelo con respecto a los años anteriores. De ahí se parte, para querer obtener información para conocer el efecto que tienen las lluvias atípicas en un camino forestal secundario sin recubrimiento.

## **II. REVISION DE LITERATURA**

### **2.1 Suelo**

Es un sistema complejo y dinámico que está integrado por partículas orgánicas e inorgánicas, agua y aire de manera homogénea en la capa superficial (Cepeda, 1991; Narro, 2004). Este producto natural se ha conformado mediante un proceso lento a lo largo del tiempo, esto debido a la descomposición de la roca madre por efecto de la modificación del clima y a los organismos vivos del área (Thompson y Troeh, 1988). Posee propiedades físicas y químicas que le permite sustentar la vida vegetal, además de absorber y almacenar nutrientes orgánicos e inorgánicos (Narro, 2004).

#### **2.1.1 Propiedades físicas**

##### **2.1.1.1 Textura**

Aguilar (2014); FAO (2016) y Ortiz (1990), mencionan que la textura se refiere a cada una de las partículas elementales que lo constituyen (arcilla, arena y limo). Ésta se expresa por las proporciones relativas de las diferentes fracciones sólidas del suelo, las cuales son definidas de acuerdo al tamaño de las partículas minerales; para las arenas su tamaño va de 20 a 0.05 mm, para los limos es de 0.05 a 0.002 mm y finalmente, las arcillas son menores de 0.002 mm.

Para determinar la denominación textural de los componentes se usa el triángulo de clasificación de texturas que posee 12 áreas de porcentajes que definen la mezcla de arcilla, arena y limo en el suelo (Aguilar, 2014; Casanova, 2005). Por otro lado, la FAO (2016) destaca que esta propiedad física del suelo, influye

directamente en la productividad por el efecto de la retención de agua, la facilidad de drenaje y la aireación del suelo (espacios vacíos para la circulación del aire y del agua).

### **2.1.1.2 Estructura**

FAO (2016) y Narro (2004) definen que es el arreglo y la distribución de las partículas de arcilla, arena y limo en el suelo. Estas partículas primarias están ensambladas en distintas unidades llamados peds o agregados, donde éstos mantienen un sistema complejo por su conformación espacial en el área. Narro (2004) indica que no existe una clasificación universal para detallar la estructura, por lo cual, propone que se puede determinar mediante tres criterios (tipo, clase y categoría), con el fin de describir y clasificar su carácter representativo. Estos criterios definen las características de los agregados, es decir, los tipos de estructura se enfoca en el aspecto y las formas de los peds; las clase de estructuras se caracterizan por los tamaños de los agregados y la categoría de estructura se define como el grado de durabilidad, estabilidad y cohesividad de cada agregado (Casanova 2005; Narro 2004). Narro (2004) coincide y señala que existen dos principales formas de estructura, que se clasifican por el tipo de agregado, lo que no tienen estructura (grano suelto y masivo) y los que sí la presentan (granular, laminar, poliédrica y prismática). Sin embargo los autores Thompson y Troeh (1988), indican un tercer tipo de agregado llamado estructura destruida (pastoso).

### **2.1.1.3 Porosidad**

Se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupados por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por minerales sólidos (50%) y espacio poroso (50%), éste último, son espacios ocupados por agua y aire principalmente.

Esta propiedad está constituida por dos tipos de poros los macroporos y los microporos que conectan e intercambiar aire, agua y gases que pueden circular o retenerse. Esta propiedad física del suelo es importante para mantener una buena capacidad de aireación, permeabilidad y retención de agua. Estos tipos de poros son condicionados por la textura y la estructura del suelo. Por lo anterior, los suelos arcillosos contienen más poros pequeños (microporos), lo que hace que el movimiento de agua y del aire sea menor, provocando un aumento en la capacidad de retención de agua, mientras que en el suelo arenoso los macroporos propician que éstos movimientos sean mayores reduciendo la capacidad de retención del agua, aumentando la aireación y el drenaje. (FAO, 2016; Navarro y Navarro, 2013). Aguilar (2014) indica que el volumen de espacio ocupado se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P = \left[ 1 - \frac{Da}{Dr} \right] \times 100$$

En donde:

$P$  = Porcentaje de espacios porosos

$Da$  = Densidad aparente

$Dr$  = Densidad real

## **2.1.2 Cualidades del suelo**

### **2.1.2.1 Permeabilidad**

Es la capacidad que tiene el suelo con respecto a la velocidad del agua que pasa entre los espacios de aire, por lo que ésta, está condicionada por la textura, la estructura y la porosidad. Esta cualidad del suelo, se clasifica de acuerdo a la velocidad de infiltración y se denomina como: permeabilidad mala, normal y buena. Debido a esto, la velocidad de infiltración se relaciona directamente con el tamaño, la orientación y el número de poros del suelo (Boix, 2012; Thompson y Troeh, 1988).

### **2.1.2.2 Drenaje interno**

Es el movimiento o desplazamiento de forma radial que posee el agua en el interior del suelo; esta cualidad también se ve influenciada por la textura, estructura, permeabilidad y proximidad a la capa freática. Para expresar el nivel de movimiento del agua y aire se clasifica en: sin movimiento, muy lento, medio, rápido y muy rápido (Salinas y Valencia., 1983).

### **2.1.2.3 Hidrofobicidad**

Cuevas (2006) y Mataix *et al.* (2013) coinciden que esta cualidad que posee el suelo para repeler el agua depende de la cantidad y composición de los minerales, la materia orgánica, las propiedades físicas del suelo y las actividades antropogénicas (la aplicación del fuego). Por lo anterior, estos elementos aumentan la resistencia de penetración del suelo, provocando el escurrimiento superficial. Jaramillo (2006), afirma que ésta presenta una alta variabilidad en el comportamiento del suelo, lo cual afecta directamente al ciclo hidrológico, la erosión y la productividad del sector agropecuario y forestal.

## **2.2 Erosión**

Tayupanta (1993), menciona que es un proceso físico de pérdida de suelo, esto debido a la disgregación de las partículas orgánicas e inorgánicas. Por otro lado, el autor Ortiz (1969) señala que este proceso solo comprende la fase del desprendimiento o arrastre del suelo, pero Morgan (1997) y Almorox *et al.* (2010), afirman que ésta lo conforman las etapas de desprendimiento o arrastre, el transporte y la sedimentación de partículas. Estas etapas son detonadas por el aire o por el agua, teniendo como consecuencia el deterioro de los recursos naturales y el desequilibrio de los ciclos biogeoquímicos (Almorox *et al.*, 2010).

### **2.2.1 Erosión hídrica.**

Es un proceso físico de desagregación de partículas de suelo por el efecto de la cantidad, el movimiento, la gravedad y la energía de la escorrentía superficial (Becerra, 1999; Cisneros *et al.*, 2012). De acuerdo con Camp y Daugherty (1999) la erosión por el efecto del agua es un proceso normal o natural, es decir, cuando la pérdida de suelo se origina por medio de factores naturales es conocida como erosión geológica; pero cuando dichas pérdidas son ocasionadas o inducidas por los factores antropogénicos es llamada erosión acelerada.

#### **2.2.1.1 Proceso de erosión**

Este proceso consta de tres etapas, las cuales provocan la pérdida del suelo por efecto de los agentes erosivos que dan como resultado la separación de partículas (Morgan, 1997); contribuyendo a la degradación de los recursos naturales debido al impacto progresivo e irreversible que afecta directamente a la capa superficial no consolidada del suelo (Mateu *et al.*, 2003).

Por otro lado, Morgan (1997) y Michelena R. (2011) indican que estas tres etapas del proceso de erosión hídrica son: la etapa de preparación es comúnmente conocida como de desprendimiento o remoción, donde el agente más importante es el salpicamiento por los constantes golpeteos sobre el suelo desnudo, modificando su estructura de manera continua ocasionando la fragmentación y el aflojamiento de las partículas; la etapa de transporte, consume la pérdida de suelo por el desplazamiento de partículas, debido al escurrimiento superficial del agua que produce diferentes formas de erosión por la velocidad y fuerza que tiene el flujo de agua sobre el relieve del terreno. La última etapa es la sedimentación, ésta se presenta como el acomodo y establecimiento de partículas en las partes bajas del terreno, aumentando el riesgo de desequilibrio ecológico, ambiental y económico del terreno.

#### **2.2.1.2 Factores de la erosión**

Según Becerra (1999) y Cisneros *et al.* (2012) señalan que este proceso de erosión está intervenido por factores climáticos, edáficos, topográficos y antropogénicos, pero Tayupanta (1993) agrega el factor vegetativo debido a su función que cumple en el suelo. Estos cinco factores (climático, edáfico, topográfico, antropogénico y vegetativo) poseen características que provocan la escorrentía superficial, es decir, el factor climático influye en el grado y la agresividad de la lluvia (duración, intensidad y tiempo en que se presenta); el factor edáfico interviene en las propiedades físicas y cualidades del suelo que propicia la fragilidad y/o resistencia de éste; el factor topográfico está determinado por la longitud, pendiente y forma del terreno (rugosidad); el factor vegetación se basa en el tipo y porcentaje de cobertura vegetal; y por último, la presencia antropogénica se relaciona con las modificaciones o alteraciones que puede ocasionar el hombre en sus actividades cotidianas. Ortiz (1969), indica que algunos de estos factores no pueden ser modificados, solo pueden controlarse, por lo que es necesario considerar medidas de conservación de suelos. Los

factores topográficos (vegetación, clima y suelo) son variables que se utilizan para el uso de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (EUPS), siendo ésta una herramienta útil para cuantificar la pérdida de suelo y poder tomar medidas para conservarlo (Becerra, 1999).

### **2.2.1.3 Agentes de la erosión**

Becerra (1999) y Ávila (2013), indican que los principales agentes que intervienen en la erosión del suelo, pueden ser clasificados en cuatro grupos: activos, predisponente, amortiguador y pasivo. Los agentes activos actúan directamente donde se realiza el desprendimiento y arrastre de los materiales del suelo; los agentes predisponentes son todos aquellos fenómenos ambientales u organismos vivos que directa e indirectamente predisponen al suelo para ser erosionado (humedad relativa, oscilación térmica, acciones de la fauna y acciones del hombre; el agente amortiguador es la vegetación debido a su efecto disipador de la energía cinética de la lluvia, los escurrimientos superficiales y la velocidad del viento; y el agente pasivo es aquel que recibe la acción de la erosión en el que la susceptibilidad de éste influye también en la magnitud del proceso de erosión.

### **2.2.1.4 Formas de erosión**

Tayupanta (1993) y Becerra (1999) coinciden en que las formas de erosión se clasifican de acuerdo a los efectos causados en el mismo, con cinco principales formas de erosión hídrica que afectan las condiciones del suelo, las cuales son salpicamiento, laminar, surcos, cárcavas y movimiento de masas. Por otro lado, Ortiz (1969) y Núñez (1981), solo indican tres formas de erosión hídrica (salpicamiento, laminar y cárcavas) y no mencionan la forma de remoción en masa y la forma de surcos. Mientras tanto, Cisneros *et al.* (2012) coincide con

Tayupanta y Becerra, y además agrega una forma de erosión llamada cursos permanentes.

#### **2.2.1.4.1 Salpicamiento**

Esta forma de erosión se caracteriza por el goteo de la lluvia sobre suelo desnudo, induciendo a la disgregación y el movimiento de las partículas por el impacto del agua. Se calcula que la velocidad a la que caen las gotas de la lluvia en el suelo es de 9 m/s, con un radio de desplazamiento de 1.5 m, provocando alteraciones en la textura del suelo (Cisneros *et al.*, 2012; Ortiz, 1969; Tayupanta, 1993).

#### **2.2.1.4.2 Laminar**

Esta forma de erosión superficial se produce por el efecto del escurrimiento, perdiéndose las partículas de manera fina y uniforme de la capa superficial del suelo (Cisneros *et al.*, 2012; Núñez, 1981). Así, ésta representación de erosión es la menos notable en la destrucción del suelo, pero su nivel de afectación es la más peligrosa por la reducción de la capa material no consolidada (Ortiz, 1969).

#### **2.2.1.4.3 Surcos**

Esta forma de erosión se presenta cuando la escorrentía se concentra en pequeños canales irregulares, donde éstos se caracterizan por mantener un volumen y una velocidad suficiente para provocar la conformación de canalillos notables a lo largo de la pendiente de terreno (Cisneros *et al.*, 2012; Ortiz, 1969; Tayupanta, 1993). La formación de los canales se presenta cuando ocurre un suceso de lluvia con una alta intensidad y una duración considerable principalmente en superficies accidentadas y con pendiente (Ortiz, 1969).

#### **2.2.1.4.4 Cárcavas**

Es una zanja producto de la erosión que sigue la pendiente del terreno, se produce cuando el crecimiento del caudal se genera cuando se concentra y corre el agua proveniente de la lluvia (SAGARPA, N.D) mediante un volumen y una velocidad por el efecto del escurrimiento superficial (Cisneros *et al.*, 2012). La concentración de flujo que se presenta en esta forma de erosión mantiene un movimiento acelerado por lo que genera remolinos o turbulencias, que provocan la ampliación a lo ancho y en lo profundo de la zanja (Ortiz, 1969; Tayupanta, 1993).

#### **2.2.1.4.5 Remoción en masa**

Esta forma de erosión ocurre cuando el suelo llega a su máxima capacidad de infiltración, por lo cual las partículas del suelo pierden su estabilidad y resistencia de agregación, provocando el desplazamiento de grandes volúmenes de suelo, donde éstos pueden estar clasificados en deslizamientos, en derrumbes y en solifluxión de la superficie (Núñez, 1981; Tayupanta, 1993).

### **2.3 Vías de comunicación**

Los medios de comunicación por tierra, agua y aire son conocidos como motores de la vida social, y poderosos instrumentos de la civilización, apareciendo en cada uno de ellos variedades que dependen de la clase de elemento y de su manera de utilizarlo (Crespo, 2007). García (2005), indica que las vías de comunicación son medios que sirven para el transporte o envío de personas, mercancía y recursos naturales, de un lugar a otro. Estas vías pueden estar clasificadas en tres grupos: terrestres (caminos, ferrocarriles, tranvías), por medio del agua (marítimos,

fluviales, lacustres, canales) y finalmente por vía aérea (aviones, helicópteros, globos) (Crespo, 2007; García, 2005).

### **2.3.1 Camino**

García (2005), indica que es el trazo de una línea sobre la topografía de la superficie que está definido por un ancho, una longitud, un alineamiento y una pendiente predeterminada para el tránsito de vehículos o personas. Por otro lado, Sherar y Keller (2008) indican que el propósito de estas vías de comunicación es para la implementación del desarrollo social, económico y ambiental de las zonas rurales, forestales o conurbadas.

### **2.3.2 Caminos forestales**

FAO (2008), señala que son estructuras complejas que requieren de características especiales para el acceso fundamental del tránsito de vehículos pesados para establecer conexión con las zonas de aprovechamiento. De acuerdo con la FAO (2008) y Tchikoue *et al.*(2010), indican que los principales propósitos de éstos, es el acceso a zonas boscosas para la extracción de recursos forestales, la ordenación, el aprovechamiento y la vigilancia, así como la conservación, la defensa y el uso recreativo de los recursos naturales.

#### **2.3.2.1 Clasificación y características de los caminos forestales**

Crespo (2005), señala que los caminos pueden estar clasificados según el fin que persiguen, que puede ser por su tránsito, por su aspecto administrativo y por su aspecto técnico oficial. Mazón y San Millán (1993) y Tchikoue *et al.* (2010),

señalan que propiamente las vías forestales se clasifican de acuerdo a su uso y a la importancia que cumplen dentro de las operaciones del ciclo forestal.

#### **2.3.2.1.1 Caminos primarios**

Estas vialidades son de primer orden, por lo cual es la columna vertebral de la red caminera que mantiene conexión con las vías secundarias y las vías terciarias en la superficie forestal. Este tipo de caminos poseen características de construcción que le permiten el aprovechamiento y el desplazamiento de las materia primas forestales dentro del área forestal o por las carreteras federales y estatales (Tchikoue *et al.*, 2010). El proceso de diseño e infraestructura que poseen éstos, contemplan las pendientes máximas, los radios de curvatura mínimos, la circulación permanente, las obras de drenaje y la anchura del camino para el tránsito de los vehículos pesados. Por lo anterior, se requiere de una inversión costosa para la construcción y el mantenimiento durante el periodo de cosecha (Mazón y San Millán, 1993).

#### **2.3.2.1.2 Caminos secundarios**

Estas vías forestales son conocidas de segundo orden por la conexión que permiten entre las vías primarias y las vías terciarias, durante el periodo de extracción de los recursos forestales. (Tchikoue *et al.*, 2010). Estas vías tienen el propósito de facilitar el transporte, el arrime y la concentración en puntos estratégicos de las materias primas forestales en el bosque. Por otro lado, el costo de construcción con respecto a los caminos primarios es menor debido al tránsito de los caminos, las características técnicas, las obras de drenaje, la época del año en que se realice el aprovechamiento y a su temporalidad (Mazón y San Millán, 1993; SEMARNAT, 2006).

### **2.3.2.1.3 Caminos terciarios**

Este camino es conocido como brecha de saca o tercer orden, por su baja capacidad de tránsito y sus nulas especificaciones técnicas, siendo su temporalidad muy corta (días) en los aprovechamientos forestales; pero que se mantienen para la protección de áreas, para el manejo del fuego y para el manejo silvícola de los bosques. Para el tránsito en éstos, principalmente se hace uso de animales y/o maquinaria especializada para la extracción de madera, y con menor frecuencia es posible el acceso para los vehículos forestales que pueden ser obstaculizados por las condiciones topográficas del terreno (Tchikoue *et al.*, 2010). Estas vías carecen del revestimiento de la carpeta de rodamiento, por lo que su vida útil es eventual y acorde al plan de corta (SEMARNAT, 2006)

### **2.3.2.2 Importancia de la administración de los caminos forestales**

Tchikoue *et al.* (2010), indica que estas vías son indispensables para la extracción de los recursos forestales y el funcionamiento de las cadenas productivas en el sector forestal. Por lo que, estos caminos son estructuras complejas que requieren de una buena capacidad de soporte y/o resistencia al rodamiento de los vehículos, y poder mantener el tránsito de vehículos forestales durante el ciclo forestal, asimismo, contrarrestar los efectos negativos e irreversibles en los recursos naturales por el impacto de las actividades del aprovechamiento forestal.

Por otro lado, Sherar y Keller (2008) señalan que es importante realizar una gestión de caminos forestales a mediano y largo plazo, con el fin de salvaguardar el equilibrio del paisaje natural, mitigar el impacto ambiental con respecto a la calidad del agua, la interacción y conexión de los caminos con los arroyos, al impacto de las especies en peligro de extinción, a la disminución en la mortalidad de la fauna silvestre y a la mejora de los ciclos biogeoquímicos, entre otros.

En la administración de caminos se requiere el establecimiento de medidas de prevención y conservación en las diferentes fases de la gestión (planificación, ubicación, levantamiento topográfico, diseño, construcción, mantenimiento y cierre) para disminuir la problemática (técnica-económica-social) que perjudica la red caminera e incrementa el efecto de la erosión hídrica. Existen estudios en los que se ha estimado que persiste un volumen de pérdida de sedimentos significativo por el tránsito de vehículos en los caminos forestales (Packer *et al.*, 2014; Ubeda *et al.*, 1998).

Acuña y Gayoso (1999), Weave *et al.* (2014) y Sherar y Keller (2008), todos ellos señalan que las etapas que constituyen la gestión de caminos forestales son la planificación, la ubicación, el diseño, la construcción, el mantenimiento y el cierre de estas vías. Solo que éstos últimos mencionan una etapa más llamada levantamiento topográfico.

#### **2.3.2.2.1 Planificación**

Crespo (2007), define que es la etapa base para el comienzo de la gestión de los caminos, ya que se debe de considerar un análisis básico sobre la importancia económica, ambiental y social que influirá en su uso durante la vida útil de éste. Así mismo, Keller y Sherar (2008) indican que son actividades clave para garantizar que un camino cumpla todas las expectativas del usuario y se minimicen los impactos negativos a lo largo del camino. Weave *et al.* (2014), señalan que ésta etapa permite organizar los elementos esenciales para la construcción y el presupuesto económico, así como, la identificación de los puntos de referencia y de control en la carta topográfica para las posibles proyecciones y accesos del camino.

### **2.3.2.2.2 Ubicación**

Weave *et al.* (2014), mencionan que en esta etapa se establece los recorridos de campo para identificar, analizar y determinar fortalezas, oportunidades, debilidades y las amenazas para el trazo y la construcción del camino forestal. Sherar y Keller (2008) y Weave *et al.* (2014), indican que en ésta etapa se identifica los puntos o zonas de peligro durante el transecto o proyección del camino para mitigar los impactos negativos e irreversibles en el medio ambiente y reducir los costos de construcción y mantenimiento.

### **2.3.2.2.3 Diseño**

En esta etapa intervienen los factores económicos, ambientales y sociales que influirán a mediano y/o a largo plazo en la construcción, el mantenimiento y el cierre del camino (Weave *et al.*, 2014). Sherar y Keller (2008) y Weave *et al.* (2014), señalan que es importante desarrollar estándares o especificaciones de calidad para el diseño del perfil transversal y del perfil longitudinal. Alcántara (2003), afirma que los estudios geotécnicos (cortes y rellenos) son indispensables para proyectar el procedimiento de construcción y la maquinaria pesada durante el trazo del camino en la superficie. Así, Weave *et al.* (2014), indican que no es posible evitar el drenaje del camino y el drenaje de la ladera (escorrentía) después de una lluvia, por lo que es necesario calcular la capacidad de escurrimiento para distribuir las obras de drenaje de acuerdo a la acogida, la canalización y la evacuación del flujo de agua.

#### **2.3.2.2.3.1 Obras de drenaje**

Son estructuras que permiten drenar y canalizar la escorrentía cuando fluye en la superficie del camino, por lo que su función es acoger, canalizar y evacuar el agua

del camino (Weave *et al.*, 2014). Crespo (2007), indica que uno de los propósitos de estas obras es reducir la cantidad y la velocidad de la fuerza del agua para evitar la destrucción de la plataforma del camino.

#### **2.3.2.2.3.1.1 Contracuneta**

Son canales que se construyen en las laderas localizadas aguas arriba de los taludes de corte, con el propósito de captar y canalizar el flujo de agua que fluye directamente en la superficie natural del terreno, redireccionando el agua en la parte baja de la ladera hacia el drenaje natural de la misma, para reducir la velocidad y evitar el saturamiento de agua en las cunetas (SCT, 2016). Por otra parte, Etcharren (1976), indica que la construcción de estas obras de drenaje depende de la estratificación de las capas geológicas, por lo que es necesario identificar y conocer las capas porosas que provocan la inestabilidad en los cortes del talud.

#### **2.3.2.2.3.1.2 Cuneta**

Son zanjas longitudinales que se encuentran a un lado de la plataforma, tienen el propósito de recibir y canalizar el agua que escurre de los taludes y del cuerpo del camino (Crespo, 2007). Tchikoe *et al.* (2010), indican que la capacidad de drenaje de éstas depende directamente del volumen de agua generado por las precipitaciones y del tipo de material de la capa superficial del camino. Alcántara (2003), indica que estas obras generalmente poseen una profundidad de 30 a 40 cm, con forma de “V” y una pendiente mínima y máxima de 1 % - 5 % respectivamente, aunque las dimensiones de estas obras está en función del tipo de suelo, la pendiente, la intensidad y los periodos de lluvia, entre otros factores ambientales.

### **2.3.2.2.3.1.3 Alcantarilla**

Son estructuras de drenaje transversal que permiten canalizar y conducir, extensos volúmenes de agua para el desagüe de las cunetas que están conectadas hidrológicamente en el camino (Weave *et al.*, 2014). Sherar y Keller (2008) señalan que estas obras generalmente están construidas por metal, concreto o plástico, e instaladas por debajo de la superficie del camino, con el propósito de drenar las cunetas, los manantiales y los arroyos que lo cruzan. Alcántara (2003) señala que los factores que influyen en la distribución y tamaño de estas obras son: la precipitación media, la topografía (pendiente y rugosidad del terreno), el tipo de suelo, y la magnitud y la frecuencia de ciertos fenómenos naturales.

### **2.3.2.2.3.1.4 Vados**

Estas estructuras están diseñadas y pavimentadas para las corrientes permanentes o estacionales (arroyos, ríos) para la circulación de los vehículos y así evitar por un lado, la erosión hídrica por efecto de la escorrentía superficial y por otro lado evitar la interrupción de los flujos de agua (Crespo, 2007). Generalmente éstos, están cimentados con mampostería o losa de concreto que permiten el soporte y la durabilidad de la estructura para el tránsito de vehículos (Crespo, 2007; Etcharren, 1976). Por otro parte, García (2009) menciona que estas obras de drenaje, no son recomendables para caminos con alto tránsito de vehículos debido a que se pueden fracturar.

### **2.3.2.2.3.1.5 Puentes**

Etcharren (1976), indica que estas estructuras están diseñadas y construidas con materiales resistentes que soporten la intensidad y el tránsito de los vehículos

pesados, principalmente para el cruce de una barrera artificial o natural como un río, una depresión del terreno, una barranca o un canal. Así, Crespo (2007), menciona que es necesario definir el tipo de uso, la forma y la duración de estas obras para elegir el mejor material de construcción.

#### **2.3.2.2.4 Construcción de caminos**

Se considerarán las decisiones que se determinaron en la etapa de planificación y de diseño, con el propósito de mitigar el impacto ambiental en los recursos naturales. Alcántara (2003) señala que es indispensable realizar las actividades de limpieza, de desbroce y de desenraice o destocoado del área para el inicio de las etapas de la construcción del camino; pero Weave *et al.* (2014) además, agrega las actividades de quema, de excavación y de nivelación. Por lo anterior, es necesario contar con personal calificado que cumpla ciertas expectativas técnicas y profesionales para el manejo de estándares de calidad e inspección en la geometría de la calzada, el cálculo y diseño de las obras de drenaje, la estabilización de taludes, y finalmente determinar el tipo del material de construcción y revestimiento del camino (Sherar y Keller, 2008; Weave *et al.*, 2014).

#### **2.3.2.2.5 Mantenimiento del camino**

Esta etapa es fundamental para conservar los elementos del camino y evitar el impacto ambiental en las secciones del mismo (Weave *et al.*, 2014). Andersson *et al.* (2003) y MTC (2006), mencionan que el principal propósito de esta etapa es prolongar la vida útil del camino, reduciendo los costos de operación y además, mantener la seguridad del usuario. Por otra parte, MTC (2006) indica que existen dos tipos de mantenimientos: el periódico y el rutinario, pero Andersson *et al.* (2003), indica además, el mantenimiento de emergencia.

#### **2.3.2.2.5.1 Mantenimiento rutinario**

Este tipo de mantenimiento se realiza permanentemente en las diferentes secciones del camino, con el fin de mantener los elementos de éste y conservar en condiciones óptimas la plataforma del mismo (MTC, 2006). Andersson *et al.* (2003), indica que generalmente este mantenimiento carece de recursos económicos para su ejecución, ocupándose generalmente personal no capacitado para realizar al menos una vez al año las actividades correspondientes en cada sección del camino. Por otro parte, Menéndez (2003), afirma que el clima, el relieve, la intensidad del tránsito de vehículos y el tipo de material de construcción influirán directamente en la frecuencia con que pueda realizarse ese mantenimiento. Andersson *et al.* (2003), Menéndez (2003) y MTC (2006), coinciden en las siguientes actividades para este mantenimiento.

- 1) Inspección y eliminación de obstáculos.
- 2) Limpieza y reparación de las estructuras de drenaje.
- 3) Eliminación de malezas.
- 4) Mantenimiento de estructuras para el control de la erosión de suelo.
- 5) Remodelación ligera del camino.

#### **2.3.2.2.5.2 Mantenimiento periódico**

Andersson *et al.* (2003), Menéndez (2003) y MTC (2006), señalan que este mantenimiento se efectúa en el camino después de varios años, por lo que su propósito es rediseñar y restablecer la plataforma del camino. Andersson *et al.* (2003), indica que en este tipo de mantenimiento requerirá recursos económicos extras para la contratación de una constructora que cuente con maquinaria pesada, para las actividades de rehabilitación y de remodelación de la plataforma

del camino. Andersson *et al.* (2003) y Menéndez (2003), coinciden con las siguientes actividades para este mantenimiento.

- 1) Rediseño de la carpeta de rodamiento.
- 2) Reinstalación de estructuras de drenaje.
- 3) Rehabilitación de las estructuras del camino.
- 4) Revestimiento de la carpeta del camino.

#### **2.3.2.2.5.3 Mantenimiento de emergencia**

Andersson *et al.* (2003), señala que este tipo mantenimiento, se realiza solamente cuando suceden siniestros o desastres naturales en las secciones del camino. Para la ejecución de las actividades se requiere de un recurso económico adicional, con el fin de elaborar un plan operativo que cuantifique y evalúe económica, ambiental y socialmente el camino. En este mantenimiento se realizan las siguientes actividades.

- 1) Reconstrucción o reparación del daño del sistema de drenaje.
- 2) Limpieza de derrumbes, caída de árboles o piedras.
- 3) Reconstrucción de la carpeta del camino.
- 4) Reconstrucción o reparación del camino por el daño resultante por los deslaves o derrumbes.

#### **2.3.2.2.6 Cierre del camino**

Sherar y Keller (2008) y Acuña y Gayoso (1999), mencionan que el cierre del camino es conocido como la suspensión (temporal o permanente) de éste, porque se ha llegado al término de las actividades productivas, o bien, por el alto costo de mantenimiento. Sherar y Keller (2008), consideran que existen dos opciones

básicas que se definen de acuerdo al periodo de suspensión del camino; estas opciones pueden ser temporales o permanentes. El cierre temporal se caracteriza por el bloqueo estacional con barreras artificiales (bermas o barricadas), para evitar el tránsito de los vehículos, pero además, es necesario conservar las obras de drenaje para su apertura después de un periodo determinado; el cierre permanente o cancelación del camino implica el bloqueo y la reconfiguración del terreno con el fin de que éste llegue a su condición natural.

## **2.4 Vulnerabilidad y pérdida de suelo en caminos**

Parcker *et al.* (2014), mencionan que durante el proceso de construcción de un camino se elimina y se remueve la vegetación, causando la desprotección del suelo y por ende favoreciendo la pérdida de suelo. FAO (1995), señala que los factores que pueden contribuir a la erosión hídrica en los caminos es el tipo de suelo, la pendiente y la longitud del mismo, pero Parcker *et al.* (2014), mencionan que también influye directamente la posición o ubicación del camino respecto de la ladera, la exposición y la inclinación de la ladera. Estos factores intervienen directamente en la estabilización y en la conservación de los sedimentos sobre los caminos, por lo cual es importante conocer que principalmente los caminos de terracería tienen una alta susceptibilidad a la pérdida de suelo por causa de fuertes tormentas o lluvias persistentes y casi excepcionalmente por los movimientos telúricos. Sin embargo, como no es posible evitar la presencia de éstos, si es factible realizar acciones de prevención y de protección al suelo, para disminuir los daños irreversibles que se concentran en la plataforma del camino (Sherar y Keller, 2008).

### **2.4.1 Importancia del control de erosión en caminos**

Los caminos forestales mantienen una baja capacidad de infiltración, teniendo como consecuencia el aumento de la escorrentía superficial y la producción de sedimentos. Los caminos sin recubrimientos en la carpeta de rodamiento son susceptibles a la pérdida de suelo por su desnudes a lo largo del año, por lo que es necesario conocer la precipitación total y sus intensidades para atender el problema de la erosión hídrica por efecto del escurrimiento superficial (Úbeda *et al.*, 1998). Sin embargo, en la apertura de los caminos de terrecería se contamina el agua de las corrientes, se incrementa el riesgo de erosión, se fragmenta y se altera el ecosistema, y también, se facilita el incremento de diversas actividades del ser humano para su continuo desarrollo social, provocándose impactos ambientales negativos en el paisaje (Packer *et al.*, 2014).

Sherar y Keller (2008) mencionan que el control de la erosión es una de las mejores prácticas para contrarrestar el daño ambiental, así como de las más económicas medidas para proteger el camino y el medio ambiente. Asimismo, Rivera *et al.* (2009) señala que la conservación de los caminos puede reducir notablemente la pérdida de suelos hasta un 50 % de erosión en la superficie.

## **2.5 Métodos para calcular la pérdida de suelo por erosión**

### **2.5.1 Método de varillas o estacas marcadas**

Becerra (1999), menciona que el propósito es registrar datos de pérdida de suelo; este método consiste en clavar una serie de varillas en un terreno que estará preferentemente sin actividad durante un período. Cada varilla debe ser clavada y marcada al nivel de la superficie del suelo, con el fin de mantener una referencia inicial. La pérdida de suelo se determina con la diferencia de la lectura inicial, y la final a partir de la marca (que se realizó cuando se clavó la varilla), y el nivel del suelo cuando se determinó registrar las medidas verticales que darán pauta a la cuantificación del volumen desprendido de suelo; el promedio de esas distancias será el espesor de suelo perdido, el dato puede ser expresado en  $\text{ton ha}^{-1}$  año.

Hudson (1997), señala que es recomendable que el tamaño de cada varilla mida 300 mm de longitud y 5 mm de diámetro, pero las dimensiones de éstas dependerán directamente de la profundidad y la compactación del suelo. En la colocación de las varillas marcadas se emplea una distribución al azar de puntos para cubrir toda el área de interés.

### **2.5.2 Parcelas de escurrimiento**

Este método consiste en recolectar la esorrentía de una superficie determinada en un depósito o depósitos de almacenamiento que se encuentra en la parte inferior, con el fin de cuantificar la pérdida de sólidos arrastrados. Generalmente, este método se utiliza en estudios que requieren una precisión en las estimaciones numéricas de pérdida de suelo, por lo cual, su uso implica un costo elevado en el trabajo de las actividades de instalación, de registro y el desalojo de los materiales del depósito (Becerra, 1999). Cayssials (1984), señala que también con este método, se puede determinar el balance hídrico y de nutriente, en base a los sedimentos recolectados. Hudson (1997) señala que las dimensiones de la superficie y el tamaño de los depósitos de almacenamiento dependerán del propósito y la precisión que se requiera en el estudio, es decir, las microparcels se caracterizan por una superficie de uno a dos metros cuadrados y su intención es la comparación de dos tratamientos, puesto que la dimensión de la parcela no influye en el efecto de los tratamientos, en las parcelas pequeñas se determina mantener un área de 100 m<sup>2</sup> y se usan para ensayos de prácticas de cultivo, efectos de la cobertura y rotación de cultivos, y finalmente, en parcelas de una hectárea se utilizan para prácticas agrícolas o cultivos de gran magnitud.

## **2.6 Trabajos afines**

Ubeda *et al.* (1998), realizaron un estudio en la cuantificación de la erosión de un camino forestal de un bosque típico mediterráneo de *Quercus suber* en la montaña de “Les Gavarres”, provincia de Girona, España. El propósito de ese trabajo fue determinar el volumen de material erosionado procedente del camino y cuantificar el contenido de elementos disueltos. En este estudio se instaló una parcela experimental en un camino forestal para el control de erosión, y para poder ponderar los datos, al mismo tiempo se evaluó dentro del área un bosque natural, un bosque quemado por un incendio con una intensidad alta, otro bosque afectado con una intensidad media de fuego, un bosque impactado por un incendio de baja intensidad y un campo agrícola; lo anterior, con el fin de poder comparar los datos.

Este trabajo consistió en colocar un colector de almacenamiento de sedimento al final del camino para conocer el volumen de material erosionado. Este colector almacenó el sedimento transportado por un camino con un área de 300 m<sup>2</sup> después de los episodios de lluvia, pero debido a la imposibilidad de recolectar la escorrentía, se utilizó un simulador de lluvia para determinar el coeficiente de escorrentía y también se analizaron muestras de agua de la escorrentía para cuantificar el contenido de elementos disueltos.

Los resultados que se obtuvieron en la pérdida de suelo fueron: en caminos de 13.10 t ha<sup>-1</sup> año; en el área de bosque quemado a una alta intensidad de fuego con 11.84 t ha<sup>-1</sup> año; en el bosque quemado a una intensidad media de fuego con 7.17 t ha<sup>-1</sup> año y en el campo agrícola la pérdida de suelo fue 5.73 t ha<sup>-1</sup> año. Los valores más bajos fueron en el bosque natural y el bosque quemado con baja intensidad de fuego. Por lo anterior, los autores concluyen que los caminos poseen baja capacidad de infiltración e incrementan la escorrentía superficial, debido a esto, la producción de sedimentos está en función de la precipitación total y la superficie desnuda a lo largo de año.

Rivera *et al.* (2009), realizaron un estudio de tratamientos de la superficie de rodadura para reducir la erosión en caminos forestales en Honduras, donde efectuaron un diseño experimental de parcelas divididas en un camino forestal en los bosques de la Escuela Nacional Ciencias Forestales (ES-NACIFOR), localizado en la ciudad de Siguatepeque, Honduras. El propósito de este estudio, fue determinar y comparar la pérdida de suelo tratado con mejores prácticas de administración (BMP) y suelo tratado con prácticas tradicionales, durante y después de la construcción de los caminos forestales a lo largo de dos años consecutivos. Este diseño consistió en ocho segmentos, cada uno de los cuales de 50 m de largo, donde cuatro de estos segmentos se construyeron BPM y los otros cuatro se utilizaron los métodos tradicionales de construcción.

En los tratamientos con método BMP se utilizó para el primer año: la remodelación del camino, la limpieza de alcantarillas y la instalación de alcantarillado nuevo, el recubrimiento de la corona en dos capas de 20 cm, la compactación de la superficie de rodamiento del camino con materiales seleccionados (grava o balastre), la superficie de bombeo fue perfilada con 3 % de pendiente y las pendientes longitudinales oscilaron entre el 8 y 12 %, así como, la conformación de cunetas. El segundo año, se adicionó un tratamiento más que consistió en la incorporación de una capa de 10 cm de grava.

Para determinar la intensidad de tránsito se utilizó un contador vehicular, para la pérdida de suelo se usó un medidor de profundidades de surco que fue diseñado por los autores para medir la sección transversal durante las estaciones de lluvia en los segmentos con BMP. Los resultados de los segmentos no tratados con BMP presentaron mayor pérdida de suelo con  $500 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$  por año, y en las secciones tratadas resultó menor la pérdida de materiales inertes con  $225 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1}$  por año. Por lo que estos autores concluyeron que los tratamientos aplicados pueden reducir notablemente la erosión en la superficie y la sedimentación de suelo de hasta un 50%.

Matamoros *et al.* (2012), elaboraron una propuesta de método topográfico para el estudio de la erosión en un camino forestal, con el propósito de cuantificar el volumen de pérdida de suelo y sedimentación, en una sección del camino y poder comprobar si es factible la propuesta técnica para este tipo de estudios. Este trabajo se realizó en octubre de 2010 y mayo 2011, en la cuenca hidrológica del macizo de “Les Gavarres”, Cataluña, España, comúnmente conocida como cuenca de Vernega. El estudio se realizó en un segmento de camino de 72 metros de longitud, donde se instalaron dos hitos topográficos (señales permanentes) en los extremos para conservar la ubicación del lugar y poderse realizar las evaluaciones.

Para el registro de datos se utilizaron dos periodos de tiempo, con un sistema geográfico de “estación total Leica Flex Line TS-06”, la cual proporcionó información precisa de la cota inicial para la comparación del primer dato. En cada temporada se capturó un registro de 110 y 130 puntos a lo largo del camino, por lo que se consideraban las pendientes abruptas para la evaluación de los puntos. Con los resultados obtenidos se estimó que la pérdida de suelo fue de 7 m<sup>3</sup> producto de la erosión y 26.44 m<sup>3</sup> fue el material inerte sedimentado, con un desplazamiento neto de 19.44 m<sup>3</sup> positivos en esa parte longitudinal del camino. Por lo anterior, los autores concluyen que es viable la propuesta para cuantificar el material erosionado, puesto que el volumen de sedimentación es mayor en unas zonas determinadas, esto debido a la ubicación del camino que se encuentra en las partes bajas de la cuenca.

Hernández *et al.* (2013), realizaron un estudio para evaluar la reducción del impacto ambiental de los caminos y brechas de saca de la actual red caminera, correspondiente a la anualidad 2012 de un aprovechamiento forestal en el Municipio de San Dimas, Durango. Se compararon los impactos que se tuvieron en dicha red caminera con los que se tendrían con una red propuesta. Este

estudio consistió en georeferenciar y medir del polígono del área de corta y la longitud de los caminos que se encontraban dentro de la misma. Posteriormente, se elaboró un plano en el que se generó una capa vectorial de curvas a nivel (equidistantes a 20 m), y así, poder indicar la pendiente y la distancia de alcance del arrime de la trocería actual y de la propuesta. Después de obtener con el GPS la longitud total de cada camino, se seccionaron en gabinete las longitudes de éstos, cada 50 m. Se empleó un muestreo aleatorio con el 50 % del total de sitios posibles. En los sitios seleccionados se clavaron dos estacas de madera en el suelo y sobre las rodadas del camino, considerando que no transitaría ningún vehículo por el hecho de haber concluido el aprovechamiento del área de corta. En cada estaca se marcó el nivel inicial de suelo, con el fin de conocer la pérdida de suelo después del periodo de lluvias; además se midió el ancho del camino, la pendiente del camino y de la ladera transversal de cada sitio de muestreo.

En el procesamiento de datos se determinó la densidad caminera, la pérdida promedio de suelo de las huellas por los camiones y el área desprovista de vegetación por los diferentes tipos de camino. También se realizó un análisis estadístico para calcular el coeficiente de correlación de Spearman y la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. Los resultados obtenidos fueron que el área de corta cuenta con 92 ha y la longitud de la red caminera está compuesta por 3,127 m de camino primario, 2,907 m de camino secundario y 2,979 m de brecha de saca. La densidad caminera promedio es de  $98 \text{ mha}^{-1}$ , que equivale a una distancia promedio de arrime de la trocería de 102 m desde el camino; además se evaluó que la distancia promedio entre caminos o brechas estimadas para el área de corta fue de 120m, que equivalen a una densidad de caminos de  $83 \text{ mha}^{-1}$ ; también observaron que con frecuencia se amplía el ancho del camino por el efecto de la rodada del camión, o bien, por el tipo de mantenimiento que se realiza. Esta investigación dio como resultado que la pérdida de suelo que se obtuvo en los caminos primarios fue de  $580 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ , en caminos secundarios  $166.9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  y finalmente, en brechas de sacas  $135.9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ . Por otro lado, el coeficiente de Spearman determinó que existe significancia en las variables

evaluadas y el tipo de camino, y con la prueba de Kruscal Wallis indicó que estadísticamente los tres caminos son diferentes en la magnitud de pérdida de suelo. Mientras tanto, la red propuesta para disminuir la pérdida de suelo, fue cerrar el camino en una longitud de 1,152 m de brechas de saca para reducir el impacto en 52.5 m<sup>3</sup> de suelo, lo que significa una disminución del 61.3 % del volumen de suelo, y que una superficie de 8,221 m<sup>2</sup> se podrían incorporar al área forestal, representando esto un 19.6 % del área desprotegida por la infraestructura caminera.

Por lo anterior, los autores concluyen que el ancho del camino, la pendiente longitudinal y la transversal inciden en la pérdida de suelo por efecto de la escorrentía en las rodadas de los camiones, además, proponen eliminar el 20 % de brechas de sacas para tener una densidad caminera de 78 mha<sup>-1</sup>, reduciéndose directamente los impactos ambientales. Por otro lado, también recomiendan que en estudios posteriores se aumente el tamaño de muestra y se evalúe otras variables independientes como el grado de compactación, la presencia de cunetas y alcantarillas, el tipo de suelo en la carpeta de rodamiento, la intensidad y la frecuencia de las lluvias, así como, la cantidad de los vehículos que transitan y el peso de los mismo.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Descripción del área de estudio

##### 3.1.1 Localización

El camino forestal secundario, motivo de esta investigación, se localiza en la Sierra la Martha, Arteaga, Coahuila, en el ejido Santa Rita que se ubica en el kilómetro 112 de la carretera que conecta el poblado San Antonio de las Alazanas con el poblado Mesa de las Tablas, dicho camino se ubica al Oeste (W) de la propiedad privada y área recreativa Monterreal. Geográficamente, se sitúa entre los paralelos  $25^{\circ}13'$  de latitud Norte y  $100^{\circ}27'$  de longitud Oeste.

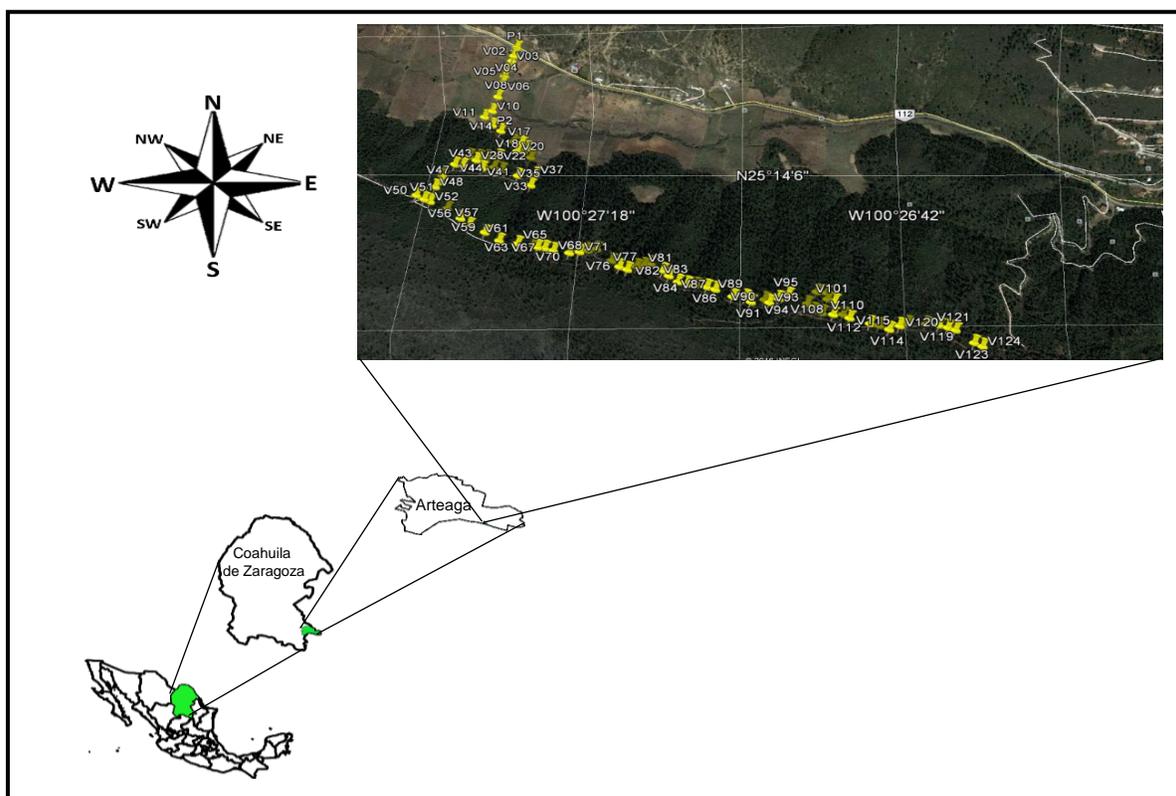


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del camino motivo de estudio.

### **3.1.2 Fisiografía**

Esta región se encuentra en las cadenas montañosas de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y dentro de ésta, está la subprovincia fisiográfica de la Gran Sierra Plegada-Flexionada, en donde el área de estudio mantiene una variación altitudinal entre los 2400 y los 2850 msnm (INEGI, 2016).

### **3.1.3 Geología**

La región montañosa está constituida por material geológico del periodo cretácico (57 %), cuaternario (33%), jurásico (9 %) y neógeno (1 %). El relieve que se presenta en esta región se caracteriza por rocas sedimentarias, tales como: caliza (46 %), caliza-lutita (9 %), lutita arenisca (8 %), conglomerado (7 %), lutita (3 %) y finalmente, brechas sedimentarias (1 %) (INEGI, 2009) (Anexo 1).

### **3.1.4 Edafología**

El suelo predominante que se distribuye en esta región montañosa es el Leptosol (53.0 %) (INEGI, 2016) y su formación se constituye por varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20 % de tierra fina. Además, se presentan los suelos kastañozem (17.6 %), phaozem (16.8 %), regosol (4.8 %), calcisol (4.0), luvisol (3.3 %) y finalmente, fluvisol (0.3 %). La topografía del área de estudio se encuentra fuertemente disectada o escarpada, permitiendo un proceso de erosión severo por efecto de las pendientes pronunciadas y el tipo de agregado

### **3.1.5 Hidrología**

El área de estudio se encuentra en la Región Hidrológica El Salado (RH37), en la Cuenca Hidrológica Sierra Madre Oriental (A) y dentro de ésta, está la Subcuenca Hidrológica San Rafael (Ab) (INEGI, 2016).

### **3.1.6 Clima**

De acuerdo a las cartas climáticas el área de estudio se encuentra comprendido en dos zonas climáticas; la primera de acuerdo con García (1964) la región se caracteriza por la predominancia de un clima (B) S1k(x'), que corresponde a un Semiárido. La segunda de acuerdo con CONABIO (1998) y CNA (2016), el clima es Cw1 denominándolo templado subhúmedo. De acuerdo a los datos registrados de 1950 a 2010 de la estación meteorológica San Antonio Las Alazanas, que se ubica a 13.4 km del área de estudio, registrándose la siguiente información: las temperaturas medias anuales de 12° a 18°C, la temperatura promedio es de 14.24°C, la temperatura máxima es de 26.1°C presentándose en el mes de mayo y las temperaturas mínimas en el mes de enero entre -3° y 18°C, con una mínima promedio de 4.2°C. La precipitación total anual promedio es de 375.4 mm, con una precipitación máxima de 120 mm en el mes de septiembre y una mínima de 22 mm en el mes marzo, las lluvias de verano se manifiestan en los meses de julio y agosto.

### **3.1.7 Vegetación**

Rzedowski (2006), clasifica la vegetación de esta zona como bosque de coníferas. En el Cuadro 1 se muestra la vegetación más representativa de los bosques de coníferas del sur de Coahuila (Macías, 2015)

Cuadro 1. Principal vegetación en la región boscosa del sur de Coahuila.

Nombre común	Nombre científico	Estatus
Oyamel	<i>Pseudotsuga menziensis</i>	Pr
	<i>Pseudotsuga flahaulti</i>	Pr
	<i>Abies vejari</i>	A
Pino	<i>Pinus culminicola</i>	P
	<i>Pinus rudis</i>	
	<i>Pinus cembroides</i>	
	<i>Pinus ayacahuite</i>	
	<i>Pinus hartwegii</i>	
	<i>Pinus pseudostrobus</i>	
	<i>Pinus teocote</i>	
	<i>Pinus arizonica</i>	
	<i>Pinus greggii</i>	
	<i>Pinus pinceana</i>	P
	Picea	<i>Picea engelmannii</i> var. <i>mexicana</i>
Cipres	<i>Cupressus arizonica</i>	
Encino	<i>Quercus hypoxantha</i>	
	<i>Quercus greggii</i>	
	<i>Quercus sideroxyla</i>	
	<i>Quercus rugosa</i>	
	<i>Quercus emoryi</i>	
Cedro	<i>Juniperus monosperma</i>	
	<i>Juniperus saltilensis</i>	
Madroño	<i>Arbutus xalapensis</i>	
Manzanita	<i>Arctostaphylos pungens</i>	
Palma samandoca	<i>Cercocarpus mojadensis</i>	
	<i>Yucca carnerosana</i>	
Sotol	<i>Gymnosperma glutinosumy</i>	
	<i>Dasyllirion spp</i>	
Maguey	<i>Agave nictarina</i>	
Lechuguilla	<i>Agave lechuguilla</i>	
Cortadillo	<i>Nolina cespitifera</i>	
Orégano	<i>Lippia sp</i>	
Tagetes	<i>Tagetes sp</i>	
Lantrisco	<i>Rhus virens</i>	
	<i>Bromus spp</i>	
	<i>Vulpiaocta flora</i>	

Nombre común	Nombre científico	Estatus
	<i>Geranium mexicanum</i>	
	<i>Hibiscus cardiophyllus</i>	

### 3.1.8 Fauna

De acuerdo a la literatura citada, la fauna que se distribuye en el sur del estado y que se considera como la más representativa de los bosques de la Sierra de Arteaga, Coahuila se muestra en el Cuadro 2 (Macías, 2015).

Cuadro 2. Fauna representativa de los bosques de la Sierra de Arteaga, Coahuila.

Nombre común	Nombre científico	Estatus
<b>Mamíferos</b>		
Oso negro	<i>Ursus americanus</i>	P
Venado cola blanca	<i>Odoilecus virginianus</i>	
Puma	<i>Felis concolor</i>	
Coyote	<i>Canis latrans</i>	
Zorra gris	<i>Urocyon cinereoargenteus</i>	
Pecarí de collar	<i>Tayassu tajacu</i>	
Gato montes	<i>Lynx rufus</i>	
Zorrillo	<i>Conepatus leuconotus</i>	
	<i>Conepatus semistriatus</i>	
	<i>Conepatus mesoleucus</i>	
Cacomiztle	<i>Basariscus astutus</i>	
Comadreja	<i>Mustela frenata</i>	
Tlacuache	<i>Didelphis virginiana</i>	
Mapache	<i>Procyon lotot</i>	
Liebre	<i>Lepus sp.</i>	
Conejo	<i>Sylvilagus audubonii</i>	
	<i>Sylvilagus floridanus</i>	
Ardillas	<i>Sciurus spp.</i>	
Ardillon	<i>Spermophilus variegatus</i>	
Tuza	<i>Crategeomys castonops</i>	
Rata de campo	<i>Dipodomys ordii</i>	

Nombre común	Nombre científico	Estatus
	<i>Chaetodipus nelson</i>	
Murciélago	<i>Mormoops megalophylla</i>	
	<i>Choeronycteris mexicana</i>	
	<i>Leptonycteris curasoae</i>	
	<i>Leptonycteris novalis</i>	
<b>Aves</b>		
Zopilote	<i>Coragyps atratus</i>	
Aura	<i>Carthartes aura</i>	
Lechuza de campanario	<i>Tyto alba</i>	
Águila cola roja	<i>Buteo jamaicensis</i>	Pr
Aguililla de Harris	<i>Parabuteo unicinctus</i>	Pr
Aguililla pantanera	<i>Circus cyaneus</i>	
Cernicalo	<i>Falco sparverius</i>	
Halcón mexicano	<i>Falco mexicanus</i>	
Águila aura	<i>Buteo albonatus</i>	Pr
Gavilán estriado	<i>Accipiter striatus</i>	Pr
Cuervo	<i>Corvus sp</i>	
Codorniz escamosa	<i>Callipepla squamata</i>	
Codorniz pinta	<i>Cyrtonix montezumae</i>	
Paloma huilota	<i>Zenaida macroura</i>	
Paloma de collar	<i>Patagioenas fasciata</i>	Pr
Guacamaya enana	<i>Rynchopsitta terrisi</i>	
Azulejo	<i>Aphelocoma sordida</i>	
Colibrí	<i>Caolothoraz lucifer</i>	
<b>Herpetofauna</b>		
Serpientes	<i>Crotalus sp</i>	
	<i>Ficima sp</i>	
	<i>Pituophis sp</i>	
	<i>Hypsiglena sp</i>	
Lagarto de Texas	<i>Gerrhonotus liocephalus</i>	Pr
Camaleón	<i>Holbrookia sp</i>	

### **3.1.9 Metodología**

Para este apartado y los subsecuentes, se debe aclarar que se usará la expresión “desplazamiento negativo de suelo” para indicar que hay una “pérdida” de suelo y “desplazamiento positivo de suelo” para indicar un “acumulamiento” del mismo.

#### **3.1.9.1 Método de varillas modificadas**

Este método se fundamenta en el procedimiento de varillas marcadas propuesto por Becerra (1999) y Hudson (1997), el cual fue adaptado para este trabajo, en su diseño de muestreo y distribución de las varillas para poder determinar el desplazamiento negativo de suelo (pérdida) por efecto del tránsito de los vehículos y a la escorrentía superficial del camino. En gabinete, éste se segmentó en secciones de 30 m, determinándose el número total de estaciones (N); posteriormente, se determinó el número de estaciones a muestrear (n). Se empleó un muestreo completamente al azar de las estaciones totales del camino. Una vez realizado esto, se iniciaron las actividades en campo en abril del 2015 y las lecturas finales se tomaron en enero del 2016.

Durante la aleatorización de las estaciones se identificaron las que se iba a muestrear, a éstas, se les clavaron dos varillas en los bordes externos del camino, donde cada varilla tuvo una longitud de 30 cm; 25 centímetros se clavaron en el suelo y cinco centímetros se dejaron en la superficie; primero, porque en ese momento se marcaron con pintura acrílica a nivel del suelo para indicar el nivel de éste de manera inicial, y segundo, para poder identificarse cuando se tomaran las mediciones finales; posteriormente, se sujetó en ambas varillas un hilo el cual se tensó sobre la marca de pintura; midiendo el ancho del camino y la profundidad (distancia) que había de éste hacia el nivel del suelo; estas mediciones se realizaron cada 20 cm debido a que el camino se mantenía en uso y no se podían colocar la varilla en la parte central de la huella de la rodada. Con lo anterior, se podrá determinar el ancho del camino y medir la irregularidad transversal de éste;

generándose una gráfica que definirá el perfil transversal de cada estación muestreada.

En cada estación se determinó el tipo de camino, la altitud, la dirección de bombeo, la exposición, las forma de erosión presente en la carpeta de rodamiento, el porcentaje de recubrimiento, el porcentaje del diámetro de los agregados, el porcentaje de vegetación en el centro y en la rodada del camino, y finalmente, se midió el gradiente de la pendiente transversal y de la longitudinal del camino.

### **3.1.9.2 Análisis de suelo**

Se realizó un muestreo de suelo para determinar sus propiedades físicas. El camino se dividió en tres partes, y en cada una de éstas de forma aleatoria se levantaron tres muestras de suelo (aproximadamente de dos kilogramos) con una pala recta 25-30 cm de profundidad en la parte central respecto al ancho del camino; se quitó la capa superficial de materia orgánica del suelo, posteriormente, ese volumen de suelo se depositó en una bolsa de polietileno, mismas que se identificaron y etiquetaron, las cuales se analizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. En un lugar seco y ventilado las muestras de suelo se orearon durante 24 horas hasta que el porcentaje de humedad fuera el mínimo necesario para destruir los terrones con la mano y con un rodillo de madera se molieron los gránulos de mayor tamaño. Después de tener la desintegración de los gránulos se les pasó por el tamiz de 2 mm (aproximadamente 10 mallas), obteniendo un kilo de suelo tamizado para cada muestra, determinando la textura, la densidad aparente y el pH.

Los siguientes procedimientos se emplearon para todas las muestras de suelo.

En la determinación de la textura se pesaron 50 gr de suelo tamizado y se depositó en un vaso de batidora, agregándole 20 ml de hexametáfosfato de sodio

con 100 ml de agua y posteriormente, el vaso se aforo con agua, de tal manera que no se derramara durante su agitación; el vaso que contiene la muestra se colocó en la batidora por 5 minutos, después de agitar se pasó la suspensión del suelo a la probeta de 1000 ml y se lavó con una piseta el vaso de aluminio para transferir toda la muestra, posteriormente se aforo con agua potable la probeta; con una varilla metálica se agito la suspensión de la probeta de 1000 ml, durante un minuto para introducir el hidrómetro de boyoucos por 40 segundos y poder registrar la primera lectura del hidrómetro (R1) y la temperatura (T1); este mismo procedimiento se realizó después de 60 minutos para registrar la segunda lectura. A todas las muestras se le tomaron dos lecturas.

Con los registros de la primera y la segunda lectura se calculó los porcentajes de arena, limo y arcilla con la expresión matemática que se determina los elementos de la textura es la siguiente.

$$P = \left[ \frac{(R + \Delta R) - (RC + \Delta RC)}{W} \right] * 100$$

Donde:

P = Por ciento.

R = Lectura del hidrómetro en solución a los 40 segundos.

$\Delta R$  = Corrección por temperatura en la probeta.

RC = Lectura del Hidrómetro en solución dispersora.

$\Delta RC$  = Corrección por temperatura en la probeta con solución dispersora.

W = Peso seco de la muestra.

Fórmula para corrección de la temperatura  $\Delta R = (T - 20^{\circ}\text{C}) 0.4$

Además se usó el triángulo de textura de suelo que se muestra en la Figura 2 para obtener la denominación textural de las muestras.

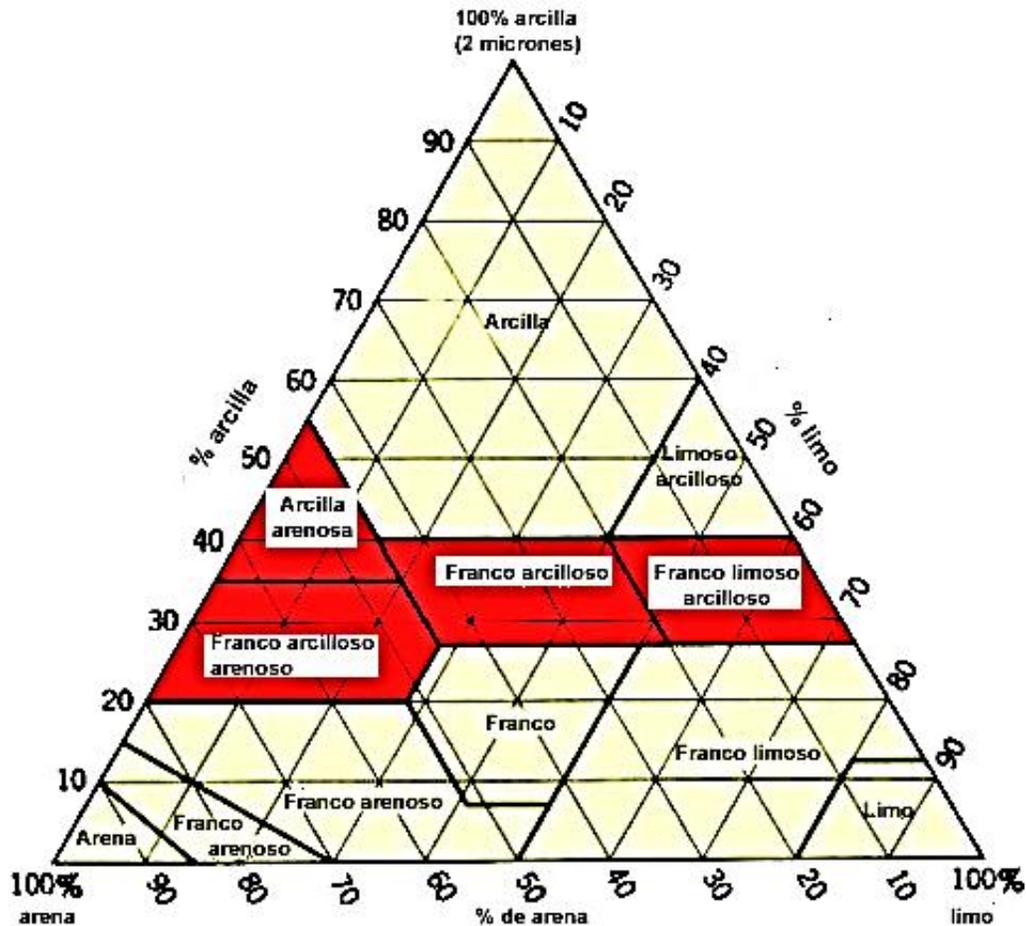


Figura 2. Triángulo de clases texturales básicas del suelo según el tamaño de partículas.  
Fuente: De acuerdo con U.S.D.A., citado por FAO, 2016.

Para determinar la densidad aparente del suelo se pesaron 100 gr de suelo tamizado y se agregó en un recipiente de vidrio; después éste se introdujo a la estufa de secado de aire a 110 °C por 24 horas; posteriormente, se pesó una probeta de 100 ml y se agregó 50 gr de suelo (estufado), se registró una primera lectura del peso y del volumen de suelo de la misma; se colocó sobre la mesa de trabajo un pedazo de franela humedecida con varios dobleces para golpear la

probeta hasta 30 veces con una frecuencia de golpe por segundo y una trayectoria vertical de 20-30 cm para compactar el suelo; después se volvió a tomar la segunda lectura del peso y el volumen del suelo. Teniendo el registro de la primera lectura y la segunda lectura para todas las muestras. En la siguiente expresión matemática se muestra la forma de calcular la densidad aparente del suelo.

$$D_a = \frac{M_s}{V_t}$$

Donde:

$D_a$  =Densidad aparente

$M_s$  =Masa del suelo

$V_t$  =Volumen total

Para determinar el pH del suelo se pesaron 20 gr de suelo tamizado y se midieron 40ml de agua destilada para añadirlos a un vaso de precipitado de 100 ml; después se agitó la suspensión por 30 minutos, mientras que en ese tiempo, se estandarizaba el potenciómetro con una solución buffer de 4 y 7 pH; posteriormente se tomó el pH y la temperatura. Con los registros del pH se procedió a utilizar la escala que se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Términos usuales para describir los intervalos del pH en el suelo

Acidez o alcalinidad	pH del suelo
Excesivamente ácido	Menor de 4
Fuertemente ácido	4 – 5
Modernamente ácido	5 – 6
Ligeramente ácido	6 – 6.5
Neutro	6.5 – 7.5
Ligeramente alcalino	7.6 – 8.5
Fuertemente alcalino	8.6 -10
Excesivamente alcalino	10 o más

Fuente: Cepeda, 1991.

### 3.1.10 Muestreo simple aleatorio o al azar simple

Este tipo de muestreo se considera el más sencillo debido al procedimiento que se emplea en el proceso de selección ( $n$ ), el cual consiste en extraer una muestra ( $n$ ) de la población total ( $N$ ), de tal manera que cada una de las muestras tengan la misma oportunidad (probabilidad) de ser elegidas (Casanoves *et al.*, 2008).

Para llevar a cabo el muestreo aleatorio se realizó un listado de todas las estaciones (definidas en el apartado donde se describe el método de varillas modificado) del camino ( $N$  poblacional), asignándole un número consecutivo para identificarlas y sujetarlas al proceso aleatorio (Casanoves *et al.*, 2008). Este muestreo tiene un procedimiento monoetápico sin reemplazo, es decir, cada

estación en particular solo se le permite aparecer una sola vez en el proceso aleatorio (Vivanco, 2005).

### 3.1.11 Tamaño de muestra

Para el camino motivo de investigación se empleó un tamaño de muestra que se determinó con la expresión matemática para una proporción, en donde la proporción esperada se manejó del 50 % (porque no se sabía lo que se pudiera esperar) obteniéndose una  $n$  muestral igual a 93 estaciones. Realizándose 100 estaciones muestreadas en dicho camino. La expresión matemática utilizada fue la siguiente:

Tamaño de muestra para una proporción

$$n = \frac{NZ^2p(1 - p)}{(N - 1)e^2 + Z^2p(1 - p)}$$

Dónde:

$n$  = Tamaño de muestra

$N$  = Tamaño de población (Número total de estaciones)

$Z$  = 1.96 (Esto es con una confiabilidad del 95%)

$e$  = Margen de error permitido (5%)

$p$  = Proporción esperada si no se tiene idea de lo que se espera,  $p$  = 50%

### 3.1.12 Análisis estadístico

Una vez que se tuvieron los registros de la primera y la segunda medición de la pérdida de suelo del camino, se realizó la conversión de unidades de centímetros a metros para efectuar la cuantificación del desplazamiento negativo de suelo (pérdida de suelo) en  $m^3ha^{-1}$ , mediante la expresión matemática de rodada o huellas máximas propuesta por Hernández *et al.* (2013).

$$Ps = (Ni - Nf) * 10,000 m^2$$

Dónde:

Ps = Pérdida de promedio de suelo en las huellas de los vehículos forestales  $m^3 ha^{-1}$

Ni = Nivel inicial de la rodada del vehículo forestal

Nf = Nivel final de la rodada del vehículo forestal

Con el registro de las variables valoradas de la carpeta de rodamiento del camino, se procedió a clasificar las variables cuantitativas y las cualitativas, como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 3. Variables evaluadas de la carpeta de rodamiento del camino motivo de estudio.

Cuantitativas	Unidades	Cualitativas	Cualidad
Pendiente transversal y longitudinal del camino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje (%)</li> </ul>	Tipo de camino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secundario</li> </ul>
Altitud	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metros (msnm)</li> </ul>	Dirección del bombeo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Norte</li> <li>• Sur</li> <li>• Este</li> <li>• Oeste</li> </ul>
Rangos de recubrimiento del camino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje (%)</li> </ul>	Exposición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Norte</li> <li>• Sur</li> <li>• Este</li> <li>• Oeste</li> </ul>

Cuantitativas	Unidades	Cualitativas	Cualidad
Rangos de los diámetros en los agregados	• Porcentaje (%)	Condiciones del camino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buenas condiciones</li> <li>• Malas condiciones</li> </ul>
Rangos de presencia de vegetación (en el centro y en la huella de la rodada del camino)	• Porcentaje (%)	Formas de erosión presentes en el camino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laminar</li> <li>• Surcos</li> <li>• Cárcavas</li> </ul>
		Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si</li> <li>• No</li> </ul>

Con las variables anteriores, se realizaron análisis gráficos para conocer y describir el volumen de suelo desplazado (acumulado o perdido) por efecto de las variables cuantitativas y cualitativas del camino. Se analizó la información de campo por medio de la estadística descriptiva, utilizando valores promedios para las variables de pérdida y acumulación de suelo por medio de la expresión matemática **a)** para promedio, y para el tipo de camino, la altitud, la dirección de bombeo, la exposición, las forma de erosión presente en la carpeta de rodamiento, el porcentaje de recubrimiento, el porcentaje del diámetro en los agregados, el porcentaje de vegetación en el centro y en la rodada del camino, y finalmente, el gradiente de la pendiente transversal y longitudinal del camino, para lo cual se utilizó la expresión matemática **b)** para proporciones.

Se aclara que para fines de este trabajo, los valores de algunas variables se manejarán de la siguiente manera: para algunas proporciones los valores estarán comprendidos entre  $-1 \geq 0 \leq 1$ ; mientras que para otras variables los valores se manejarán en porcentajes, los cuales oscilarán entre 0 % y 100 %

**a)** Intervalo de confianza para un promedio ( $\mu$ )

$$p \left( \bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \right) = (1-\alpha)100$$

Dónde:

$\bar{x}$  = Media de la muestra

$t_{\alpha/2} = n - 1$

$\alpha = 0.05$  error aceptado.

$s$  = Desviación estándar de la muestra

$n$  = Tamaño de la muestra

**b) Intervalos de confianza para proporciones**

$$\rho = \left( \hat{p} \pm Z_{\alpha/2} \sqrt{\hat{p} \left( \frac{1-\hat{p}}{n} \right)} \right) = (1-\alpha)100$$

Dónde:

$\hat{p}$  = Proporción

$Z_{\alpha/2} = 1.96$  (percentil de la tabla de distribución "Z")

$\alpha = 0.05$  (error aceptado)

$n$  = Tamaño de la muestra

También se realizaron correlaciones para determinar el nivel significativo y la relación que comparte el desplazamiento negativo de suelo (pérdida de suelo) con la pendiente longitudinal y la transversal, lo cual es necesario hacer la prueba de hipótesis al coeficiente de correlación que se establece como:

$$H_0: r=0 \quad \text{y} \quad H_a: r \neq 0$$

Para contrastar  $H_0$  se obtuvo el error estándar (E.E.) de  $r$  con la siguiente ecuación:

$$\text{E. E. } r = \left( \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}} \right) = (1 - \alpha)100$$

Donde:

$r$  = Coeficiente de correlación

$n - 2$  = Tamaño de muestra menos 2 grados de libertad

$\alpha$  = 0.05% error aceptado

Posteriormente, se procedió a realizar una regresión lineal simple (parámetros a y b) para ver si se podría predecir la tendencia y la distribución de los valores promedio de la erosión hídrica del camino.

### 3.1.13 Materiales utilizados

- Material cartográfico (cartas INEGI) 1: 1 000 000, 1: 250 000
- GPSMAP 76CSx GARMIN
- Cámara digital
- Software
  - Word
  - Excel
  - Statistical Analysis System (SAS).
- Quantum GIS (QGIS) Pisa 2.10.1
- Google Earth
- Materiales y equipo del laboratorio de suelos
  - Hexametáfosfato de sodio
  - Solución buffer pH 7 y pH 4
  - Agua destilada
  - Potenciómetro
  - Balanza analítica
  - Termómetro
  - Batidora eléctrica doméstica con vaso de aluminio
  - Hidrómetro de Boyoucos
  - Probetas (50ml, 100ml y 1000ml)
  - Vaso precipitado (100ml)
  - Tamizador
  - Piseta
  - Varilla metálica
  - Agitador de vidrio

- Franela

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El camino motivo de estudio se encuentra en una gradiente altitudinal que mantiene ciertas características físicas y topográficas, lo que facilita el proceso de erosión hídrica en la carpeta de rodamiento. En el rango altitudinal 2,641-2,680 m.s.n.m., presenta mayor desplazamiento negativo de suelo por poseer una topografía abrupta y disectada que permite y facilita la pérdida de suelo.

El camino se encuentra ubicado en un rango altitudinal que va de los 2,520 a los 2,880 m.s.n.m. En la Figura 3 se muestran los ocho rangos altitudinales y el volumen de suelo con desplazamiento negativo a lo largo del camino; la equidistancia entre puntos altitudinales fue de 40 m.

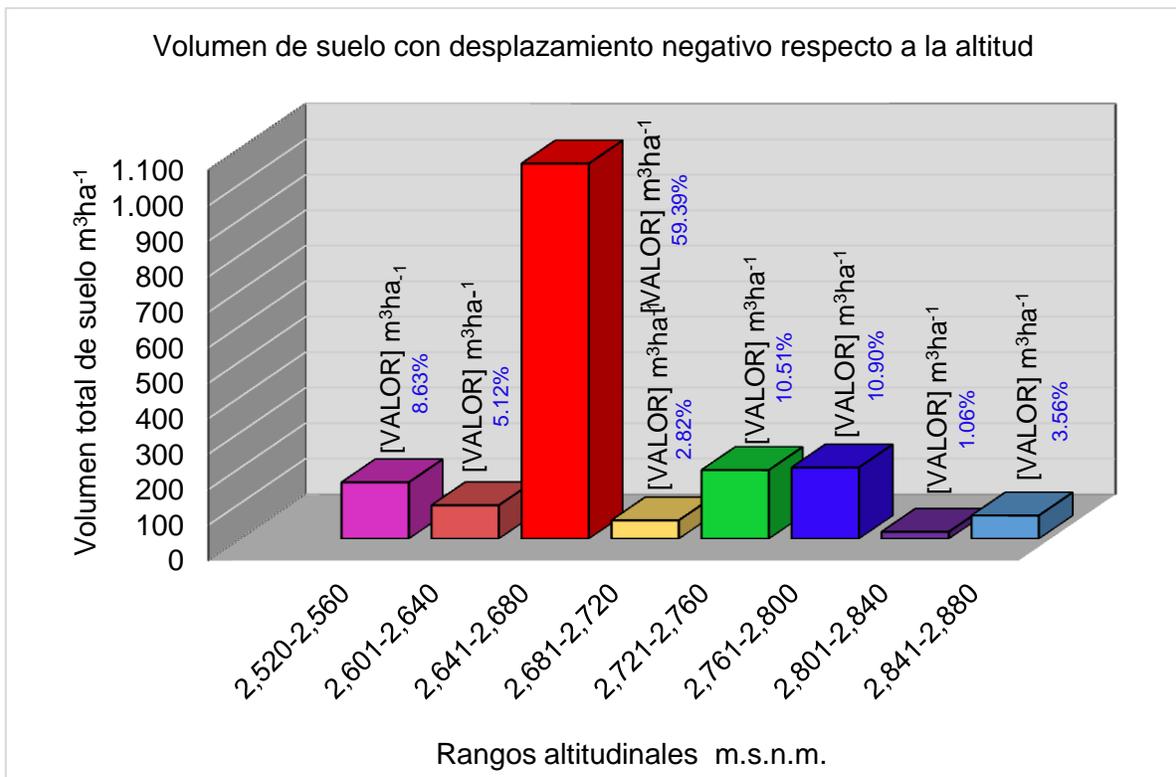


Figura 3. Volumen de suelo con desplazamiento negativo en los ocho rangos altitudinales presentes en el camino motivo de estudio.

El mayor desplazamiento negativo de suelo se presentó en el rango altitudinal 2,641-2,680 m.s.n.m. con una pérdida de suelo de 1,057.30 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, que equivale a una proporción del 0.57, lo anterior indica, que en este rango altitudinal se encontró el mayor volumen de suelo perdido; mientras que, en el rango de 2,761-2,800 m.s.n.m. presentó la menor pérdida de suelo, con una proporción del 0.11, que representa 200.79 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>. En el Cuadro 5 se pueden observar las diferentes proporciones del desplazamiento negativo de suelo de cada rango altitudinal. Se muestran además, los intervalos de confianza para proporciones, pudiéndose observar que todas las proporciones están dentro de sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 4. Rangos altitudinales del camino, volumen de suelo con desplazamiento negativo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Rangos altitudinales (m.s.n.m.)	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
2,520-2,560	2	158.98	0.09	-0.03	0.20
2,601-2,640	3	94.35	0.05	-0.04	0.14
2,641-2,680	4	1,057.30	0.57	0.37	0.78
2,681-2,720	1	52.00	0.03	-0.04	0.10
2,721-2,760	6	193.59	0.11	-0.02	0.23
2,761-2,800	4	200.79	0.11	-0.02	0.24
2,801-2,840	1	19.62	0.01	-0.03	0.05
2,841-2,880	1	65.63	0.04	-0.04	0.11
	<b>22</b>	<b>1,842.23</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Este camino presenta condiciones topográficas y físicas que permiten el desprendimiento y la disgregación de las partículas de suelo por efecto de la escorrentía superficial, lo cual provoca diferentes grados de desplazamiento positivo de suelo en la carpeta de rodamiento del mismo. De acuerdo a las mediciones y a los resultados obtenidos, el rango donde se presentó un mayor acumulamiento de suelo se localiza en los 2,761-2,800 m.s.n.m.

En la Figura 4 se puede observar los ocho rangos altitudinales y el volumen de suelo con desplazamiento positivo que se presentó a lo largo del camino.

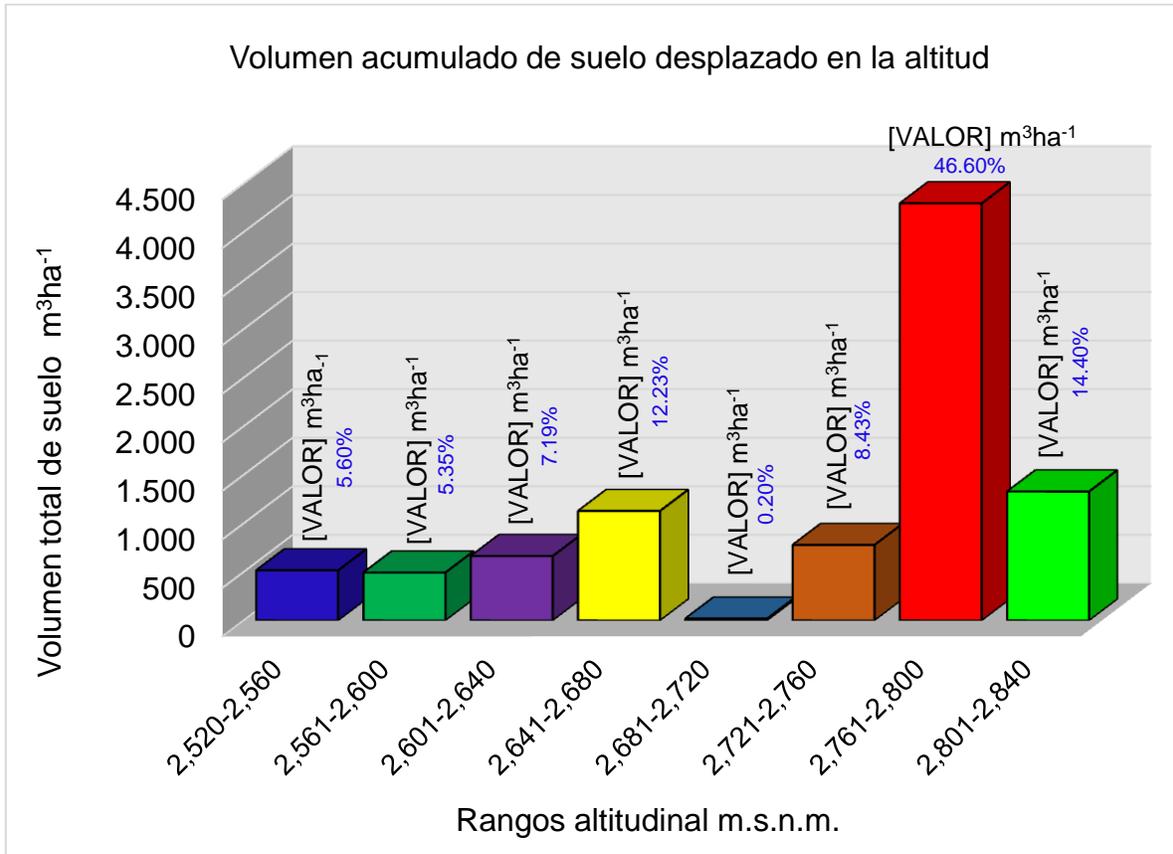


Figura 4. Volumen de suelo con desplazamiento positivo en los ocho rangos altitudinales presentes en el camino motivo de estudio.

El desplazamiento positivo de suelo se presentó en el rango altitudinal de los 2,761-2,800 m.s.n.m. con una proporción de 0.47, que corresponde a un acumulamiento de suelo de 4,295.19  $m^3ha^{-1}$ . Lo anterior, indica que en este rango fue donde se obtuvo el mayor acumulamiento de suelo y que la estación 86 fue en la que se determinó el mayor desplazamiento de suelo con 492.14  $m^3ha^{-1}$ . En el rango 2,721-2,860 y el rango 2,801-2,840, en donde ambos rangos mantienen el mismo número (8) de estaciones, presentan una proporción de suelo acumulado de 0.08 y de 0.14 respectivamente. Lo anterior se presenta, porque se presentan

diferentes características topográficas y físicas del suelo, lo que permite distinto nivel de desprendimiento del suelo por efecto de la escorrentía superficial. En el Cuadro 6, específicamente en la columna 5, se pueden observar los diferentes intervalos de confianza para las proporciones estimadas. También se presentan las proporciones del volumen de suelo con desplazamiento positivo, apreciándose que todos los rangos están dentro de los intervalos de confianza, a excepción del rango altitudinal de 2,681-2,720 que presenta una proporción mínima de 0.002 ( $18.82 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ).

Cuadro 5. Rangos altitudinales del camino, volumen de suelo con desplazamiento positivo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Rangos de altitudinales (m.s.n.m.)	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
2,520-2,560	3	515.78	0.06	-0.004	0.116
2,561-2,600	3	493.19	0.05	-0.005	0.112
2601-2,640	4	662.85	0.07	0.004	0.140
2,641-2,680	7	1,127.04	0.12	0.036	0.208
2,681-2,720	1	18.82	0.002	-0.010	0.014
2,721-2,760	8	777.32	0.08	0.012	0.157
2,761-2,800	22	4,295.19	0.47	0.335	0.597
2,801-2,840	8	1,327.24	0.14	0.052	0.236
	<b>56</b>	<b>9,217.43</b>	<b>1.00</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>

En base a la información tomada en campo y a los resultados obtenidos, se puede sugerir, el efecto que bien pudieran tener las exposiciones del camino respecto del sol, es decir, que las exposiciones sur (S) y este (E) reciben una mayor radiación solar, por lo que se presentan menores contenidos de humedad “ambiental”; en contra posición, las exposiciones norte (N) y oeste (W) presentan mayores contenidos de humedad “ambiental”; la cual provoca encharcamientos y deformaciones en el camino. El camino motivo de estudio se desarrolla en exposiciones predominantemente norte (N), lo que genera que éste sea más

sombreado y húmedo, que, aunado a su denominación textural (arcilloso) se incrementa la plasticidad de la carpeta de rodamiento, provocando un menor desplazamiento de suelo y una mayor deformación del camino.

En la Figura 5 se puede observar que a lo largo del camino el desplazamiento negativo de suelo solo se presentó en tres exposiciones topográficas francas.

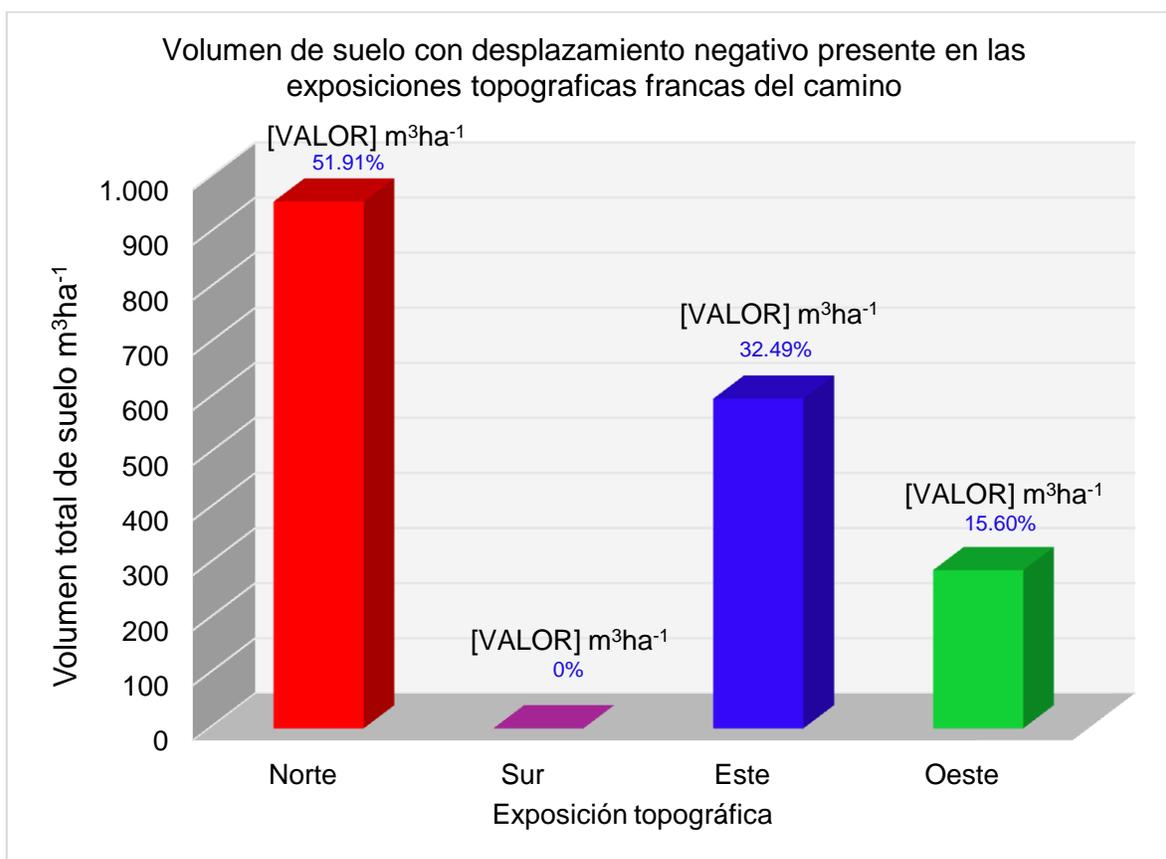


Figura 5. Volumen de suelo con desplazamiento negativo presente en las exposiciones topográficas francas del camino.

De acuerdo a los resultados, el camino presentó un desplazamiento negativo total de suelo de  $1,842.23 m^3ha^{-1}$ , de este volumen la exposición norte (N), mostró una pérdida de suelo de  $956.34 m^3ha^{-1}$ , representando el 0.52 del volumen total de

suelo con desplazamiento negativo, esta exposición fue la de mayor pérdida de suelo; la exposición oeste (W) mostró una pérdida de suelo de 287.31 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, equivalente al 0.16 del volumen total. En el Cuadro 7, se puede observar que en la columna 4 se presentan las proporciones del volumen de suelo perdido en las diferentes exposiciones del camino; cabe mencionar que todas ellas se encuentran dentro de los límites de los intervalos de confianza de las proporciones para cada una de éstas.

Cuadro 6. Exposiciones topográficas francas, volumen de suelo con desplazamiento negativo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Exposiciones topográficas	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Proporciones	Intervalo de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
Norte (N)	11	956.35	0.52	0.310	0.73
Sur (S)	0	0.00	0.00	0.000	0.00
Este (E)	4	598.58	0.32	0.129	0.52
Oeste (W)	7	287.31	0.16	0.004	0.31
	<b>22</b>	<b>1,842.23</b>	<b>1.00</b>	<b>1.000</b>	<b>1.00</b>

De acuerdo a la revisión bibliográfica, puede sugerirse que la influencia de las exposiciones topográficas respecto del camino, influyen en las buenas y las malas condiciones de la carpeta de rodamiento, ya que el contenido de humedad permitido por las diferentes exposiciones puede perjudicar directamente las características físicas y técnicas del camino durante la vida útil de éste. En la Figura 6, se pueden observar las cuatro exposiciones topográficas francas y el volumen de suelo con desplazamiento positivo, que se presenta a lo largo del camino.

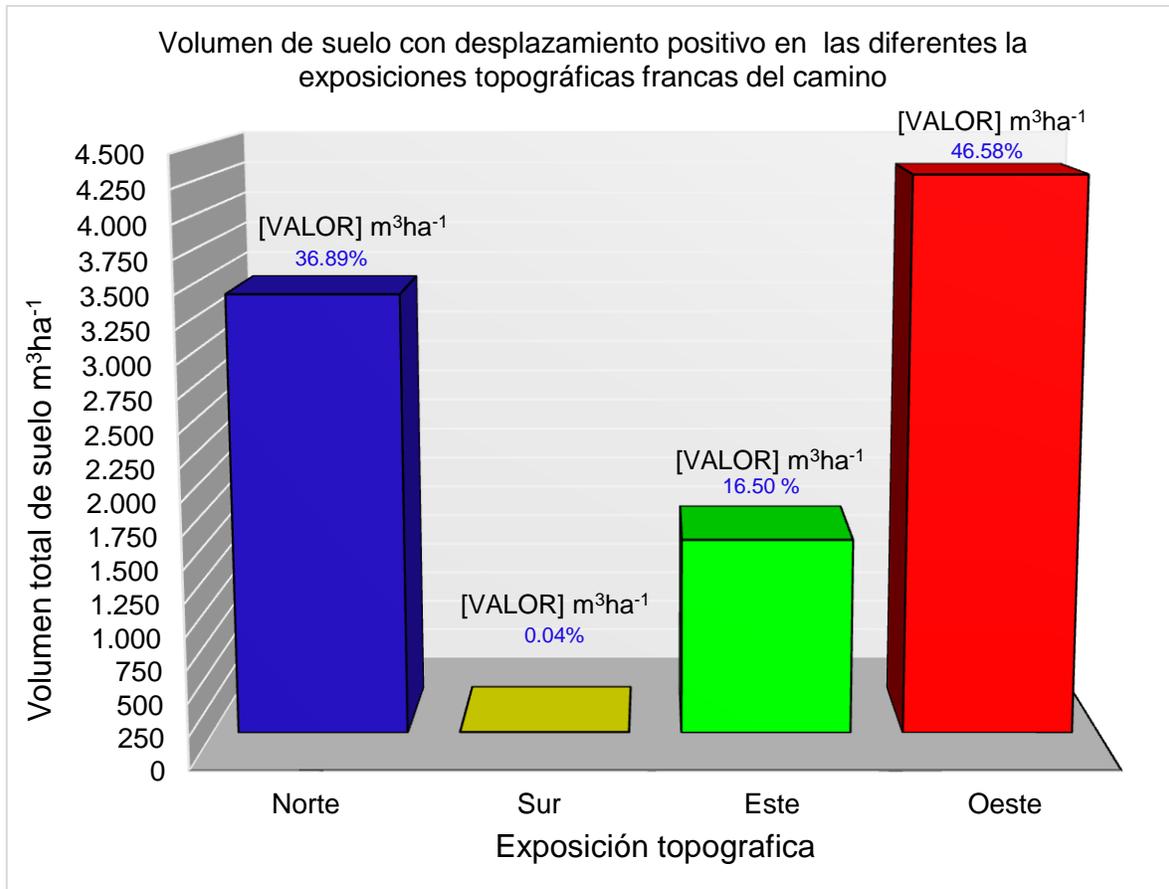


Figura 6. Volumen de suelo con desplazamiento positivo en las diferentes exposiciones topográficas francas del camino.

En el Cuadro 8, se puede observar que el volumen de suelo con desplazamiento positivo se concentró en las exposiciones norte (N) y oeste (W) que presentaron un alto contenido de humedad, sugiriendo esto, que la estructura del suelo de la carpeta de rodamiento del camino se modificó por efecto del tránsito de los vehículos pesados y la escorrentía superficial. En la exposición oeste (W) se presentó un acumulamiento de suelo de  $4,293.06 m^3ha^{-1}$ , que representa una proporción del 0.47; en esta exposición fue donde se presentó un mayor desplazamiento de suelo; mientras que, la exposición sur (S) mostró un desplazamiento de suelo de  $3.53 m^3ha^{-1}$ , con una proporción de 0.0004, indicando un menor acumulamiento de suelo en el camino.

En este mismo Cuadro, la columna 5 muestra los intervalos de confianza para las proporciones, observándose que las proporciones del volumen de suelo con desplazamiento positivo de las exposiciones, norte (N), oeste (W) y este (E) se encuentran dentro de sus respectivos intervalos de confianza, mientras a diferencia de la exposición sur (S), ésta se encuentra fuera de su intervalo.

Cuadro 7. Exposiciones topográficas francas, volumen de suelo con desplazamiento positivo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Exposiciones topográficas en el camino	Frecuencia (No. De estaciones)	Volumen $m^3ha^{-1}$	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
Norte (N)	26	3,399.97	0.37	0.242	0.50
Sur (S)	1	3.53	0.0004	-0.005	0.01
Este (E)	10	1,520.87	0.16	0.078	0.26
Oeste (W)	19	4,293.06	0.47	0.345	0.60
	<b>56</b>	<b>9,217.43</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Packer *et al.* (2014), indican que entre mayor sea el porcentaje de superficie que se encuentre cubierta por agregados de diámetros  $\geq 0.25$  cm, será menos probable el proceso de erosión hídrica en los caminos de terracería por efecto de la escorrentía superficial, o bien, por deshielos como se muestra en el Anexo 2 los estados físicos de mezclas de suelos y agregados (adaptación de Yoder and Witzark, 1975, citado por Sherar y Keller 2008).

En la Figura 7, se pueden apreciar los rangos en porcentajes de acuerdo al tamaño de los agregados que se presentaron en la carpeta de rodamiento del camino, así como el volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) por efecto de la escorrentía superficial.

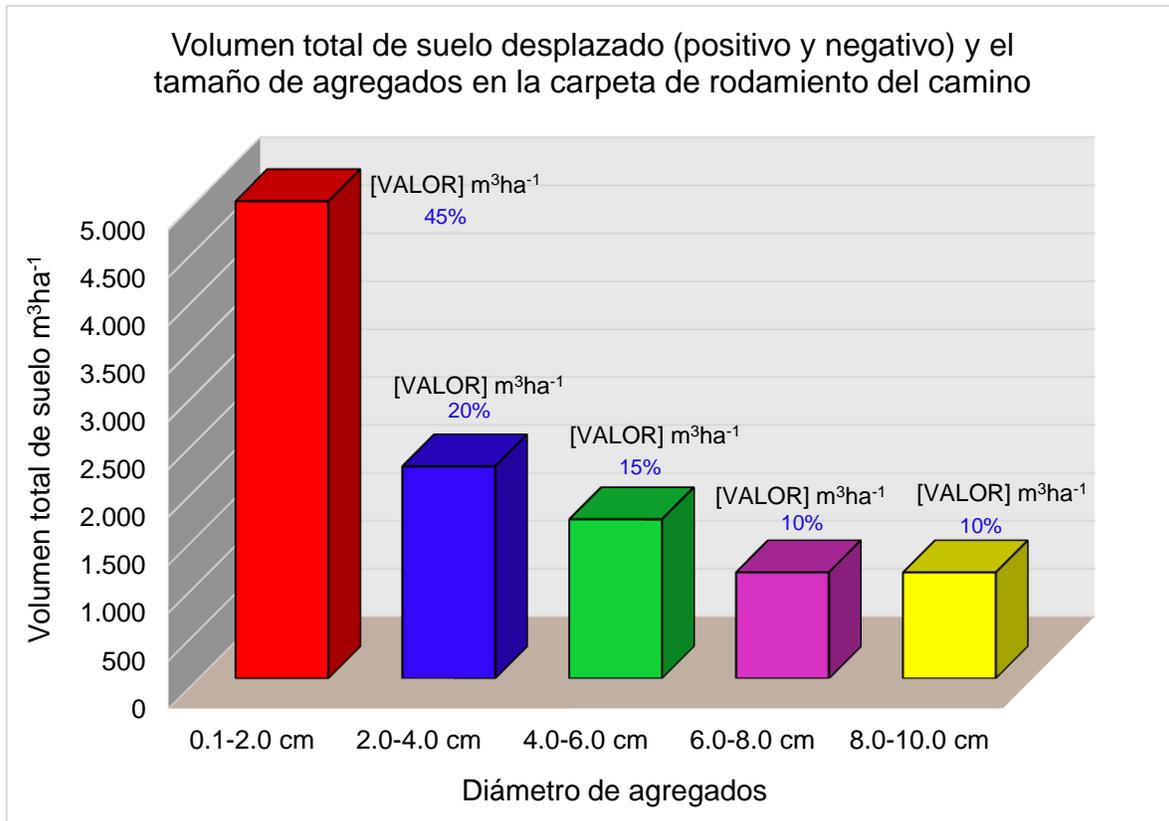


Figura 7. Volumen total de suelo desplazado en los porcentajes de agregados de la carpeta de rodamiento del camino.

De acuerdo a los diámetros de los agregados que se mantienen a lo largo del camino, se puede observar en la columna 3 del Cuadro 9, la susceptibilidad que presenta el suelo respecto al desprendimiento de partículas, por efecto de las precipitaciones; se aprecia, que entre más pequeños sean los diámetros de los agregados, es mayor el volumen de suelo desplazado, y que, el tamaño de los agregados está estrechamente relacionado con la textura del suelo, interviniendo esta última, en la retención y estabilidad del suelo de la carpeta de rodamiento del camino.

En este Cuadro se puede observar que en el rango de 0.10-2.0 cm presentó un desplazamiento de suelo de  $4,976.85 m^3ha^{-1}$ , con una proporción de 0.45; mientras que en el rango de 8.0-10.0 cm se presentó un desplazamiento de

1105.97 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, el cual constituye una proporción de 0.10. También se visualiza que todas las proporciones del diámetro de los agregados se encuentran dentro de sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 8. Rangos del diámetro de los agregados, porcentaje de agregados en la carpeta de rodamiento, volumen total de suelo desplazado e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Rangos del diámetro de los agregados (cm)	Porcentaje de agregados en la carpeta de rodamiento del camino	Volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
0.1-2.0	45.0	4,976.85	0.45	0.34	0.56
2.0-4.0	20.0	2,211.93	0.20	0.11	0.29
4.0-6.0	15.0	1,658.95	0.15	0.07	0.23
6.0-8.0	10.0	1,105.97	0.10	0.03	0.17
8.0-10.0	10.0	1,105.97	0.10	0.03	0.17
	<b>100</b>	<b>11,059.66</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Weaver *et al.* (2014), menciona que la textura del suelo es un factor utilizado para determinar la erosividad o clasificación del peligro de erosión; la textura arcillosa presenta características particulares que la definen, tales como: alto contenido de humedad, impermeabilidad al agua y aire, y mantiene una consistencia plástica o adherible, lo que le permite una alta susceptibilidad al proceso de erosión hídrica por efecto de la escorrentía superficial que se presenta a lo largo de la plataforma del camino.

De acuerdo al párrafo anterior y en base al análisis físico del suelo realizado en laboratorio se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro 10, en donde se puede observar que la denominación textural predominante fue la arcillosa, un sobresaliente pH neutro (6.5-7.5), una densidad baja (oscilante entre el 1.00 al 1.22 gr/cm<sup>3</sup>), una porosidad de 53 a 63 %, y finalmente, un rango porcentual de sólidos de 37-46.5 %.

Cuadro 9. Proporción de los componentes, denominación textural, pH, densidad aparente ( $\text{gr/cm}^3$ ), % de sólidos y % de poros del camino motivo de estudio.

No.	No. de estación	Proporción de los componentes (% de agregados)			Denominación textural	pH	Densidad aparente ( $\text{gr/cm}^3$ )	% de sólidos	% de poros
		Arena	Arcilla	Limo					
1	3	16	66	18	Arcilloso	7.53	1.07	40.29	59.71
2	29	34	36	30	Franco-Arenoso-Arcilloso	7.53	1.11	41.85	58.15
3	39	24	58	18	Arcilloso	7.64	1.08	40.86	59.14
4	42	22	54	24	Arcilloso	7.43	1.05	39.56	60.44
5	62	22	66	12	Arcilloso	7.30	1.11	42.07	57.93
6	80	26	58	16	Arcilloso	7.09	1.07	40.21	59.79
7	96	38	48	14	Arcilloso	7.08	1.00	37.79	62.21
8	121	16	66	18	Arcilloso	7.15	1.02	38.43	61.57
9	115	18	64	18	Arcilloso	6.79	1.22	46.01	53.99

FAO (2016), indica que la erosión actúa de manera selectiva en los agregados, es decir, arrastra las partículas más finas y más reactivas (de fácil desprendimiento) del suelo como la arcilla, dejando las partículas más gruesas, pesadas y menos reactivas. De acuerdo con la información generada en el Cuadro 9 y 10, se puede indicar que el tamaño de agregados y la denominación textural “arcilloso” influyen directamente en las formas de erosión hídrica que se presentaron en el camino.

En la Figura 8 se puede observar el volumen total de suelo con desplazamiento negativo y las tres principales formas de erosión hídrica que se presentaron en la carpeta de rodamiento del camino. Esto se puede corroborar por medio de la información contenida en el Cuadro 11.

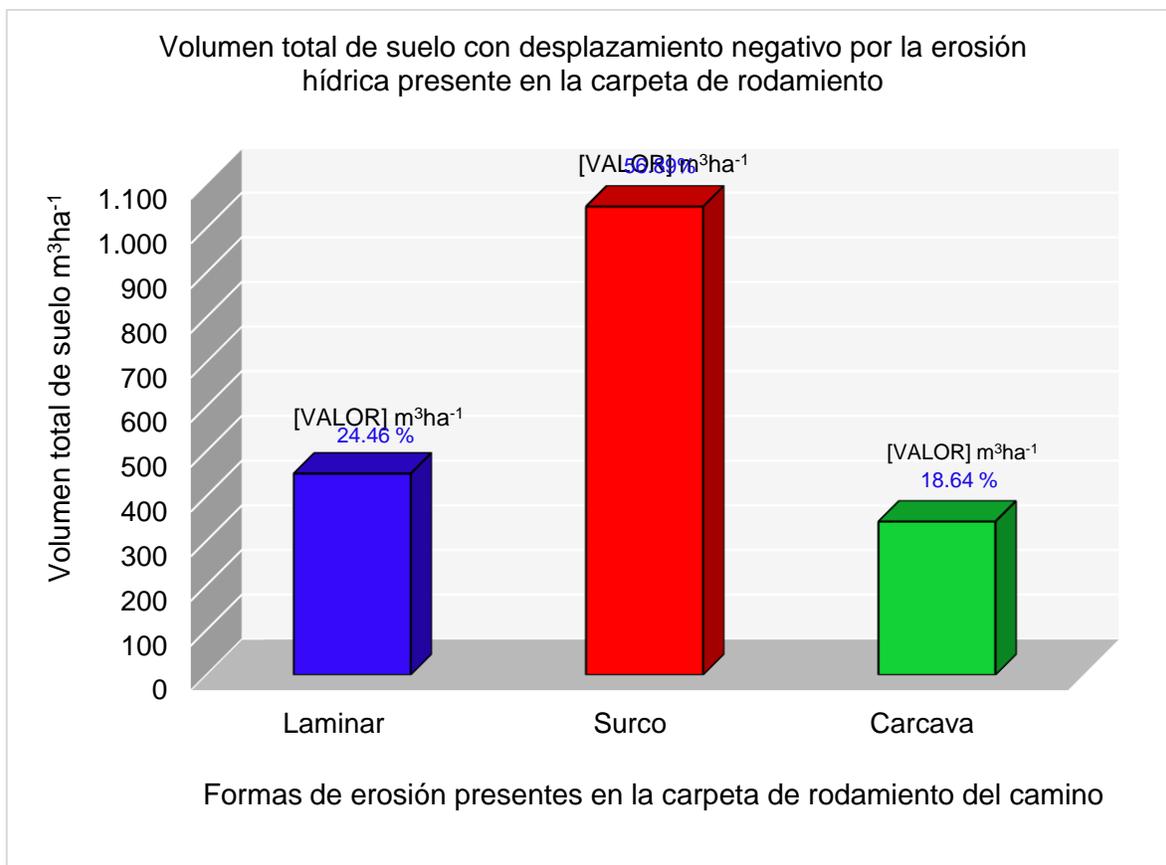


Figura 8. Volumen total de suelo con desplazamiento negativo por la erosión hídrica presente en la carpeta de rodamiento.

El Cuadro 11 pudiera sugerir que la carpeta rodamiento del camino se encuentra en malas condiciones, por efecto de los diferentes tipos de erosión hídrica. El cálculo de los diferentes volúmenes de desplazamiento negativo permitieron observar que la erosión en surcos fue la que más suelo desplazó con un volumen de  $1,048.13 m^3ha^{-1}$ , con una proporción del 0.52, mientras que, la erosión con menos presencia fue en cárcavas con un desplazamiento de suelo negativo de  $343.42 m^3ha^{-1}$ , que representa el 0.19. Sin embargo, ante la información contenida en el Cuadro 11, la erosión laminar se puede visualizar como la más impactante en la destrucción y reducción de la carpeta de rodamiento del camino que de acuerdo con la literatura, ésta, es el punto de partida para la evolución a otras formas de erosión y al desplazamiento en general del suelo, dicha erosión

presentó un volumen de  $450.69 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  con una proporción de 0.07 en tres estaciones. Esto indica que es menos notable la destrucción de la capa superficial no consolidada del suelo y que además es la forma de erosión que más fácil y rápidamente se puede restaurar, y en la que menos costos se incurrirían. En la columna 4 del Cuadro 11 se muestran las proporciones de las diferentes formas de erosión, las cuales se encuentra dentro de sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 11. Formas de erosión presentes en la carpeta de rodamiento del camino, volumen de suelo con desplazamiento negativo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Formas de erosión presentes en la carpeta de rodamiento	Frecuencia N (No. de estaciones)	Volumen $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$	Proporciones	Intervalo de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
Laminar	3	450.69	0.21	0.07	0.42
Surco	15	1,048.13	0.57	0.36	0.78
Cárcava	4	343.42	0.19	0.02	0.35
	<b>22</b>	<b>1,842.23</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Núñez (2001), menciona que las formas de erosión hídrica depende directamente de las variaciones de la textura, la estructura y el contenido de la materia orgánica, de la topografía y la condición climática, de esta última, la más importante es la intensidad de lluvia. De acuerdo a la textura predominante del suelo de la carpeta de rodamiento del camino, éste se llegó a saturar generándose una deformación y por ende un desplazamiento profundo debido a la fuerza motriz de los neumáticos, sugiriendo esto diferentes formas de erosión hídrica en la carpeta de rodamiento.

En la Figura 9, se puede observar las tres formas de erosión hídrica del suelo presentes en el camino motivo de estudio, así como, el volumen total de suelo con desplazamiento positivo hacia estas formas de erosión del camino.

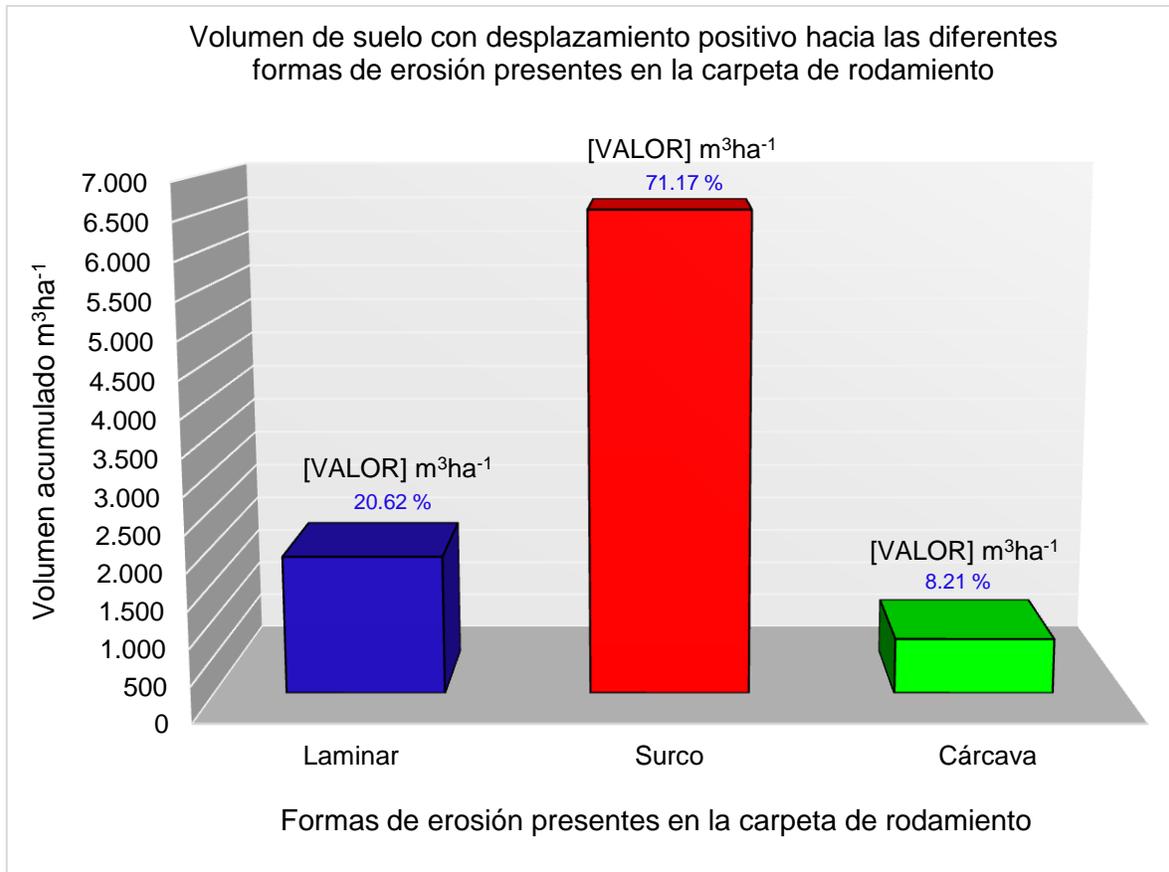


Figura 9. Volumen de suelo con desplazamiento positivo hacia las diferentes formas de erosión presentes en la carpeta de rodamiento.

En el Cuadro 12 se puede observar que la erosión en surcos presentó un acumulamiento (desplazamiento positivo de suelo) de  $6,559.82 m^3ha^{-1}$  en 56 estaciones, que representó una proporción de 0.71 y de la forma de erosión en cárcavas se obtuvo un desplazamiento positivo de  $746.85 m^3ha^{-1}$  en 10 estaciones.

Por lo anterior, se puede visualizar la forma de erosión en surcos, como aquella erosión que se vio favorecida por el acumulamiento de suelo a lo largo de 40 estaciones de la carpeta de rodamiento del camino. En la columna 4 se aprecian las proporciones de las formas de erosión presentes a lo largo del camino, las

cuales se encuentran dentro de los límites aceptables de sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 12. Formas de erosión presentes en la carpeta de rodamiento del camino, volumen de suelo con desplazamiento positivo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Formas de erosión presentes en la carpeta de rodamiento	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Proporciones	Intervalo de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
Laminar	10	1,900.76	0.21	0.10	0.31
Surco	40	6,559.82	0.71	0.59	0.83
Cárcava	6	756.85	0.08	0.01	0.15
	<b>56</b>	<b>9217.43</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

De acuerdo con el Instituto Geológico y Minero de España (1988) y GSWCC (2005), señalan que la vegetación juega un papel importante en el control de la erosión al interceptar las gotas de lluvia, reducir el desprendimiento de partículas del suelo, limpiar y reducir la velocidad de las escorrentías, aumenta la infiltración de agua al suelo, protege estructuras, ríos, corrientes y cuerpos de agua, y mejora el aspecto y la calidad ambiental del sitio.

De acuerdo a la revisión bibliográfica, es válido comentar que generalmente, en la parte central de los caminos de terracería es difícil conservar la cobertura vegetal, debido: en primer lugar, al roce de las plantas en la parte baja de los vehículos, que constantemente tienen una función “de poda”; en segundo lugar, el derrame de algunos productos químicos (lubricantes, combustible y otros líquidos) inherentes a los vehículos; y en tercer lugar, por la radiación que emite el calor del motor y del mofle hacia la escasa vegetación del “camellón” central del camino, así como, la emisión de chispas y hollín del mofle.

En la Figura 10 se puede observar las proporciones de la cobertura vegetal (cantidad de vegetación) en el centro del camino y el volumen total de suelo

desplazado (positivo y negativo) que se presentó por efecto de la escorrentía superficial.

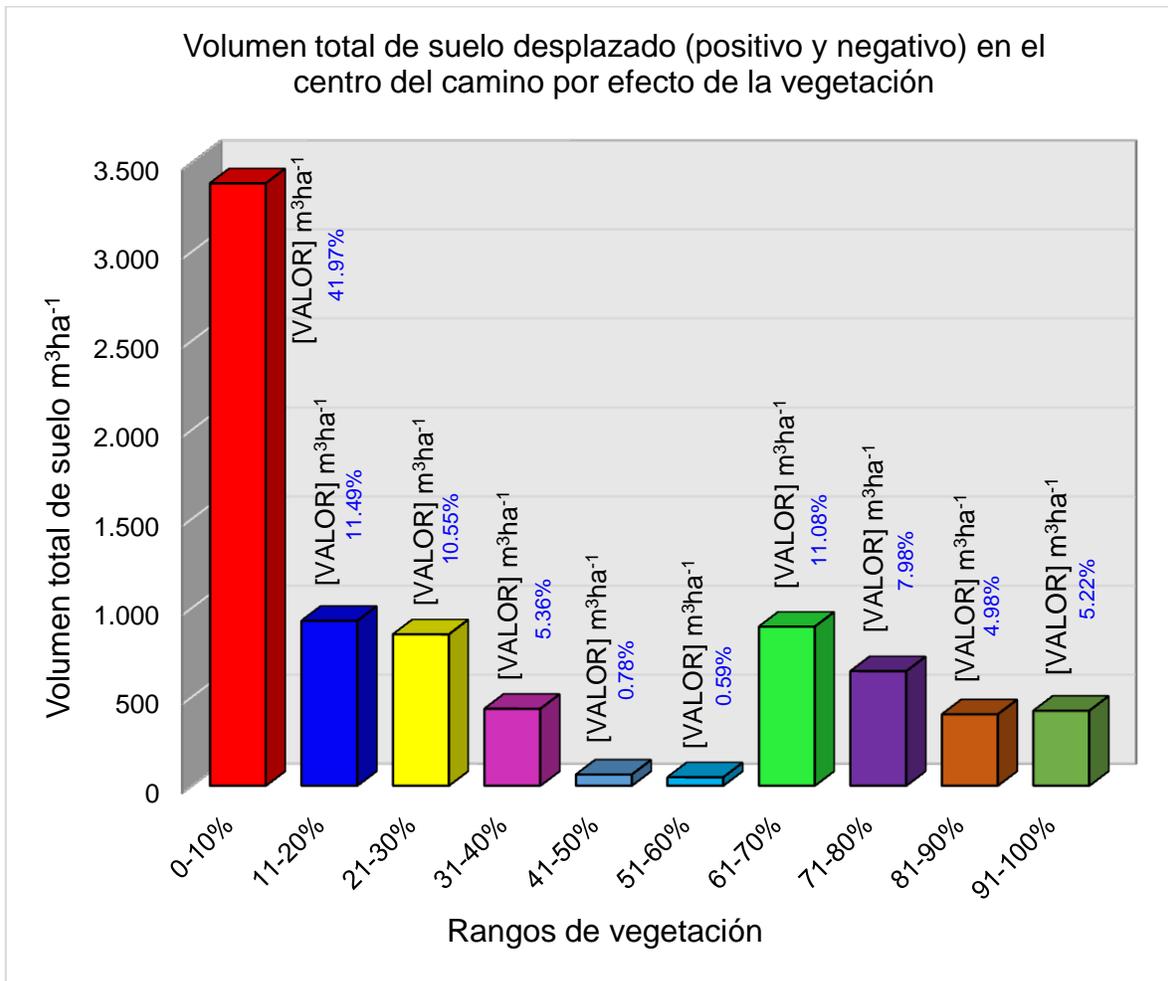


Figura 10. Volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) en el centro del camino por efecto de la vegetación.

En la parte central del perfil transversal a lo largo del camino, se presentaron bajas proporciones de vegetación herbácea, como se puede observar en la Figura 10 y en el Cuadro 13, el cual muestra que en el rango de 0-10 % de vegetación mostró un desplazamiento total de suelo de  $3,382.40 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ , siendo este rango el que mayor movimiento de partículas y agregados presentó, es decir, hubo un mayor volumen de suelo desplazado en una proporción del 0.42; mientras que en el

rango de 51-60 y el de 91-100 % se presentaron los menores movimientos de suelo, siendo para el primero un volumen de 47.65 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup> y para el segundo de 422.11 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>.

Así mismo, en el Cuadro 13 nos permite visualizar que del rango de 0-10 % hasta el 51-60 % pareciera que el volumen de suelo sería inverso a la densidad de vegetación herbácea en el centro del camino, es decir, la presencia de vegetación influye en la reducción del volumen total de suelo desplazado. Lo que se puede visualizar también, en menor manera en los rangos subsecuentes, pudiendo sugerir la misma consigna. En la columna 4, se muestran las proporciones de suelo desplazado y en la columna 5 se visualiza los intervalos de confianza para las proporciones y que éstas están dentro de sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 13. Rangos de porcentaje en el centro del camino, volumen de suelo desplazado e intervalo de confianza para las proporciones estimadas.

Rangos de vegetación en el centro del camino	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen total m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Proporciones	Intervalo de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
0-10 %	23	3,382.40	0.42	0.295	0.54
11-20 %	5	925.94	0.11	0.034	0.20
21-30 %	9	849.94	0.11	0.028	0.18
31-40 %	3	432.22	0.05	0.003	0.11
41-50 %	2	62.86	0.01	-0.014	0.03
51-60 %	1	47.65	0.01	-0.013	0.03
61-70 %	7	893.19	0.11	0.031	0.19
71-80 %	5	643.22	0.08	0.011	0.15
81-90 %	4	401.03	0.05	-0.05	0.10
91-100 %	1	421.11	0.05	0.004	0.11
	<b>60</b>	<b>8,059.58</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Por otro lado, es difícil encontrar vegetación herbácea en la carpeta de rodamiento del camino y específicamente en las “huellas” de las rodadas, éstas ocasionadas por la intensidad de tránsito de los vehículos pesados que provocan el

desprendimiento y desplazamiento del suelo por efecto de la fuerza de tracción. De acuerdo con la literatura, los caminos que presentan vegetación en su carpeta de rodamiento, es porque están en suspensión temporal o permanente, para que se instale nuevamente la vegetación natural en las diferentes estructuras del camino y propiciar se llegue a una condición aceptable de cubierta vegetal.

En el Cuadro 14, se puede observar que en la “huellas” de las rodadas a lo largo de la carpeta de rodamiento del camino, se presentó vegetación herbácea en más del 90 % de la longitud de éste; la altura de dicha vegetación estuvo entre 1 y 5 cm de altura, la cual se perdió por efecto del tránsito de los vehículos y la escorrentía superficial que se presentó durante la temporada de lluvias.

Cuadro 14. Presencia de vegetación de 1 a 5 cm de altura en las “huellas” de las rodadas del camino.

Vegetación de 1 a 5 cm de altura	Frecuencia (No. de estaciones)	Porcentaje (%)
Con vegetación	73	93.59
Sin vegetación	5	0.06
	<b>78</b>	<b>100</b>

Sherar y Keller (2008), consideran que en los caminos de terracería es indispensable establecer un ancho del camino entre los 3.5 y 4.5 m. La SEMARNAT (2006), indica que las principales características que distinguen a los caminos secundarios es: un ancho de faja despejada de 6 a 8 m, una calzada de 4 a 5 m y una corona de 3 a 4 m para facilitar la maniobrabilidad de los vehículos a lo largo del camino y así, reducir los impactos ambientales físicos de la carpeta de rodamiento del mismo.

Como se puede observar en la Figura 11, que a lo largo del camino se presentaron diferentes anchos del mismo, las cuales fueron de 2.8 a 5.2 m, así

como también a lo largo del camino se estimó que el volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) fue de 11,059.66 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>.

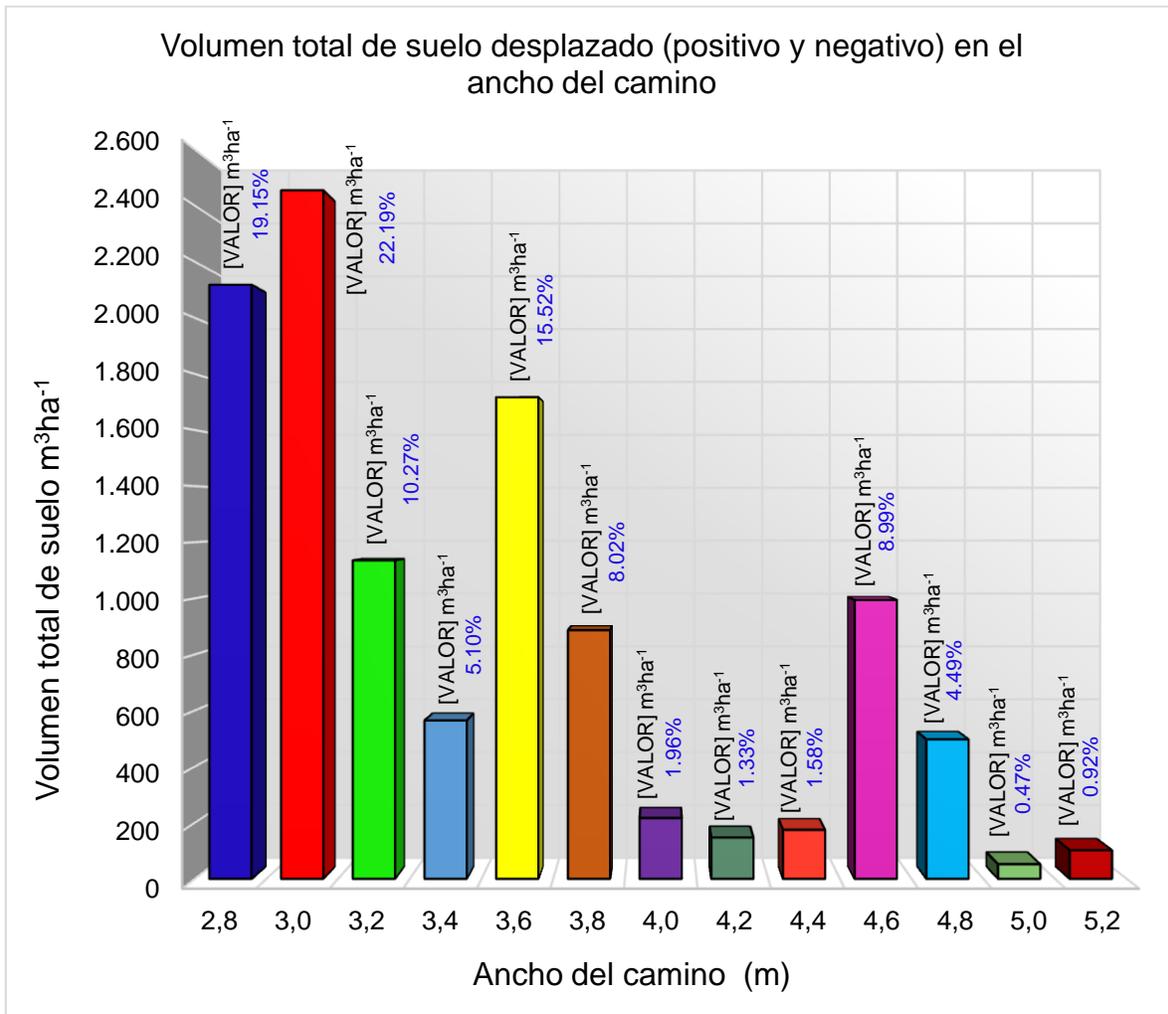


Figura 11. Volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) en el ancho del camino que están entre los 2.8 y 5.2 m.

De acuerdo a lo mencionado por Sherar y Keller (2008) y la SEMARNAT (2006) el ancho de camino motivo de este estudio se encontró fuera de los rangos establecidos por estos autores y la SEMARNAT. En el Cuadro 15 se puede observar que a lo largo del camino el ancho con mayor frecuencia (16) fue el de

3.0 m, con un volumen de suelo desplazado (positivo y negativo) de 2,454.67 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, que representa una proporción de 0.22, mientras que el ancho de 4.4 y de 5.0 m una solo se ubicaron en una estación y en donde el suelo desplazado fue de 175.0 y 52.00 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup> respectivamente, que representa una proporción de 0.02 para el primero y 0.005 para el segundo. También se pueden apreciar en la columna 4 las proporciones de los diferentes anchos a lo largo del camino, y en la columna 5 los intervalos de confianza para las proporciones, los cuales están dentro de sus respectivos intervalos.

Cuadro 15. Volumen de suelo desplazado (positivo y negativo) en los diferentes anchos del camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Ancho del camino (m)	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen desplazado m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
2.8	10	2,117.86	0.19	0.100	0.28
3.0	16	2,454.67	0.22	0.130	0.31
3.2	12	1,135.45	0.10	0.035	0.17
3.4	10	564.29	0.05	0.002	0.10
3.6	9	1,716.90	0.16	0.075	0.24
3.8	6	886.84	0.08	0.020	0.14
4.0	3	216.50	0.02	-0.011	0.05
4.2	2	147.14	0.01	-0.012	0.04
4.4	1	175.00	0.02	-0.012	0.04
4.6	4	994.00	0.09	0.026	0.15
4.8	2	497.08	0.04	0.001	0.09
5.0	1	52.00	0.005	-0.010	0.02
5.2	2	101.92	0.01	-0.012	0.03
	<b>78</b>	<b>11,059.66</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Crespo (1996), menciona que la función del bombeo es para desalojar el agua que se presenta en la calzada del camino y debe proyectarse de acuerdo al tipo de superficie, la facilidad para el tránsito de los vehículos y el aspecto del camino; él cual, influirá directamente en la reducción del proceso de erosión por efecto de la

escorrentía superficial, garantizando la seguridad del tránsito de los vehículos y la estabilidad del camino.

Sherar y Keller (2008), mencionan que los caminos que presenten una dirección de bombeo hacia “afuera” y además contengan materiales pétreos con abundante arcilla, son resbaladizos con frecuencia, por lo que se requiere que la superficie del camino se estabilice con rocas o que se limite su uso durante la temporada de lluvias, para garantizar la condiciones de la calzada y la seguridad del tránsito.

De acuerdo a las características técnicas del camino motivo de estudio, éste es considerado como secundario, ya que carece de estructuras de drenaje que faciliten desalojar el volumen de agua fuera de las estructuras del camino. Ante esta carencia de estructuras en los caminos secundarios es necesario que la calzada desplace el agua a un extremo del camino, para evitar el estancamiento de agua, el reblandecimiento del camino y la destrucción de la carpeta de rodamiento por efecto de la intensidad de tránsito.

En el Cuadro 16 y en el Cuadro 17 se observan las cuatro direcciones de bombeo y el volumen de suelo con desplazamiento negativo y positivo respectivamente. También se puede constatar en estos cuadros y en la Figura 12 que la dirección de bombeo norte (N) y este (E) sobresalen los desplazamientos negativos y positivos de suelo. Además en estos cuadros se pueden observar las proporciones de las diferentes direcciones de bombeo, las cuales se encuentran dentro de sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 16. Dirección de bombeo de la calzada del camino, volumen total de suelo con desplazamiento negativo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Dirección de bombeo del camino	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen $m^3 ha^{-1}$	Proporciones	Intervalo de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior

Norte	9	726.91	0.39	0.19	0.60
Sur	2	158.98	0.09	-0.03	0.20
Este	8	661.44	0.36	0.16	0.56
Oeste	3	294.92	0.16	0.01	0.31
	<b>22</b>	<b>1,842.23</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Cuadro 17. Dirección de bombeo de la calzada del camino, volumen total de suelo desplazado con desplazamiento positivo e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Dirección de bombeo del camino	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen $m^3ha^{-1}$	Proporciones	intervalo de confianza para las proporciones	
				límite inferior	límite superior
Norte	27	5,622.15	0.61	0.48	0.74
Sur	0	0	0	0	0
Este	24	3,184.06	0.35	0.22	0.47
Oeste	5	411.22	0.04	-0.01	0.10
	<b>56</b>	<b>9,217.43</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

El 60.99 % del desplazamiento positivo de suelo se presentó en la dirección de bombeo norte (N), cuyo volumen de suelo fue de  $5,622.15 m^3ha^{-1}$ ; y en esta misma dirección de bombeo el 39.46 % del desplazamiento negativo de suelo tuvo un volumen de suelo desplazado de  $726.91 m^3ha^{-1}$ . Por otro lado, en la dirección de bombeo este (E) se observa que el 34.54 % está constituido por un desplazamiento positivo de suelo de  $3,184.06 m^3ha^{-1}$ , y el 35.90 % representa un volumen de suelo perdido de  $661.44 m^3ha^{-1}$ . La exposición sur (S) es la que menos movimiento de suelo presentó, en el desplazamiento positivo de suelo el valor fue de cero, mientras que el volumen de suelo con desplazamiento negativo fue de  $158.98 m^3ha^{-1}$ , que representó el 8.63 %.

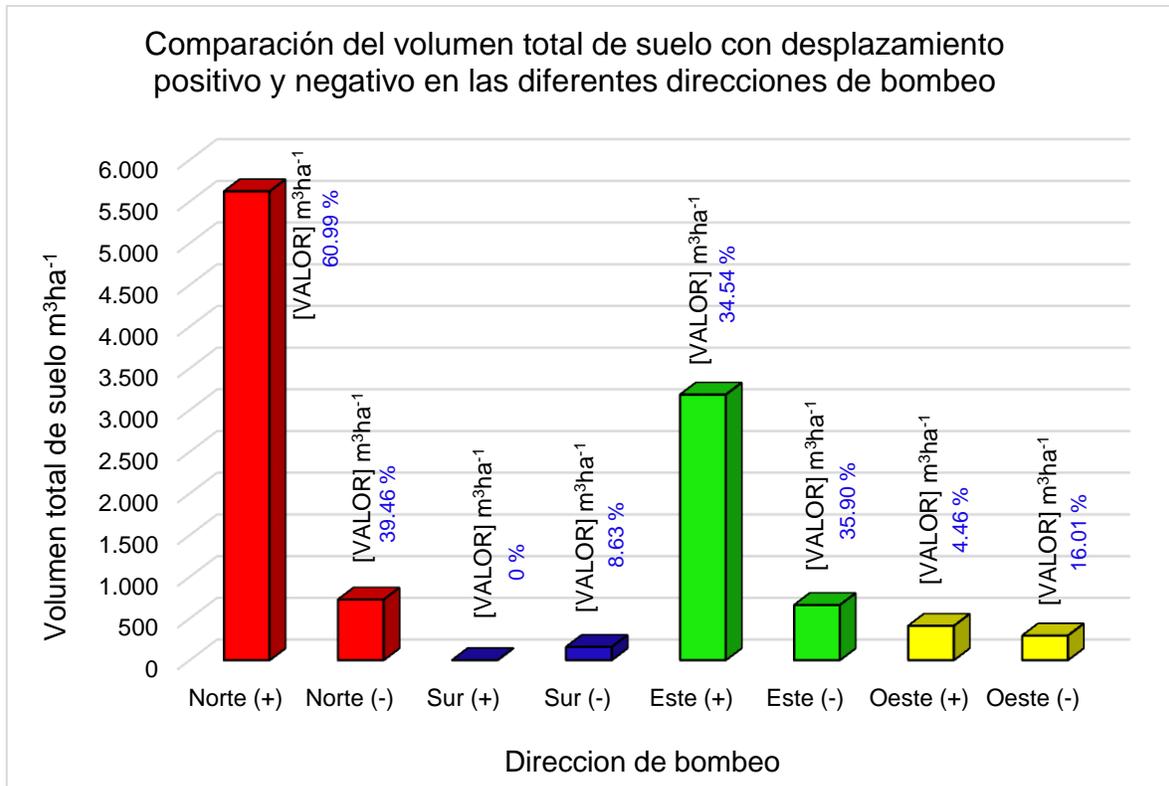


Figura 12. Volumen total de suelo con desplazamiento positivo y negativo en las diferentes direcciones de bombeo del camino.

Alcántara (2004), menciona que es importante el tipo de recubrimiento que se le dé a un camino, el cual influirá en el tránsito de los vehículos, dicho recubrimiento, deberá soportar el peso de los vehículos y resistir la intensidad de tránsito. Por lo anterior, es necesario que la superficie de la carpeta de rodamiento este cubierta con agregados pétreos para reducir el proceso físico de la erosión hídrica.

La literatura indica que en un camino de terracería el grosor de la capa de recubrimiento oscila entre los 10 a 20 cm y que en muy raras ocasiones puede llegar a los 30 cm; esto depende de las características físicas del suelo y estructurales de la subrasante. Como ya se indicó el camino motivo de estudio es de segundo orden, por lo que carece estrictamente de una capa de recubrimiento que lo proteja del desgaste provocado por el tránsito de los vehículos y de la acción directa del impacto de la lluvia. Como ya se indicó ante la premura de la

construcción, el diseño y trazo fueron deficientes, lo cual ha venido repercutiendo a lo largo de los años, porque no se realizó una adecuada proyección del mismo, y en cuanto a su temporalidad no se deshabilitó en su oportunidad, dándole hasta la fecha uso durante la época de secas. La carpeta de rodamiento está prácticamente carente de una cubierta protectora de material pétreo y esto se puede ver en la Figura 13, que muestra el 85.77 % del área del camino está prácticamente desprovista de recubrimiento.

El camino en cuestión tiene un área promedio total de 14,880 m<sup>2</sup>, de cuya superficie se muestreó el 93.7 % (13,942.56 m<sup>2</sup>); de este último espacio se determinó que el 85.77 % (11,958.53 m<sup>2</sup>) del camino mostró una escasa capa de recubrimiento, la cual estuvo entre 0 y 10 % de la superficie del camino y cuyo volumen de suelo desplazado fue de 9,485.43 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>. Mientras que el rango de recubrimiento siguiente mostró un volumen de suelo desplazado de 1,574.24 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, en una superficie de 1,984.03 m<sup>2</sup>; en éste último rango de recubrimiento se encontraron las áreas de curva del camino.

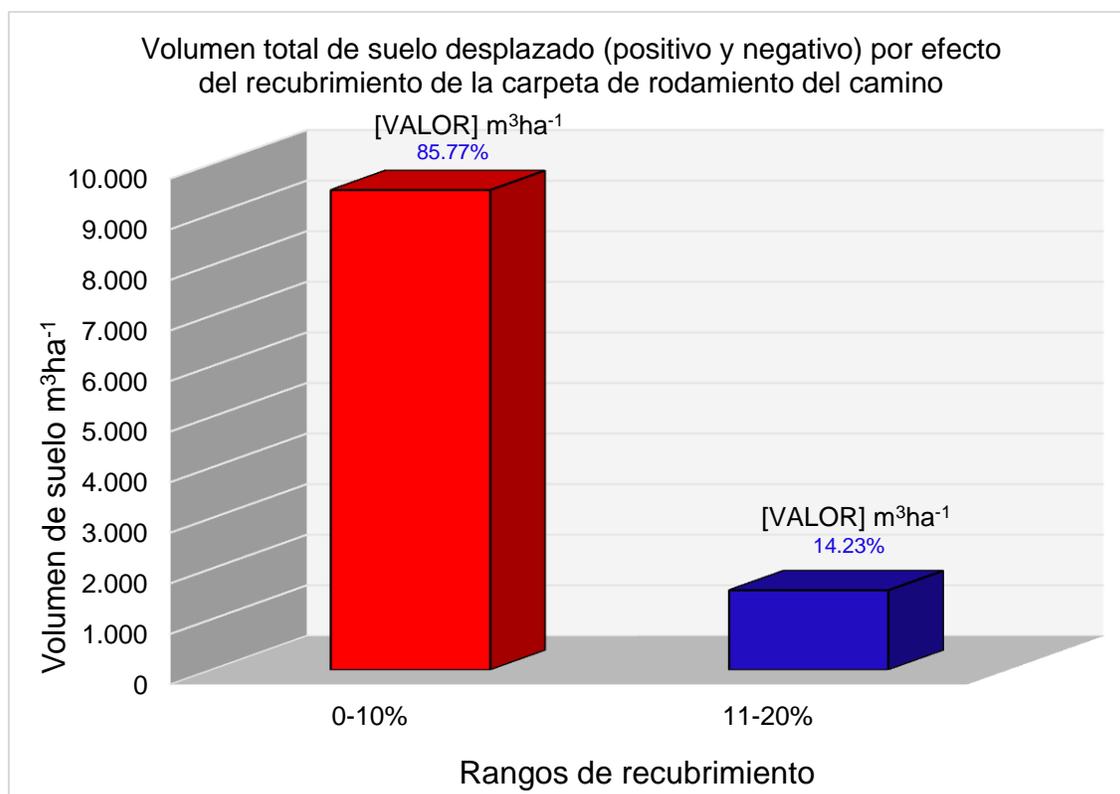


Figura 13. Volumen total de suelo desplazado (positivo y negativo) por efecto del recubrimiento de la carpeta de rodamiento del camino.

En el Cuadro 18 se puede corroborar lo antes expuesto y lo que se visualiza en la Figura 13. Además, en la columna 4 se muestran las diferentes proporciones y sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 18. Porcentaje de recubrimiento en la calzada del camino, volumen total de suelo desplazado e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Recubrimiento del camino	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen $m^3ha^{-1}$	Proporciones	Intervalo de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
0-10%	63	9,485.43	0.86	0.71	1.00
11-20%	15	1,574.24	0.14	0.00	0.29
	<b>78</b>	<b>11,059.66</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Rivera *et al.* (2009), indican que a lo largo de un camino de terracería es necesario establecer una pendiente longitudinal entre 8 y 12 %; pero Sherar y Keller (2008), indican que las pendientes entre 12 y 15 %, ya consideradas como pronunciadas, aumentan los costos de mantenimiento a largo plazo, por lo que proponen pendientes máximas del 12 % y preferentemente menores, usando tramos cortos (300 m) con 15 % de inclinación donde sea estrictamente necesario.

En la Figura 14 se pueden observar las pendientes longitudinales que se presentaron en el camino, las cuales oscilaron entre 0 y 25 % y en él que las pendientes longitudinales que predominaron estuvieron entre 16 y 20. Con esto se puede observar que prácticamente en 65 % del camino se encontraba fuera de los rangos establecidos en la literatura citada, lo cual generó un volumen total de suelo con desplazamiento negativo de 1,842.23 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>.

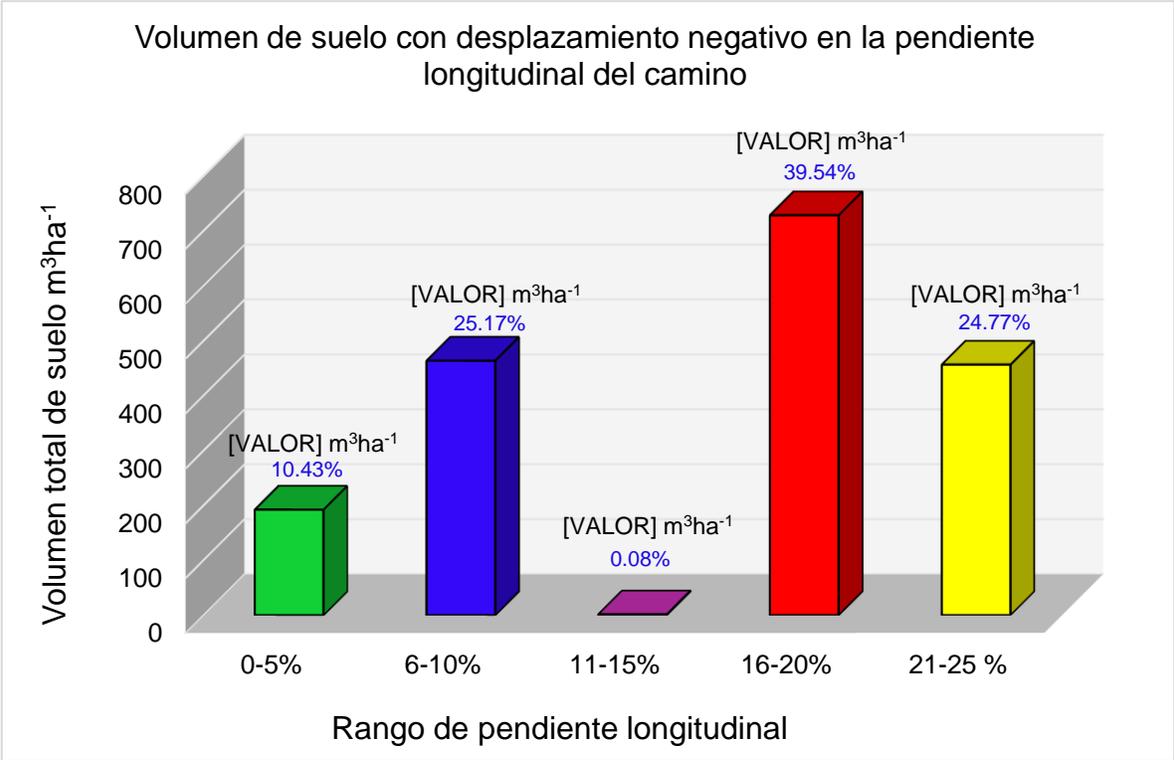


Figura 14. Volumen de suelo con desplazamiento negativo a lo largo de la pendiente longitudinal del camino.

Reafirmando lo anterior el Cuadro 19 muestra los rangos de las diferentes pendientes longitudinales medidas a lo largo del camino, observando que en el rango de 16-20 % se mostró una pérdida de suelo de 728.49 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, que representa una proporción de 0.40, en contra posición del rango de 0-5 % que presentó un desplazamiento negativo de suelo de 192.23 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>, que equivale a una proporción del 0.10. Por lo anterior, se puede sugerir que la pendiente longitudinal del camino al sobrepasar las pendientes máximas permisibles propicia que el volumen total de suelo con desplazamiento negativo se incremente sobre todo cuando el suelo se encuentra sin recubrimiento pétreo que lo proteja, como es el caso del camino de estudio. La columna 4 muestra las proporciones de los rangos de pendiente los cuales están dentro de sus intervalos de confianza, a excepción del rango de 11-15 %.

Cuadro 19. Volumen de suelo con desplazamiento negativo de los rangos de la pendiente longitudinal (%) del camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Rangos de pendiente longitudinal del camino	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
0-5 %	8	192.23	0.10	-0.02	0.23
6-10 %	3	463.70	0.25	0.07	0.43
11-15 %	1	1.43	0.001	-0.01	0.01
16-20 %	7	728.49	0.40	0.19	0.60
21-25 %	3	456.39	0.25	0.07	0.43
	<b>22</b>	<b>1,842.23</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Weave *et al.* (2014), mencionan que a lo largo de un camino, se puede presentar una variación de las pendientes longitudinales; principalmente para desalojar el agua que se encuentre en las estructuras de la calzada. En la Figura 15 se pueden visualizar las pendientes longitudinales que se presentaron a lo largo del camino y el volumen total de suelo con desplazamiento positivo fue de 9,217.43 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>.

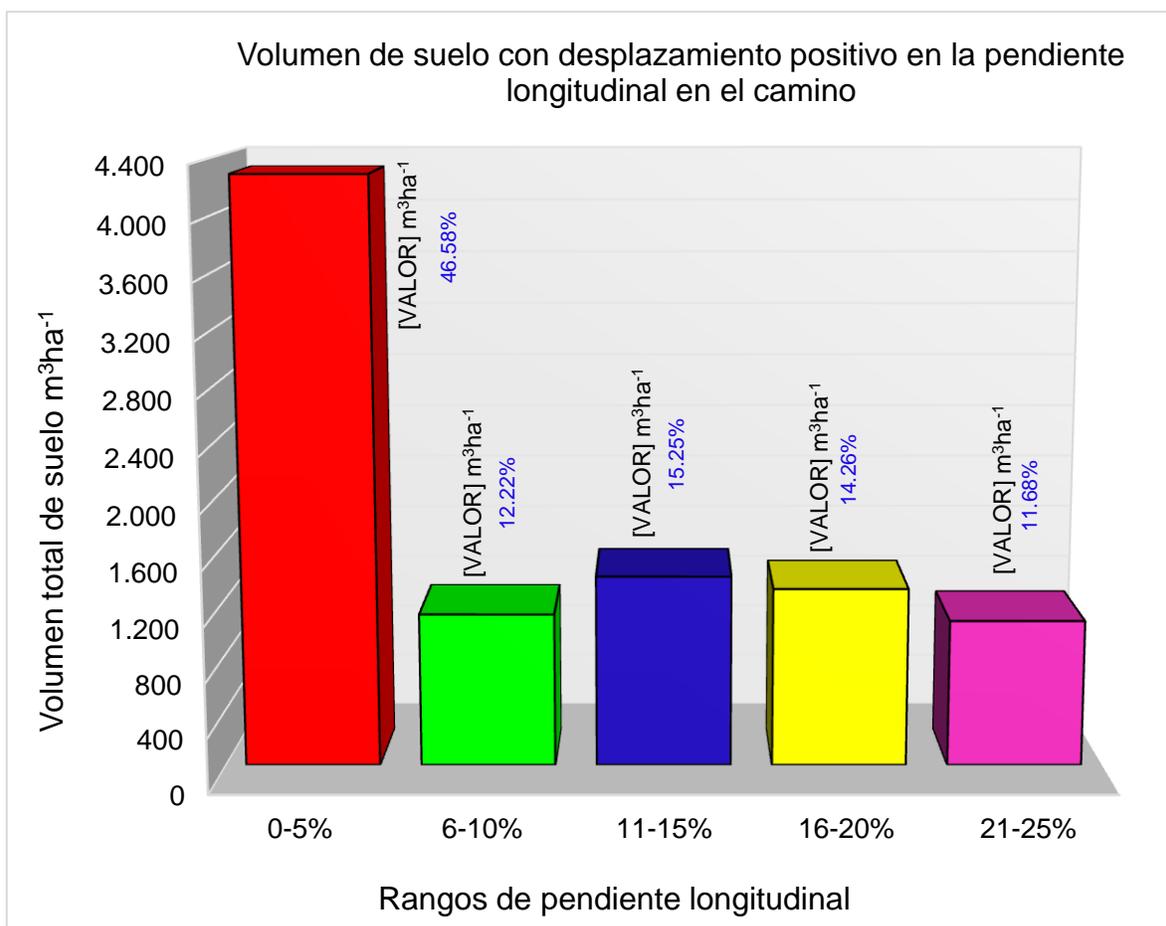


Figura 15. Volumen de suelo con desplazamiento positivo a lo largo de la pendiente longitudinal del camino.

En el Cuadro 20, se puede apreciar que la pendiente longitudinal del rango de 0-5 % se presentó en 17 de las estaciones muestreadas, con un desplazamiento de suelo positivo de  $4,293.90 m^3ha^{-1}$ , que corresponde a una proporción de 0.47; mientras que las pendientes longitudinales de 21-25 % se presentaron seis estaciones, presentando un desplazamiento positivo de suelo de  $1,076.85 m^3ha^{-1}$ , en una proporción de 0.12. Lo anterior permite sugerir que en el rango de 0-5 % se presentó un mayor acumulamiento de suelo, debido a que gran parte del camino presentó bajas pendientes longitudinales que permitieron que suelo y agua se estancaran en la calzada del camino; pudiendo generarse deformaciones por los

contenidos de humedad del suelo, la intensidad del tránsito de los vehículos y la clase textural del mismo. También se pueden apreciar que las diferentes proporciones de las pendientes longitudinales, las cuales se encuentran dentro de sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 20. Volumen de suelo con desplazamiento positivo a lo largo de la pendiente longitudinal del camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Rangos de pendiente longitudinal del camino	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen $m^3ha^{-1}$	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
0-5 %	17	4,293.90	0.47	0.34	0.60
6-10 %	9	1,126.31	0.12	0.04	0.21
11-15 %	15	1,405.57	0.15	0.06	0.25
16-20 %	9	1,314.79	0.14	0.05	0.23
21-25 %	6	1,076.85	0.12	0.03	0.20
	<b>56</b>	<b>9,217.43</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Acuña y Gayoso (1999), Sherar y Keller (2008) y Weaver *et al.* (2014), mencionan que la pendiente transversal óptima de un camino debe estar entre 3 y 5 %, para canalizar y conducir el agua de la calzada con una dirección de bombeo hacia la parte externa, hacia la ladera o hacia ambos lados, con el fin de evitar la saturación de agua, la destrucción y el desplazamiento de suelo del camino.

El Cuadro 21 muestra que el rango de 0-5 % se presentaron 13 estaciones muestreadas, siendo este rango el de mayor pérdida de suelo, cuyo volumen de suelo con desplazamiento negativo fue de 1,196.81  $m^3ha^{-1}$ , representado por una proporción del 0.65; el rango de 11-15 % se presentó solo en tres estaciones, siendo el de menor pérdida de suelo, cuyo desplazamiento negativo de suelo fue de 21.81  $m^3ha^{-1}$ , que equivale a una proporción del 0.01 y que en el rango de 16-20 % no hubo ninguna estación muestreada. Lo anterior indica que el desplazamiento negativo de suelo y la pendiente transversal del camino son

directamente proporcionales. En la columna 5 se puede observar que todos los rangos quedaron dentro de sus respectivos intervalos de confianza.

Cuadro 21. Rangos de pendiente transversal, volumen de suelo con desplazamiento negativo en el camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Rangos de pendiente transversal	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen $m^3ha^{-1}$	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
0-5 %	13	1,196.81	0.65	0.45	0.85
6-10 %	6	623.61	0.34	0.14	0.54
11-15 %	3	21.81	0.01	-0.03	0.06
16-20%	0	0	0	0	0
	<b>22</b>	<b>1,842.23</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

El Cuadro 22, se aprecia que el desplazamiento positivo en las pendientes transversales de los rangos 6-10 % y de 0-5 % presentaron el mismo número de estaciones muestreadas (25): el primero mostró una proporción del 0.57 que cuyo volumen de suelo con desplazamiento positivo es de  $4,997.92 m^3ha^{-1}$ ; y en el segundo, con una proporción del 0.37 que corresponde a un volumen de suelo acumulado de  $3,453.51 m^3ha^{-1}$ . Mientras que en el rango de 16-2 % solo hubo una estación muestreada y se presentó el menor volumen desplazado. Como ya se indicó una pendiente transversal fuera de los rangos establecidos por la literatura, sugiere que se contribuye notablemente en el incremento del desplazamiento de suelo por efecto de las lluvias. En la columna 4 se indican las proporciones de los rangos de las pendientes transversales, las cuales se encuentran dentro de sus respectivos límites establecidos por los intervalos de confianza.

Cuadro 22. Rangos de pendiente transversal, volumen de suelo con desplazamiento positivo en el camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Rangos de pendiente transversal del camino	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen $m^3ha^{-1}$	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
0-5 %	25	3,453.51	0.37	0.248	0.50
6-10 %	25	4,997.92	0.54	0.412	0.67
11-15 %	5	625.44	0.07	0.002	0.13
16-20 %	1	140.56	0.02	-0.017	0.05
	<b>56</b>	<b>9,217.43</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

La Figura 16 nos permite corroborar de manera visual lo expuesto en el Cuadro 20 y en el Cuadro 21.

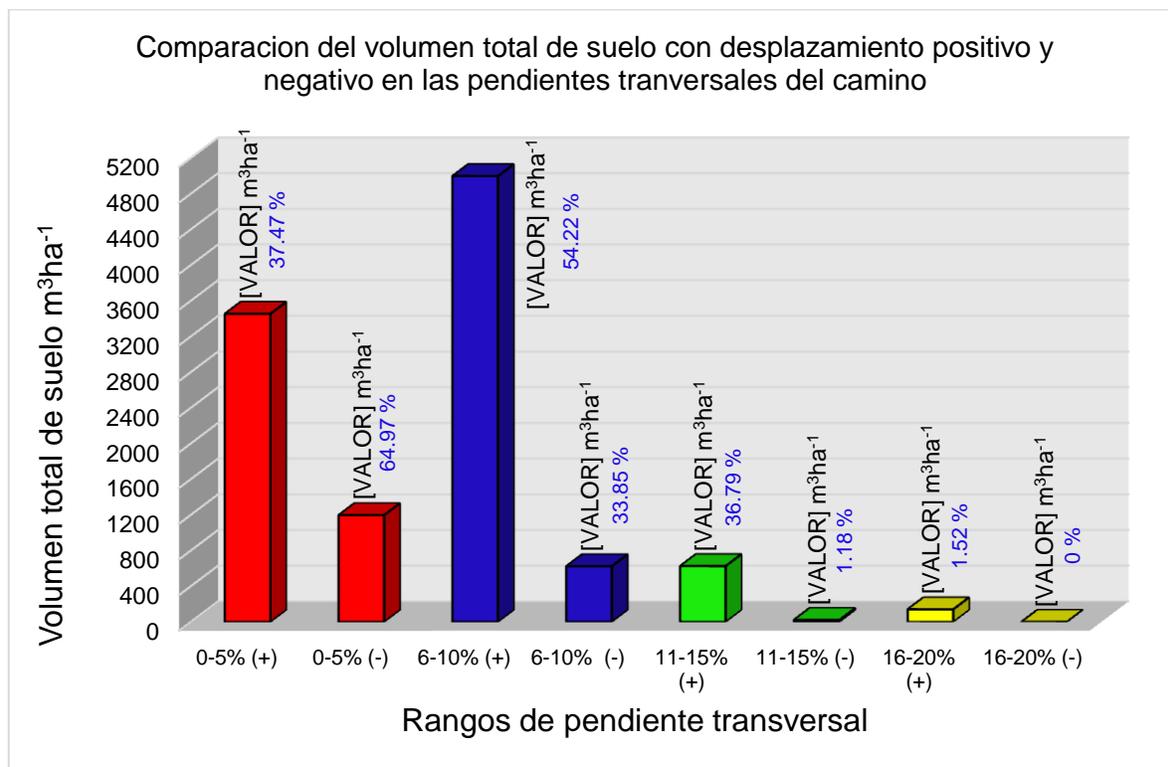


Figura 16. Volumen de suelo con desplazamiento positivo y negativo en los rangos predominantes de la pendiente transversal del camino.

De acuerdo a la información obtenida de la primera y segunda registro de datos en campo a las estaciones muestreadas, se pudieron elaborar las figuras correspondientes a los perfiles transversales, en los que se relacionó el ancho del camino con la profundidad a diferentes puntos de éste, con el fin de poder visualizar el desplazamiento de suelo en el perfil transversal del camino. En el Anexo 3 se pueden observar las figuras 23, 33, 44, 45 y 48 los diferentes perfiles transversales que presentaron un desplazamiento negativo de suelo, mientras que en el Anexo 4 se muestran las figuras 24, 43, 47, 101 y 105 los diferentes perfiles transversales presentaron un desplazamiento positivo de suelo. Las estaciones antes mencionadas en ambos anexos nos ocupan por haber presentado un perfil atípico, desde el punto de vista de las lecturas tomadas en la primera visita a campo con respecto a la segunda visita. En estas se pudo visualizar que el desplazamiento de suelo fue en donde hubo pérdida después se dió un acumulamiento del mismo, esto debido muy probablemente a la denominación textural arcillosa, las especificaciones técnicas del camino, el tránsito de los vehículos pesados, y finalmente a la escorrentía superficial.

De acuerdo a lo mencionado en la metodología respecto a las estaciones muestreadas, a la información obtenida en campo y al análisis de ésta en gabinete, se puede decir a nivel general, que los volúmenes totales desplazados (negativo y positivo) por efecto de la escorrentía superficial, se pueden visualizar en la Figura 17 y en el Cuadro 23 se muestran los valores para dichos volúmenes. El volumen total de suelo desplazado fue de  $11,059.66 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ; de éste el 28.20 % corresponde al volumen de suelo con desplazamiento negativo ( $1,842.23 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ) en 22 estaciones muestreadas, y el 71.80 % correspondió a un volumen de suelo con desplazamiento positivo ( $9,217.43 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ ) con 56 estaciones muestreadas. Además se puede apreciar que las proporciones del desplazamiento de suelo se encuentran dentro de sus respectivos intervalos de confianza.



Figura 17. Volumen total de suelo desplazado (negativo y positivo) en el camino por efecto de la escorrentía superficial.

Cuadro 23. Volumen total de suelo con desplazamiento positivo y negativo en el camino e intervalos de confianza para las proporciones estimadas.

Desplazamiento de suelo	Frecuencia (No. de estaciones)	Volumen m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Proporciones	Intervalos de confianza para las proporciones	
				Límite inferior	Límite superior
Negativo (pérdida de suelo)	22	1,842.23	0.17	0.16	0.17
Positivo (acumulamiento de suelo)	56	9,217.43	0.83	0.83	0.84
	<b>78</b>	<b>11,059.66</b>	<b>1.00</b>	<b>0.99</b>	<b>1.01</b>

El mayor desplazamiento negativo de suelo se presentó en la estación 44 con volumen de  $530.87 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  en una pendiente longitudinal del 16 %, mientras que en la estación 72 se presentó el mayor desplazamiento positivo de suelo con un volumen de  $444.00 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  en una pendiente longitudinal de 0 %. Lo anterior permite sugerir que hay una relación directa entre la pendiente longitudinal, la denominación textural y el desplazamiento negativo o positivo del suelo. Además, para el caso del desplazamiento positivo del suelo y a la denominación textural, se puede aludir que mucho de ese suelo se queda en la carpeta de rodamiento por la deformación que sufre ésta por el efecto del tránsito de los vehículos.

Para determinar el nivel de significancia, y la relación del desplazamiento negativo y positivo de suelo se realizaron correlaciones para la pendiente longitudinal y transversal, de las cuales se pudo observar que los valores promedio de erosión no mostraron significancia para poder establecer una correlación, debido a la dispersión de los datos. También se realizó un análisis de regresión lineal simple (parámetros a y b), en la que se pudo observar, una dispersión de los valores del desplazamiento positivo y negativo de suelo, en donde dichos valores quedaron fuera del rango de ajuste de la recta. Tanto en el método por correlación como en el del análisis de regresión lineal simple no se pudieron predecir los valores de erosión hídrica por efecto de la escorrentía superficial.

## V. CONCLUSIONES

El camino motivo de estudio presenta alta vulnerabilidad en el desplazamiento positivo y negativo de suelo por presentar especificaciones técnicas deficientes, tales como: una pendiente transversal mayor del 6 % y una pendiente longitudinal superior del 15 %; un porcentaje de agregados de diámetro menor a 4.0 cm, un recubrimiento casi inexistente de la carpeta de rodamiento. Algunas de las consideraciones físicas del entorno que influyeron directamente en las condiciones del camino fueron: una topografía abrupta y disectada, una exposición predominantemente norte y una denominación textural arcillosa, siendo ésta última como un factor determinante para conocer el grado de deformación del camino y la erosionabilidad que se presenta en la carpeta de rodamiento.

El desplazamiento negativo de suelo (pérdida) que se presentó a lo largo del camino se identifica como tal solo en 22 estaciones, mientras que el desplazamiento positivo de suelo (acumulamiento) se presentó en 56 estaciones. Luego entonces, se puede deducir que la pérdida de suelo fue crítica, desde el punto de vista que ésta corresponde a 22 estaciones muestreadas, y este suelo desplazado se sedimentó a lo largo de las 56 estaciones restantes que presentaron un acumulamiento de suelo.

Después de haber concluido el periodo de lluvias 2015 (atípico por la intensidad de lluvia registrada hace 40 años), y en base a las escasas especificaciones técnicas del camino, al insipiente mantenimiento y a un uso prolongado de éste se presentó que el camino se fue ampliando por efecto del tránsito de los vehículos que comenzaron circular sobre los bordes de éste tratando de libra los amplios ahuellamientos que se presentaron a lo largo del camino.

De acuerdo a lo que se visualizó a lo largo de esta investigaciones, se puede aducir que un camino de segundo orden con una alta temporalidad de uso,

debieran realizarse actividades de mantenimiento preventivo más intensas para reducir el desplazamiento positivo y negativo de suelo a lo largo del camino.

En la carpeta de rodamiento se destacó la forma de erosión hídrica en surcos, la cual está evolucionando a la forma de cárcavas, por lo que es necesario emplear medidas de prevención para evitar principalmente el desplazamiento negativo de suelo.

## VI. RECOMENDACIONES

Cuantificar la pérdida de suelo en algún estudio subsecuente, considerando varios periodos de lluvia para determinar el desplazamiento de suelo.

Con el método de varillas modificado se sugiere que la distancia entre transectos (distancia entre estaciones) sea de 20 m, con el fin de obtener mayor información de la carpeta de rodamiento.

Para otros estudios se recomienda contar con información de la intensidad de tránsito de los vehículos con el fin de valorar en base a la denominación textural, las deformaciones que pudieran presentarse en la carpeta de rodamiento del camino durante la época de lluvias.

Aumentar el número de muestras de suelo, preferentemente una por estación de muestreo, con el fin de poder visualizar si toda la carpeta de rodamiento tendría el mismo comportamiento por la intensidad de tránsito.

Se recomienda mejorar el diseño de muestreo en donde se puedan generar análisis más complejos en cuanto a la forma de relacionar las variables y la toma de datos.

Realizar un análisis que relacione la pendiente longitudinal del camino con la distribución de los agregados de la carpeta de rodamiento.



## VII. LITERATURA CITADA

- Acuña, M.** y J. Gayoso 1999. Guía de campo: "Mejores prácticas de manejo forestal". Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 31 p.
- Alcántara G., D. A.** 2003. Caminos forestales: planificación; planeación; proyecto; construcción; mantenimiento; explotación racional; protección y lucha contra incendios forestales; y protección del medio ambiente. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, México. 348 p.
- Aguilar A., B.** 2014. El suelo de cultivos y las condiciones climáticas AGAC0108. ed. Innovación y Cualificación, S. L. Antequera, Málaga, España. 240 p.
- Almorox A., J.,** López B., F. y S. Raffaelli. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación Universidad de Murcia. España. 384 p.
- Alvarado C., M.,** Colmenero R., J.A. y M. de la L. Valderrábano A. 2007. La erosión hídrica del suelo; en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. Ciencia Ergo Sum en Toluca México. 14 (3): 317- 326.
- Andersson, C-A.,** Beusch, A. y D. Miles. 2003. Revestimiento y mantenimiento de caminos con uso intensivo de mano de obra (ROMAR). Organización internacional del trabajo. Lima, Peru.278 p.
- Ávila V., C. M.** 2013. Pérdida de la fertilidad del suelo por erosión hídrica en la cuenca propia del lago de Chapala, Michoacán. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias en producción agrícola sustentable. Instituto Politécnico Nacional-centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional CIIDIR IPN, Unidad Michoacán. Jiquilpan, Michoacán.76 p.
- Becerra M., A.** 2005. Escorrentía, erosión y conservación de suelos. 1<sup>ra</sup> Ed. UACH. Edo. de México, Texcoco. México. 375 p.
- Boix A., E.** 2012. Operaciones básicas en viveros y centros de jardinería. Ed. Paraninfo, S.A. España. 218 p.

- Camp, W.** y T. Daugherty. 1999. Manejo de nuestros recursos naturales. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 416 p.
- Casanova O., E. F.** 2005. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Central de Venezuela (UCV) y Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas, Venezuela. 487 p.
- Casanoves, F.,** Di rienzo, J.A., Gonzales, L.A., Tablada, E. M., Díaz, M del P., Roblero, C. W. y M. G. Balzarini. 2008. Estadísticas para las Ciencias Agropecuarias/ Statistics for Agricultural Ciencs. Ed. Brujas 7ª edición. Córdoba, Argentina. 358 p.
- Cayssials, R.** 1984. Perspectivas de investigación sobre cuencas de Uruguay. Primer Taller Nacional de Investigación Sobre Cuencas Experimentales. Ministerio de Agricultura y Pesca, Instituto Nacional de Colonización Colorado State University y instituto interamericano de Cooperación para la Agricultura. Montevideo, Uruguay. 7-26 p.
- Cepeda D., J. M.** 1991. Química de suelos. Ed. trillas. D.F., México. 167 p.
- Crespo V., C.** 1996. Vías de comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos. Ed. Limusa. México. 717 p.
- Crespo V., C.** 2007. Vías de comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos. Ed. Limusa S.A. de C.V. D.F., México. 736 p.
- Cisneros, J.,** Cholaki, C., Cantero G., A., Gonzales, J., Reynero, M., Diez, A. y L. Bergesio. 2012. Erosión hídrica; principios y técnicas de manejo. 1ª ed. rio cuarto: uniRio editora. Rio Cuarto, Córdoba, Argentina. 287 p.
- Comisión Nacional Del Agua (CNA).** 2016. Servicio meteorológico nacional; estación 5049 San Antonio las Alazanas con datos de 1947-2013. 14 p. (Consultado el 12 de mayo de 2016) <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=coah>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).** 1998. Carta Climatológica Datos Vectoriales Escala 1:1000000.
- Cuevas B., J.** 2006. Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre hidrofobicidad de suelos volcánicos. Rev. Suelos Nutr. Veg. 6 (2); 13-27.

- Etcharren G., R.** 1976. Manual de caminos vecinales. Ed. Miembro de la Cámara Nacional de la Industria. D.F., México. 387 p.
- García M., F.** 2005. Manual de topografía aplicada. Ed. Pax-México. D.F., México. 455 p.
- García T., E.** 2009. Manual práctico de mejoramiento de caminos vecinales y construcción de pequeños puentes (25m). Fondo Perú-Alemania. Perú. 48 p.
- García de M., E.** 1986. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ta Indianápolis. México. 217 p.
- Gayoso A., J.** y A. Iroume, A. 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el medio físico. Rev. Bosque en Valdivia, Chile 16 (2): 3-12.
- Georgia Soil and Water Conservation (GSWCC).** 2005. Nivel 1A: Seminario de fundamentos practicas con vegetación para el control de la erosión y sedimentación. Ed. Commission GSWCC. Georgia. E.U.A. 86 p.
- Hernández D., J.C.,** Soto C., J. J., Corral-Rivas, J., Montiel A., E. y R. Alvarado. 2013. Reducción de impacto ambiental de los caminos y brechas de saca en áreas de aprovechamiento forestal. Recopilación de extenso. En: XI congreso mexicano sobre recursos forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED). México. 141-154 p.
- Hudson N., W.** 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía (boletín de suelos de la FAO. FAO. Roma, Italia. 53 p.
- Instituto Geológico y Minero España.** 1988. Riesgos geológicos. Ed. IGME. Madrid, España. 333 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** 2016. Carta de fisiográfica; datos vectoriales escala 1:1000000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos; Arteaga, Coahuila de Zaragoza, clave geoestadística 05004. 9 p. (Consultado el 12 de mayo del 2016)

<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/05/05004.pdf>

**Jaramillo J., D. F.** 2006. Repelencia al agua en suelos; síntesis. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 30 (115) 215-232.

**Macías H., U.** 2015. Perfil del ecoturista que visita el Cañón de Amargos Arteaga y Caño de San Lorenzo, Saltillo, Coahuila. Tesis de licenciatura para obtener el título de Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 101 p.

**Madrigal H., L.,** Chaves H., Y. y D. G. Neary. 1994. Sedimentos derivados de los caminos en la cuenca del arroyo el carrizal Tapalpa Jalisco México. Cooperación social para el manejo sostenible de los ecosistemas forestales: quinto simposium bienal México/Estados Unidos de América. SARH, SFFS, INIFAP Y USDA-FS. Guadalajara, Jalisco, México. 189-201 p.

**Mataix-Solera, J.,** Zavala, L. M., Arcenegui, V., Jordán, A., Lozano, E., Gordillo-Rivero, A., Jiménez-Pinilla, P. y J. García-Moreno. 2013. 29° Reunión de la sociedad española de la ciencia del suelo Mallorca 2-6/09/2013: La repelencia al agua en el suelo: una propiedad más común de lo que pensábamos. Universidad Miguel Hernández y Universidad de Sevilla. Mallorca, España. 1 p.

**Matamoros, I.,** Novella, A., Pros, F., Gracia, C., Pacheco, E. y X. Úbeda. 2012. Propuesta de método topográfico para el estudio de la erosión en un camino forestal. Sección IV Métodos y Técnicas en Geomorfología: XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander. Universitat politècnica (departament d' Enginyeria del terreny, Cartogràfica y Geofísica de Catalunya, Universidad de Barcelona. España. 219- 222 P.

**Mateu, J.,** Añó, C. y P. Juan. 2003. Caracterización de la agresividad de la lluvia en la provincia de Castellón. Universidad Jaume L. Castellón, España. 28 p.

**Mazón N., J. J.** y A. San Millán V. 1993. Principales alteraciones en el entorno producidas por los caminos forestales. En: congreso forestal español; ponencias y comunicaciones tomo IV. Escuela Universitaria Politécnica Agraria Lourizán, España. 175-178 p.

- Menéndez, J. R.** 2003. Manual técnico: Mantenimiento rutinario de caminos con microempresas. Oficina Internacional del Trabajo (OIT) y Oficina Subregional para los Países Andino. Lima, Perú. 71 p.
- Michelena, R.** 2011. Erosión hídrica. Instituto Nacional De Tecnología Agropecuaria (INTA).Argentina. Argentina. 9 p.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).** 2006. Manual técnico de mantenimiento periódico para la red vial departamental no pavimentada. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. Perú. 59 p.
- Morgan, R. P. C.** 1997. Erosión y conservación de suelo. Mundi-Prensa México, S. A. de S.V. México, D.F. México 343 p.
- Narro F., E.** 2004. Física de los suelos con enfoque agrícola. Ed. trillas. D.F., México. 195 p.
- Navarro G., G. y S. Navarro G.** 2013. Química agrícola: química del suelo y de nutrientes esencial. Ed. Mundi-Prensa libros. Madrid, España. 508 p.
- Núñez S., J.** 1981. Fundamentos de edafología. Universidad estatal a distancia. San José, Costa Rica. 163 p.
- Núñez S., J.** 2001. Manejo y conservación de los suelos. Ed. Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 288 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** 2008. Los caminos e infraestructuras forestales: aprovechamiento. <http://www.fao.org/forestry/harvesting/11835/es/> (consultado el 02 de febrero del 2016)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** 1995. Impacto Ambiental de las Prácticas de Cosecha Forestal y Construcción de Caminos en Bosques Nativos Siempreverdes de la X Región de Chile: Capítulo 7. Identificación y valoración de impactos. <http://www.fao.org/docrep/v9727s/v9727s0a.htm#7> identificación y valoración de impactos (Consultado 11 de mayo del 2016)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** 2016. Portal de suelos de la FAO: propiedades físicas del suelo.

<http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/> (Consultado el 02 de febrero del 2016)

**Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** 1992. Erosión de suelos en América Latina; tema 2: erosión y pérdida de fertilidad del suelo. (Consultado el 13 de mayo del 2016) <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S06.htm>

**Ortiz V., B.** 1969. Tópicos de: conservación de suelos, clasificación de tierras y fertilizantes. Escuela Nacional de Agricultura. Texcoco, Edo. de México. 241 p.

**Ortiz V., B.** y C.A. Ortiz. 1990. Edafología. 7<sup>ma</sup> ed. UACH. Edo. de México, Texcoco. México. 394 p.

**Packer, P. E.,** Christensen G. F. y Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, Utah; 84401. 2014. Técnicas para controlar los sedimentos en caminos forestales secundarios. Comisión Nacional Forestal y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Jalisco, México. México. 46 p.

**Rivera, S.,** Kershner J. L. y G. R. Keller. 2009. Tratamientos de la superficie de rodadura para reducir la erosión en caminos forestales en Honduras. Rev. Inv. Agr. En USA. 36 (3): 425-432 p.

**Rzedowski, J.** 2006. Vegetación de México. 1ra edición digital. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. D.F., México. 504 p.

**Salinas, G. J.** y C. A. Valencia. 1993. Oxisoles y Utisoles en América tropical; I. Distribución, Importancia y Propiedades Físicas. Centro internacional de Agricultura Tropical CIAT. Cali, Colombia. 53 p.

**Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).** N.D. Control de cárcavas. Colegio de postgraduados. Texcoco, Edo. de México. 9 p.

**Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).** 2006. Norma Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006. Diario Oficial de la Federación (DOF). D.F. MEXICO. 24 p.

**SEMARNAT-UACH.** 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, escala 1:1000000. México

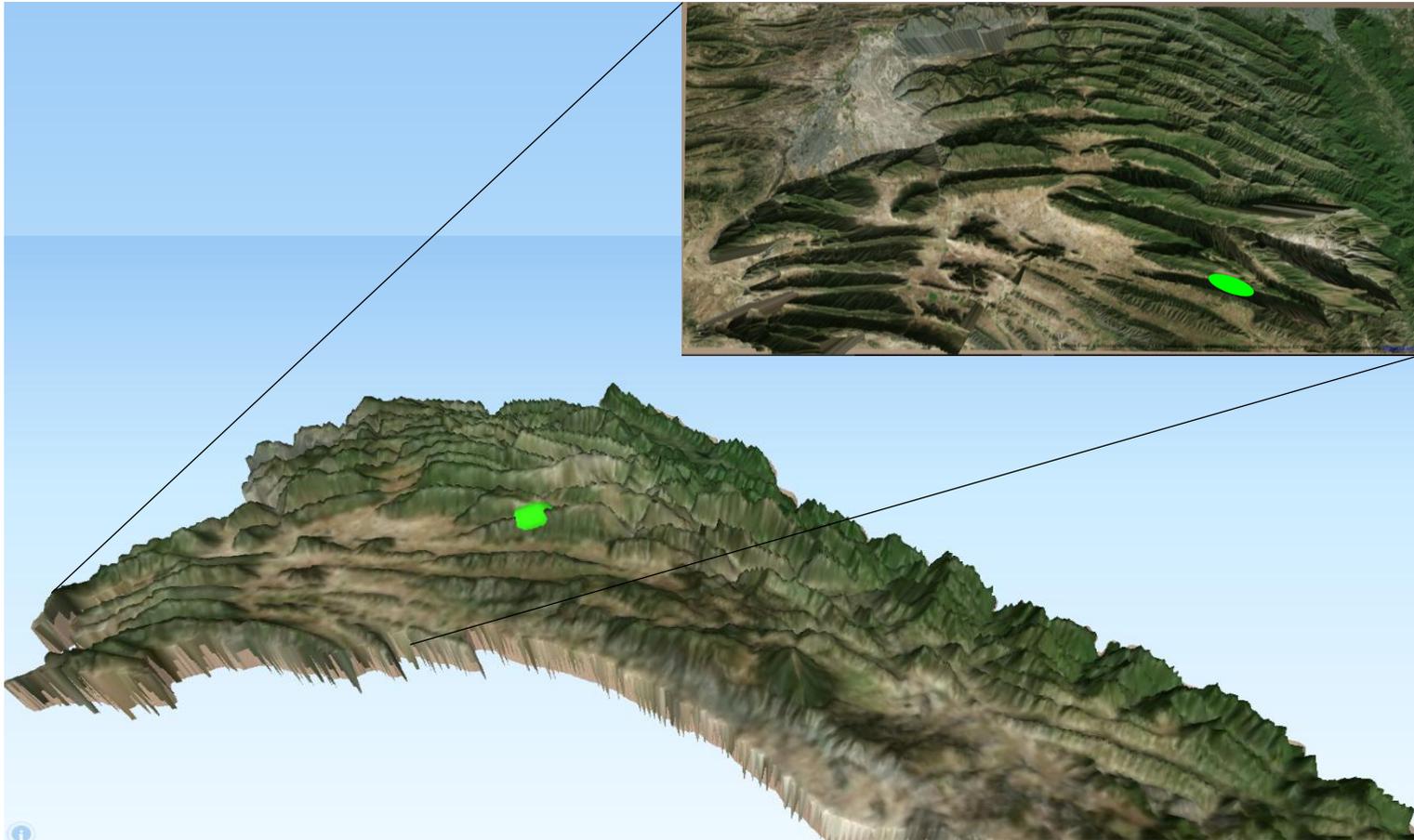
- Secretaría de Caminos y Transportes (SCT).** 2016. Glosario: definiciones. <http://www.sct.gob.mx/obrapublica/htmls/glosario.html> (Consultado 10 de febrero de 2016)
- Sherar, J.** y G. Keller. 2008. Ingeniería de Caminos Rurales; Guía de Campo para las Mejores Prácticas de Gestión de Caminos rurales. US Agency for International Development (USAID): en cooperation de; USDA, Forest Service International Programs; Conservation Management Institute, Virginia Polytechnic Institute and State University. Estados Unidos de América. México. 160 p.
- Tayupanta J., J. R.** 1993. La erosión hídrica: proceso, factores y formas. Boletín divulgativo n.229 Estación Experimental "Santa Catalina" Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Ecuador. 20 p.
- Tchikoue, H.,** Notario de la T. A. y G. Jiménez S. 2010. Tomo I: manual de consultas de caminos forestal. Universidad Autónoma chapingo. Texcoco, Edo. de México. 146 p.
- Thompson, L. M.** y F.R. Troeh. 1988. Los suelos y su fertilidad. Ed. Reverte S. A. Barcelona, España. 649 p.
- Úbeda, X.,** Reina L. y M. sala. 1998. Cuantificación de la erosión de un camino forestal de un bosque típico mediterráneo de *Quercus suber*. Rev. de Geog. España 10 (1) 185-196.
- Vivanco, M.** 2005. Muestreo estadístico. Diseño y aplicaciones. Ed. Universitaria. Santiago, Chile. 209 p.
- Weaver, W.,** Wepper, E. y D. Hagens. 2014. Manual de caminos forestales y rurales: Una guía para planificar, diseñar, construir, reconstruir, mejorar, mantener y cerrar caminos forestales. Distrito de Conservación de Recursos del Condado de Mendocino Ukiah, California. Estados Unidos. 416 p.



## VIII. ANEXOS

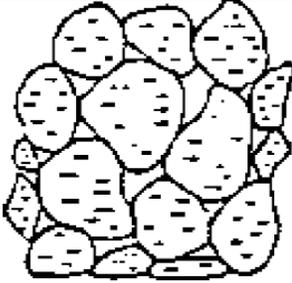
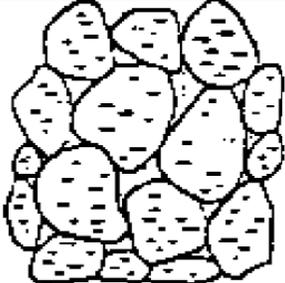
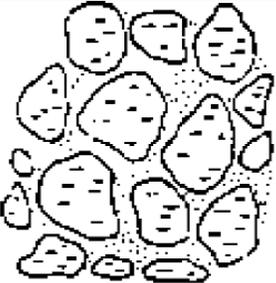
## Anexo 1.

Subprovincia fisiografía de la Gran Sierra Plegada.



## Anexo 2.

Estados físicos de mezclas de suelos y agregados (adaptación de Yoder and Witzcark, 1975, citado por Sherar y Keller, 2008).

		
<p style="text-align: center;">Agregados sin finos</p>	<p style="text-align: center;">Agregados con suficientes finos para máxima densidad</p>	<p style="text-align: center;">Agregados con alto porcentaje de finos (&gt;15 hasta 30%)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contacto entre partículas</li> <li>• Densidad variable</li> <li>• Alta permeabilidad</li> <li>• No susceptible al congelamiento</li> <li>• Alta estabilidad estando confinado; baja, si no lo está confinado</li> <li>• No es afectado por el agua</li> <li>• Difícil de compactar</li> <li>• Se desmorona fácilmente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contacto entre partículas con mayor resistencia contra la deformación</li> <li>• Aumenta hasta alcanzar la densidad máxima</li> <li>• Baja permeabilidad</li> <li>• Susceptible al congelamiento</li> <li>• Alta estabilidad relativa en condiciones con y sin confinamiento</li> <li>• No lo afecta mayormente las condiciones adversas del agua</li> <li>• Moderadamente fácil de compactar</li> <li>• Buen desempeño en caminos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se destruye el contacto entre partículas; el agregado “flota” dentro del suelo</li> <li>• Disminución de la densidad</li> <li>• Baja permeabilidad</li> <li>• Susceptible al congelamiento</li> <li>• Baja estabilidad y baja resistencia</li> <li>• Lo afecta mucho el agua</li> <li>• Fácil de compactar</li> <li>• Se vuelve polvo fácilmente</li> </ul>

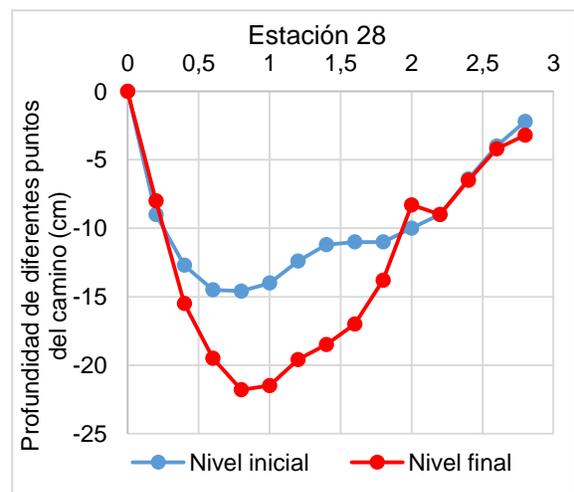
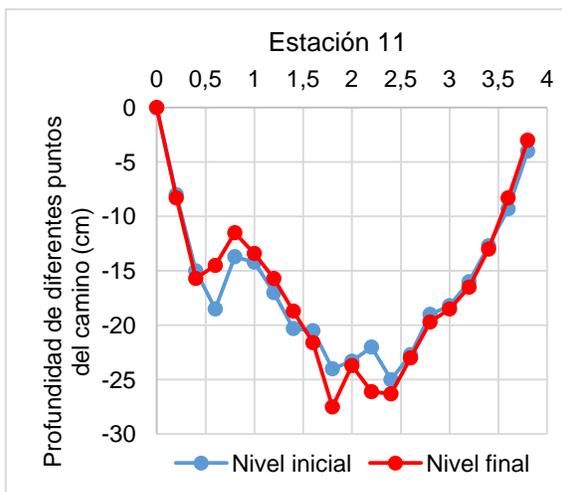
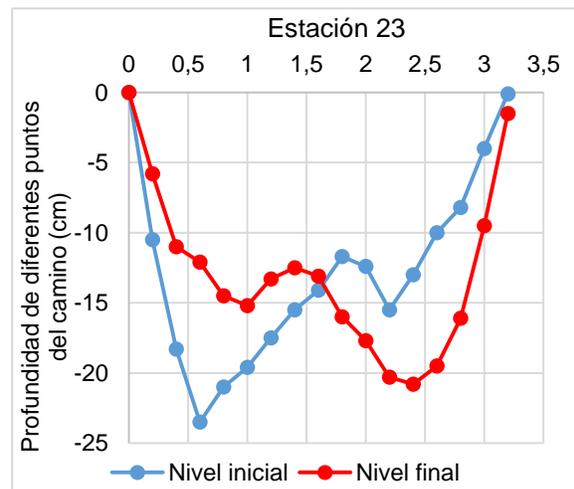
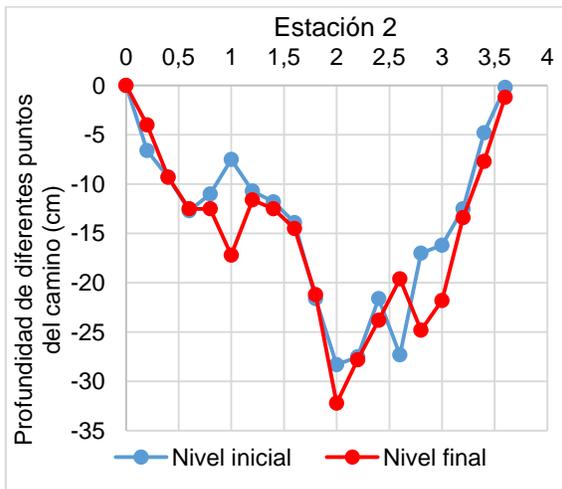
### Anexo 3.

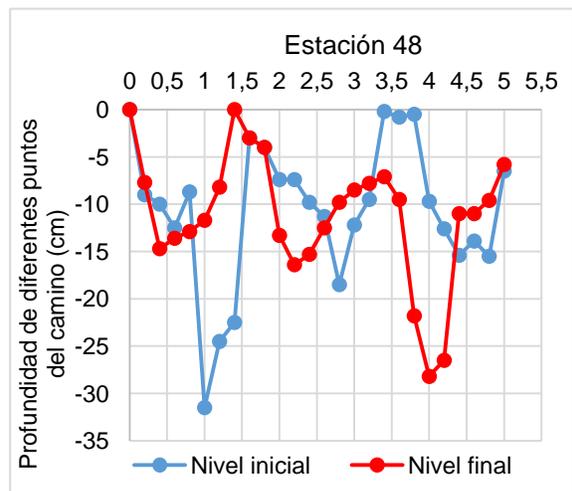
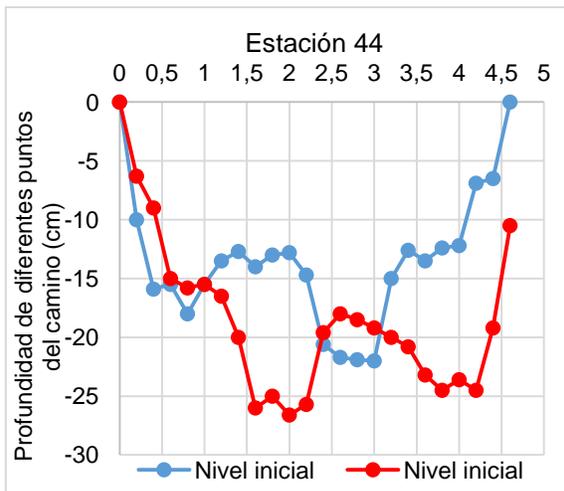
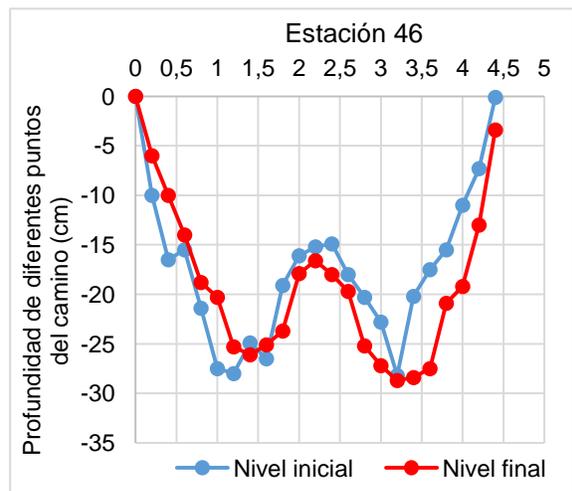
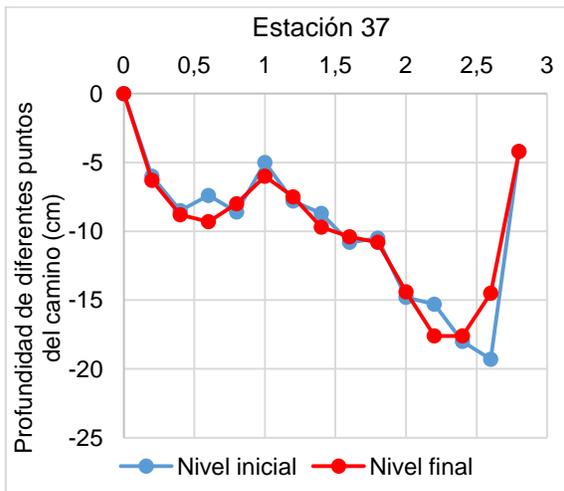
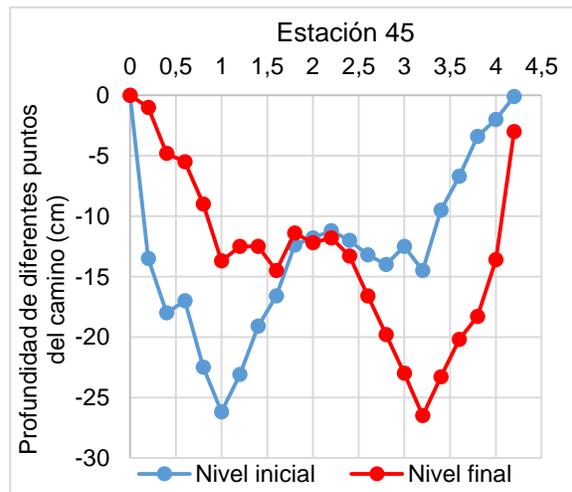
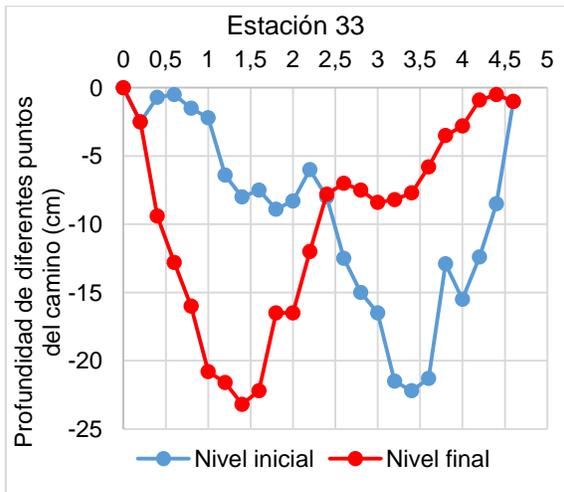
Perfiles transversales de las estaciones del camino con desplazamiento negativo de suelo.

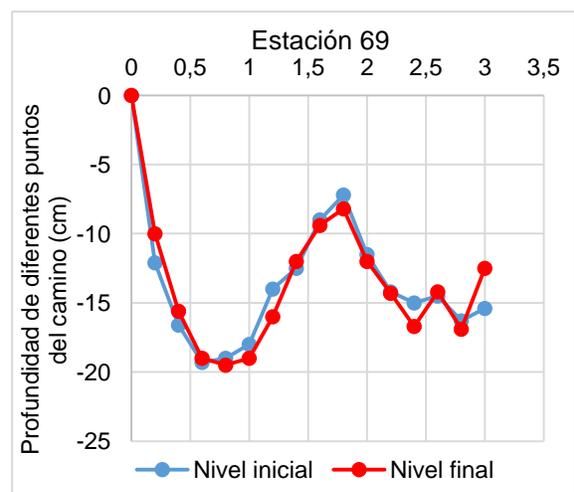
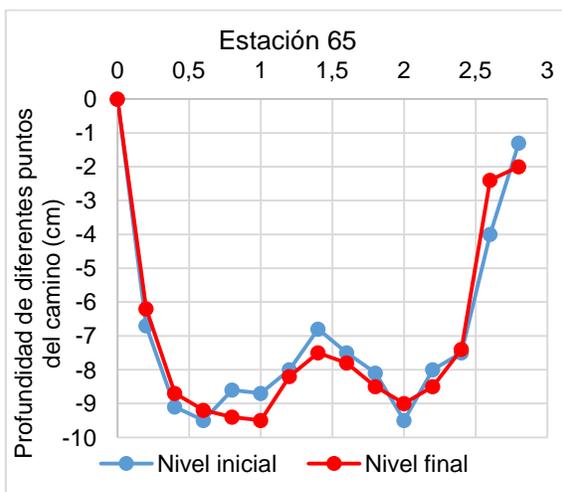
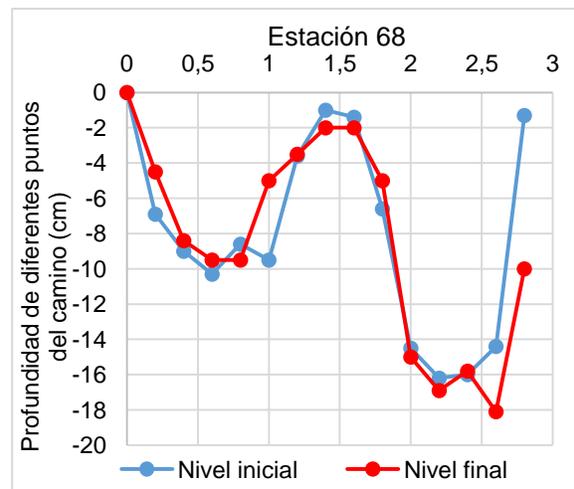
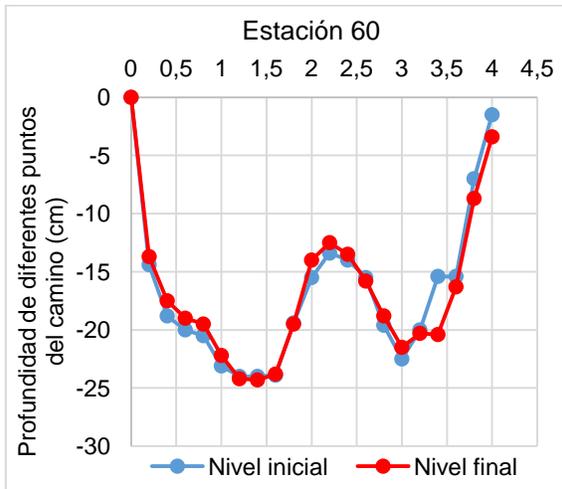
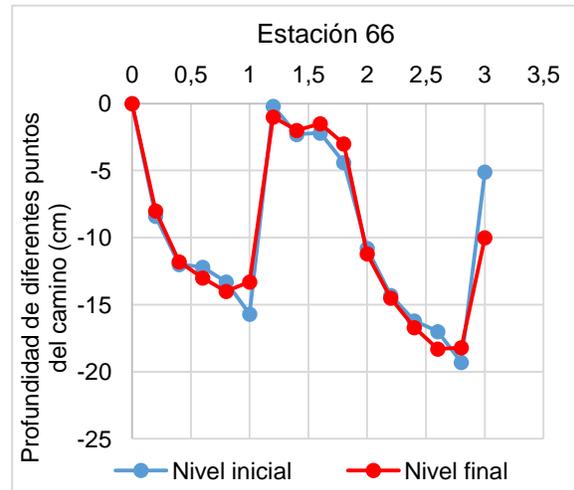
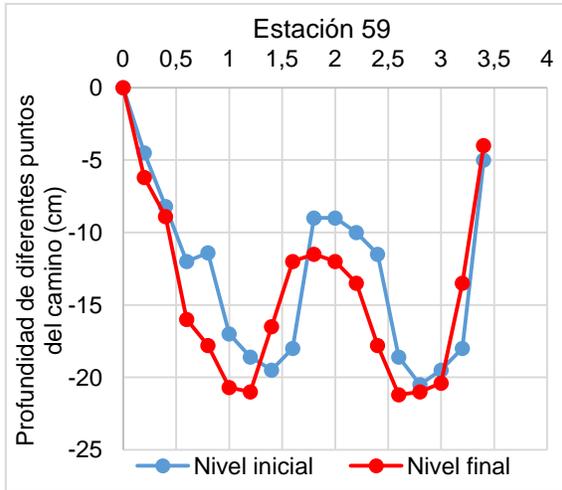
**Nota:**

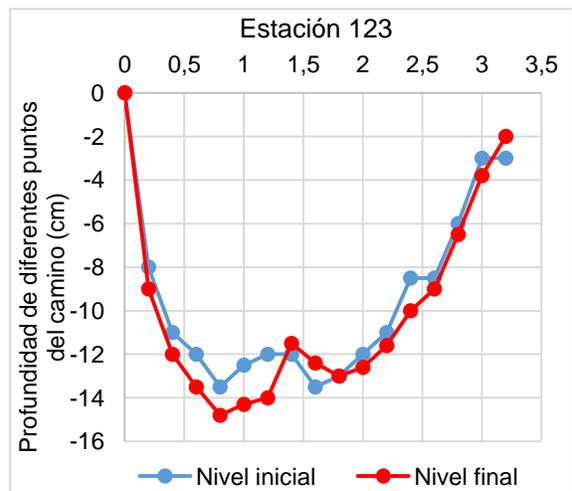
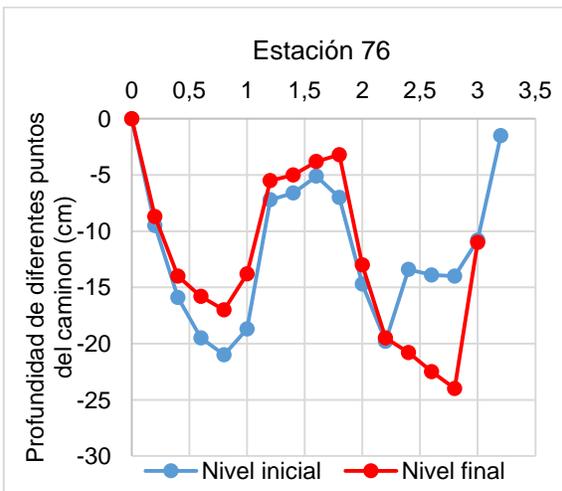
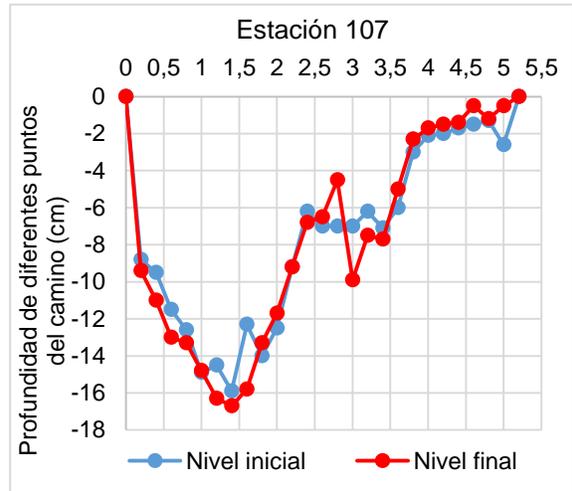
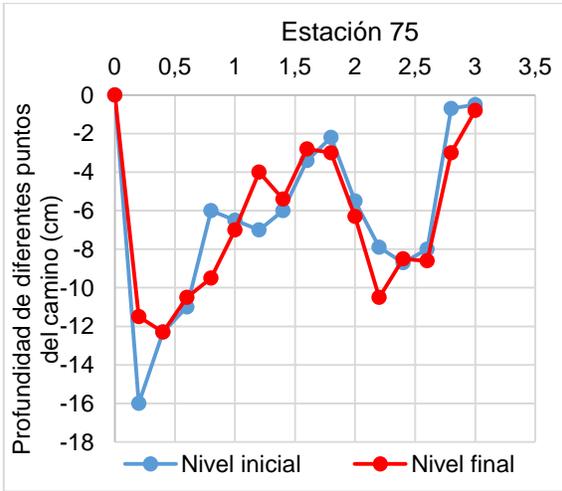
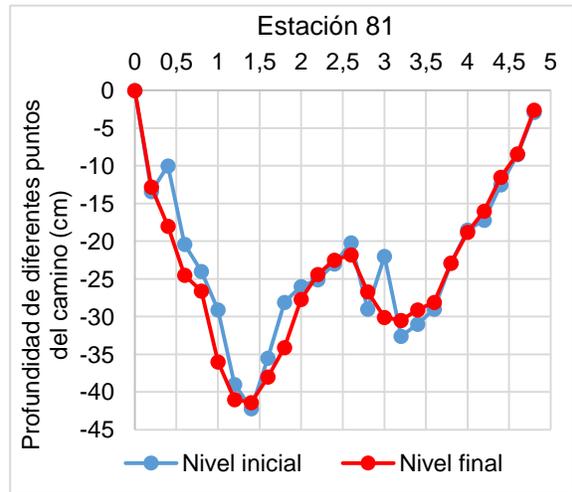
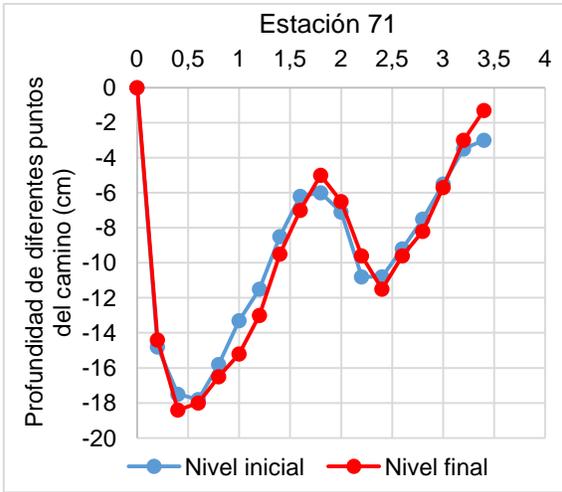
**Nivel inicial:** corresponde a la primera toma de datos en campo (finales de abril del 2015.)

**Nivel final:** corresponde a la segunda toma de datos en campo (enero del 2016).









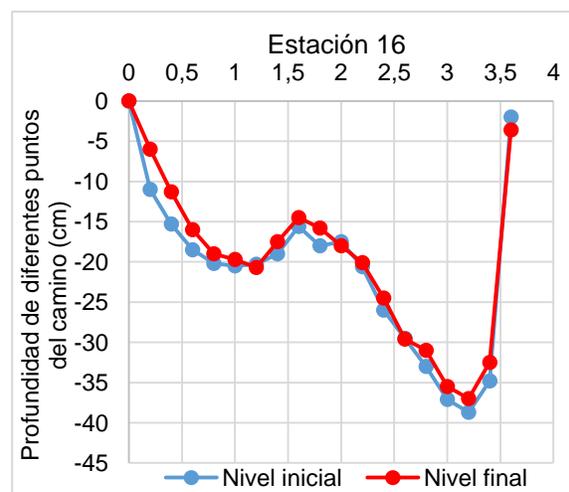
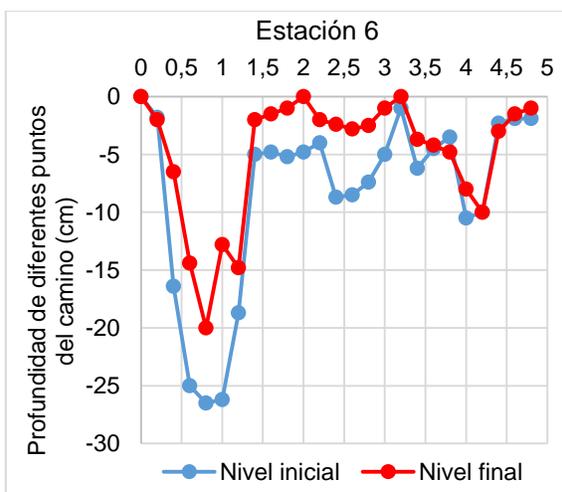
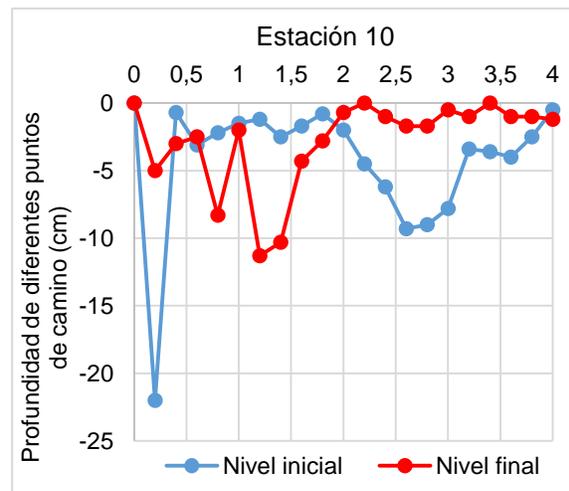
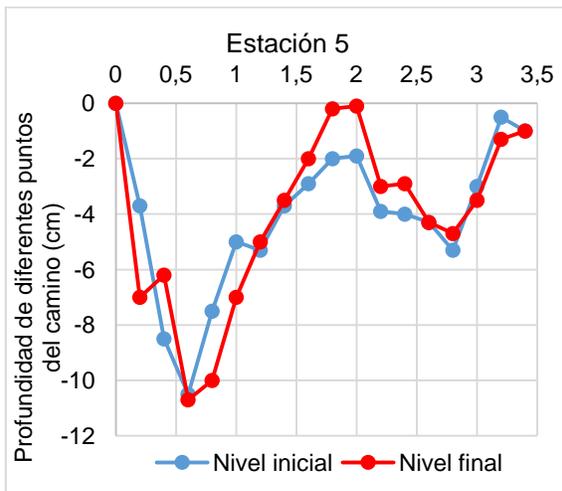
**Anexo 4.**

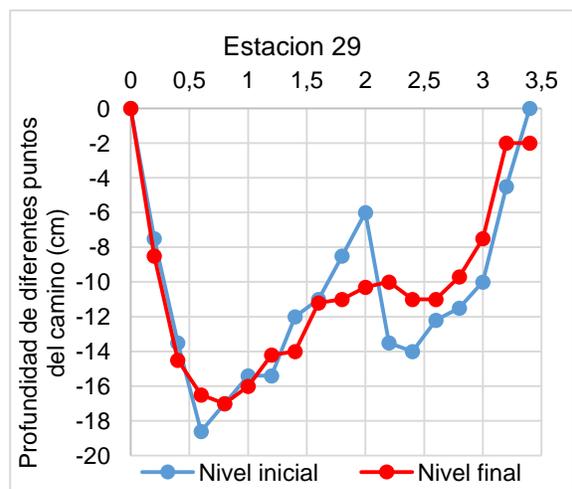
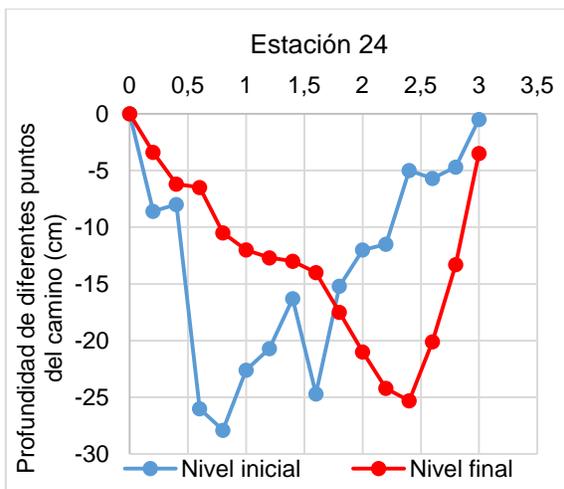
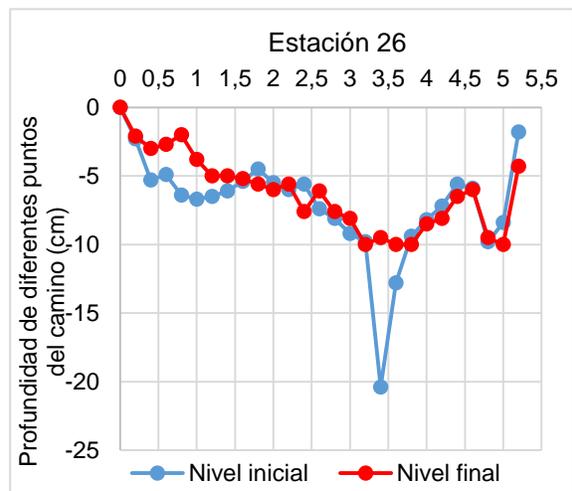
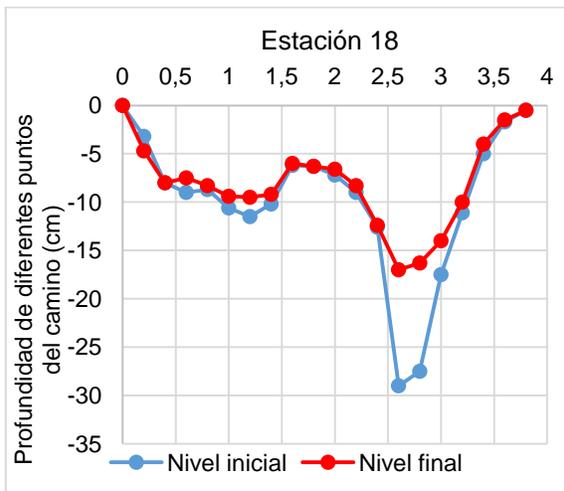
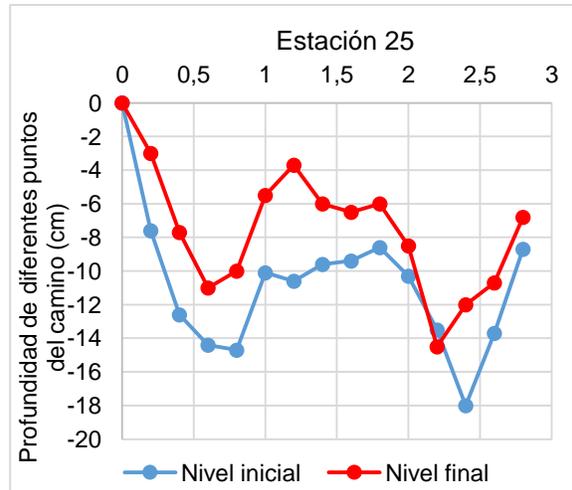
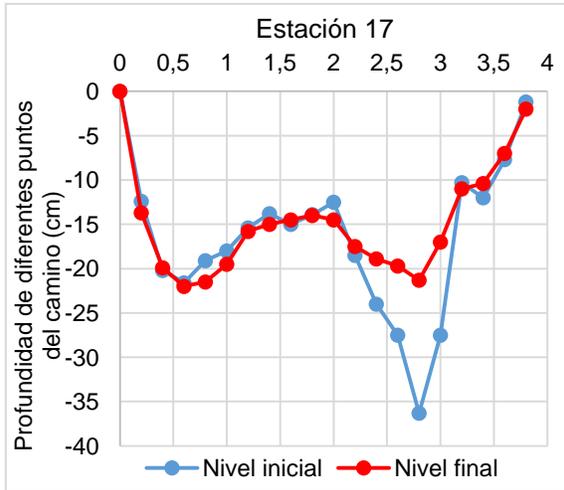
Perfiles transversales de las estaciones del camino con desplazamiento positivo de suelo.

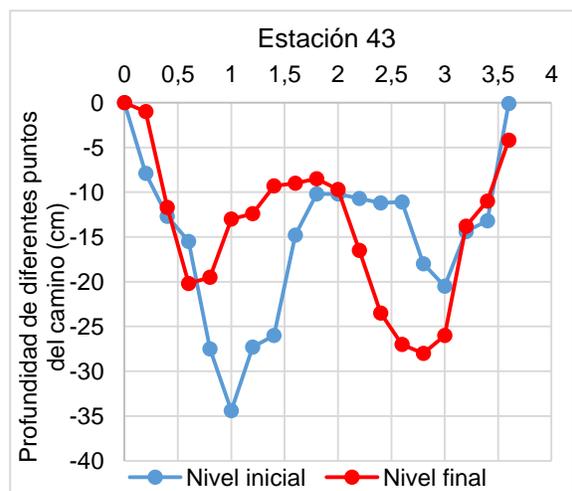
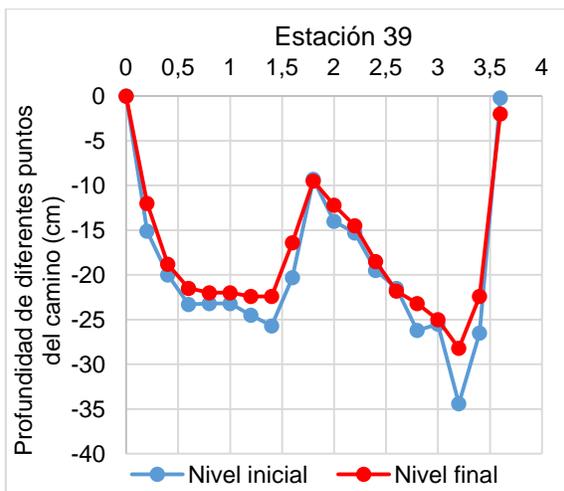
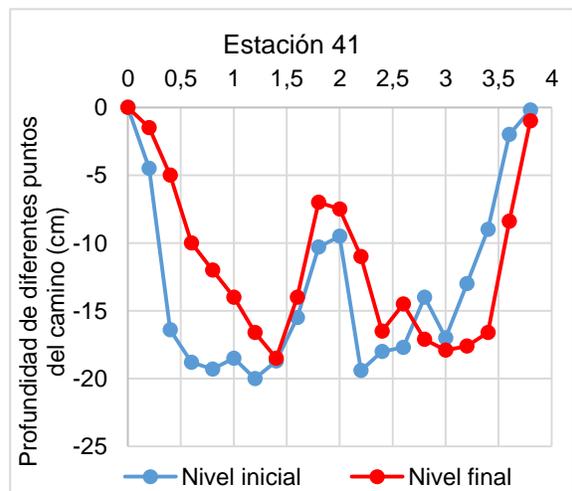
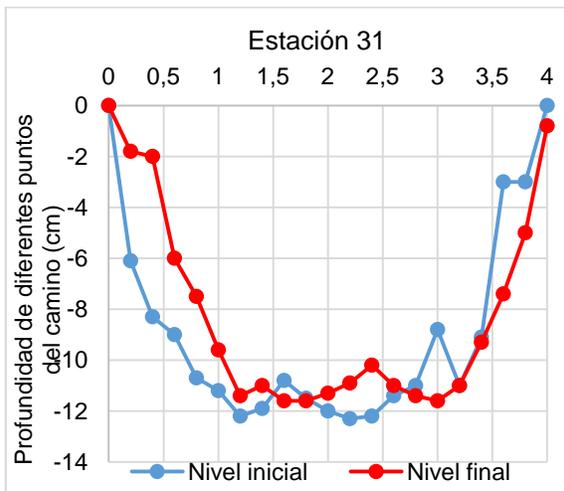
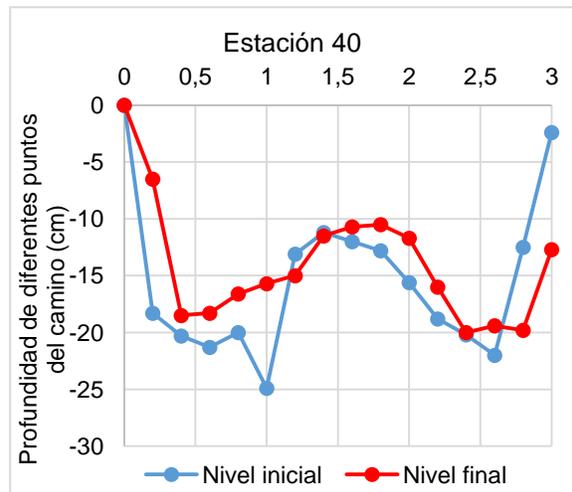
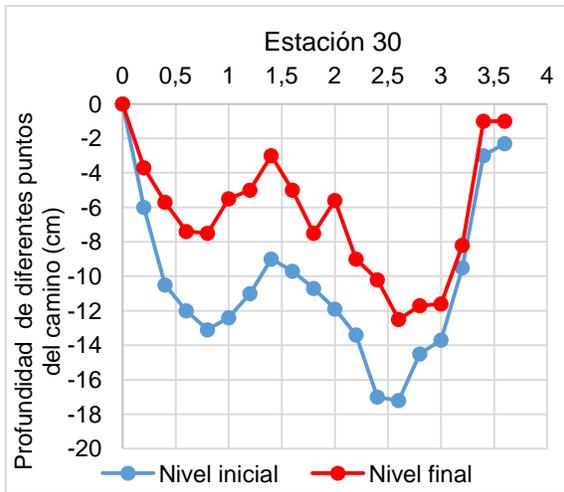
**Nota:**

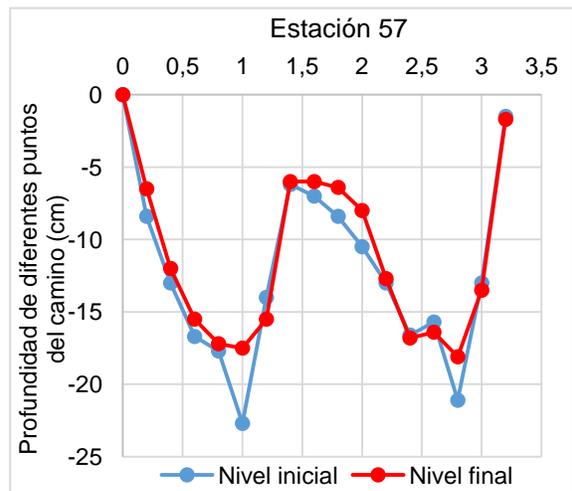
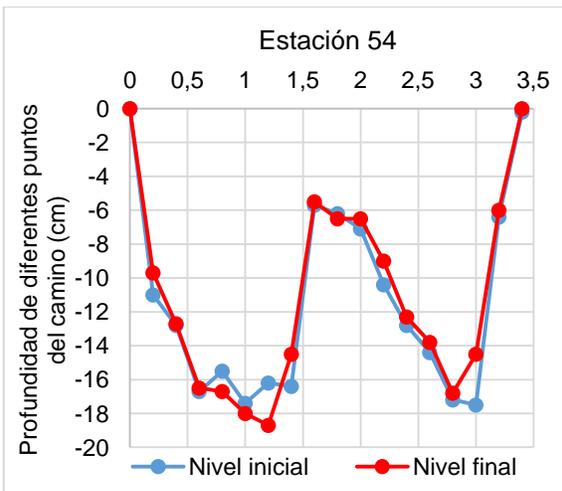
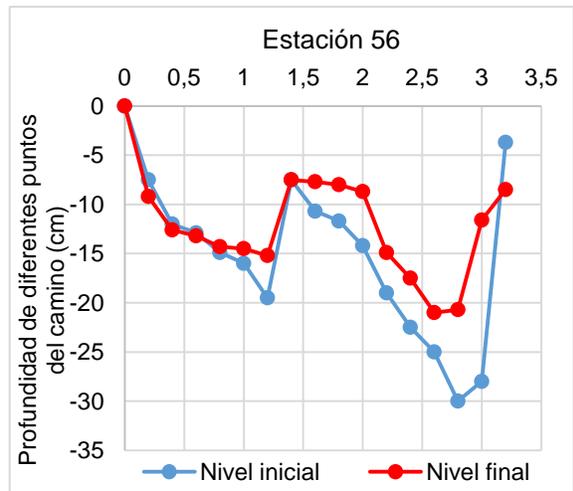
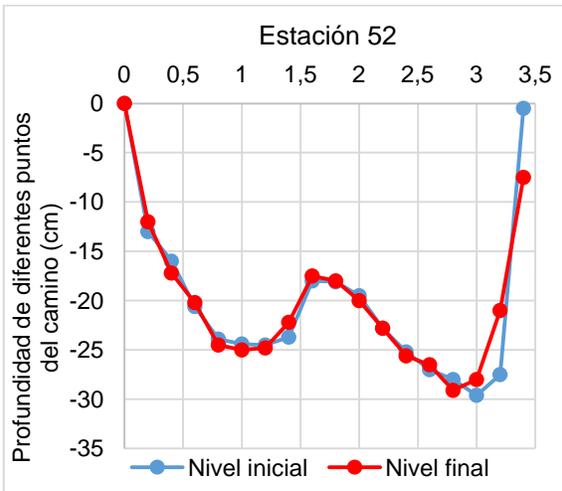
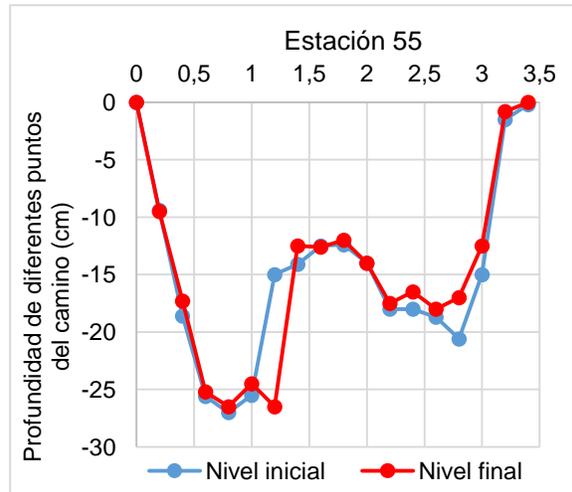
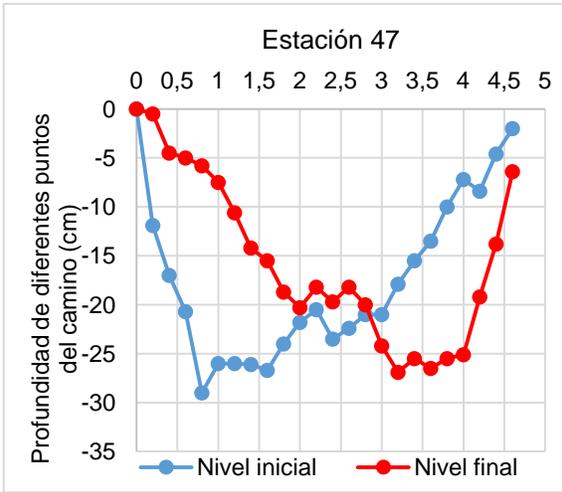
**Nivel inicial:** corresponde a la primera toma de datos en campo (finales de abril del 2015).

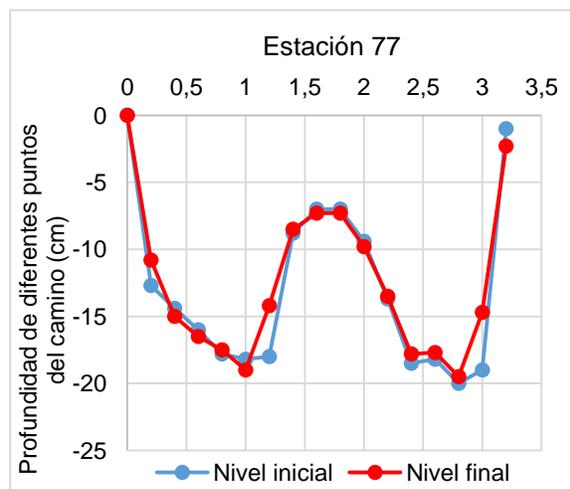
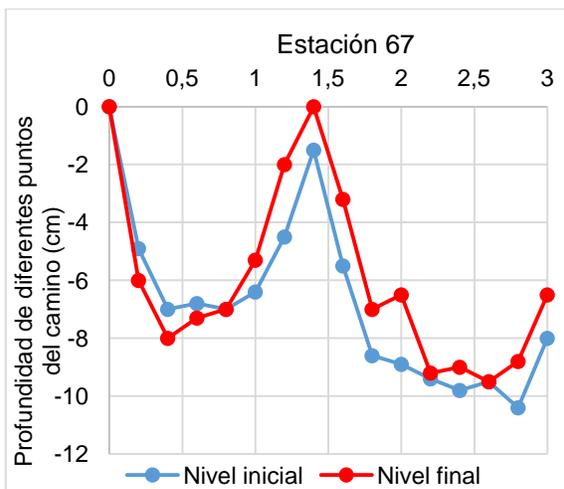
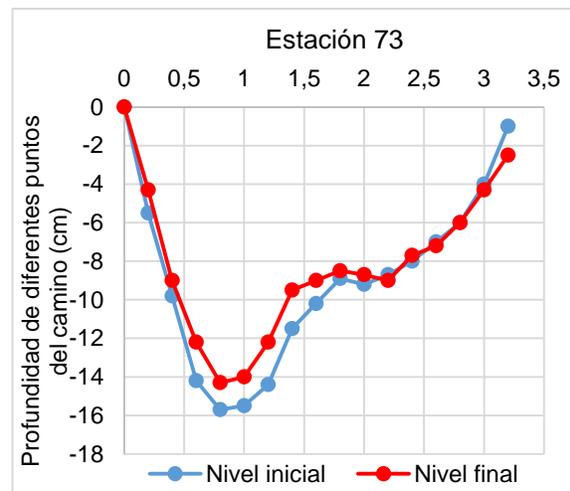
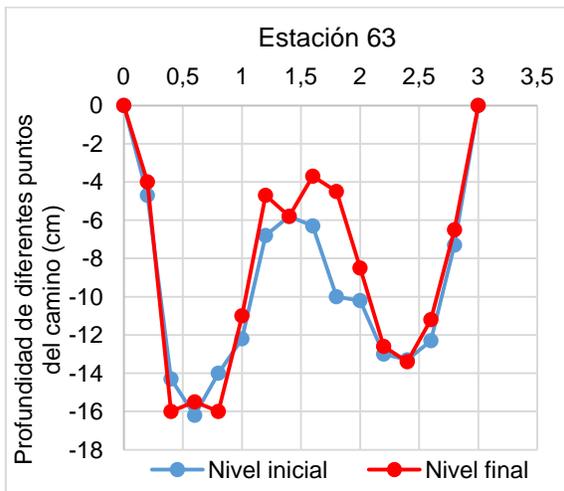
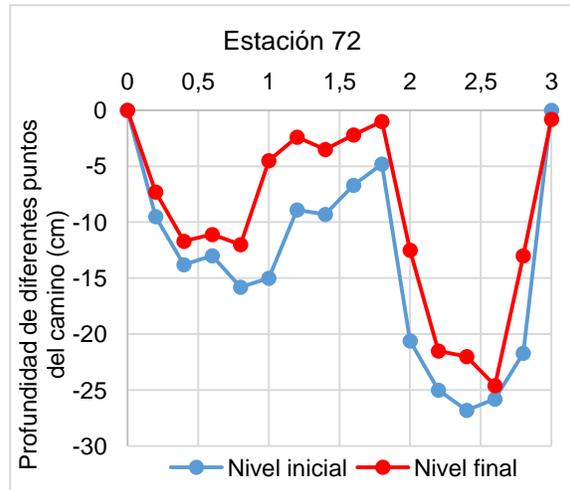
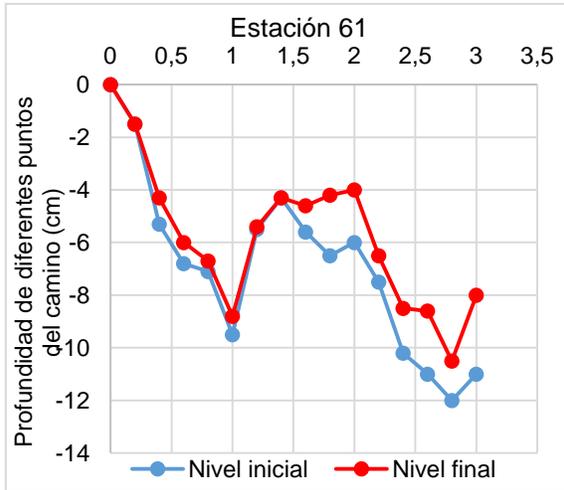
**Nivel final:** corresponde a la segunda toma de datos en campo (enero del 2016).

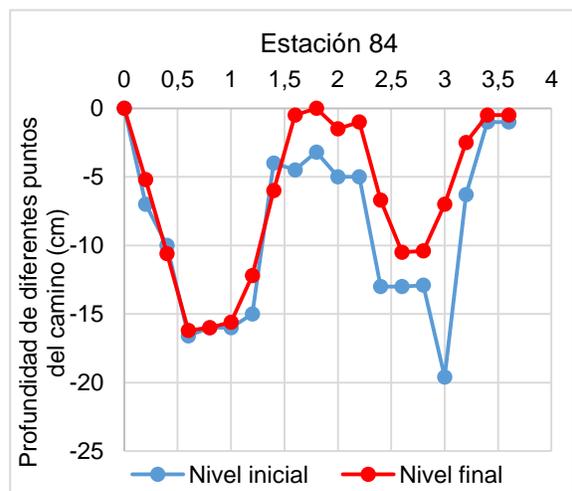
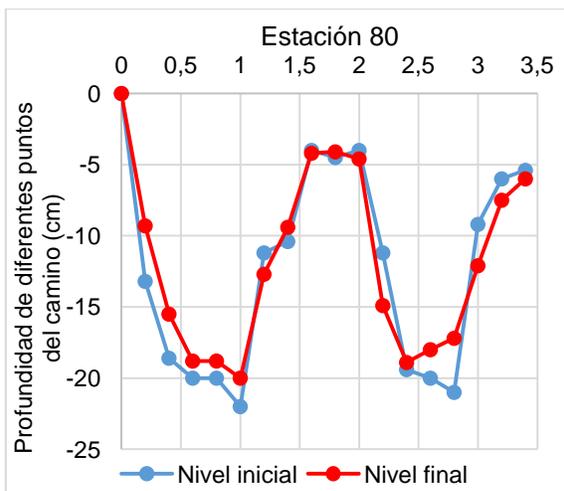
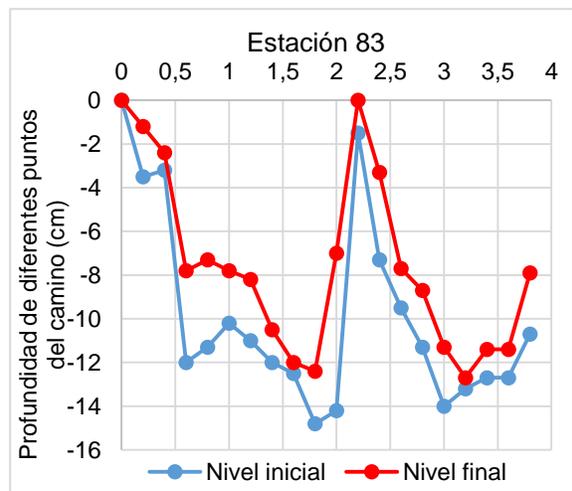
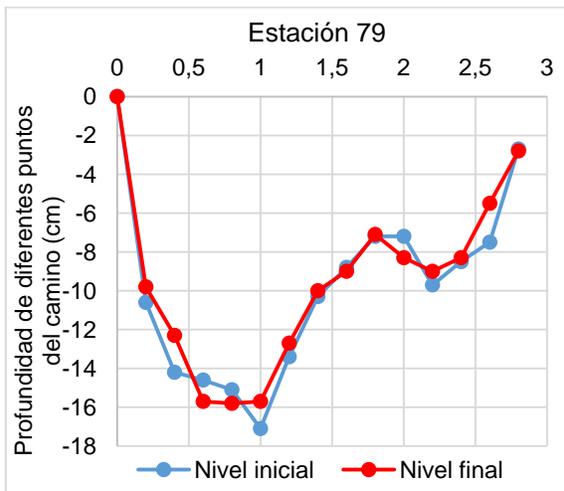
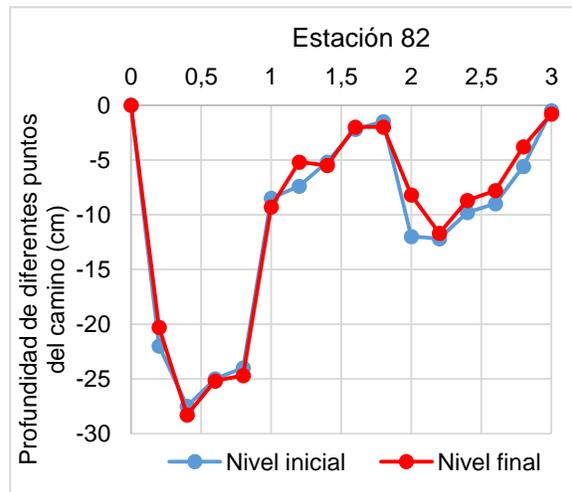
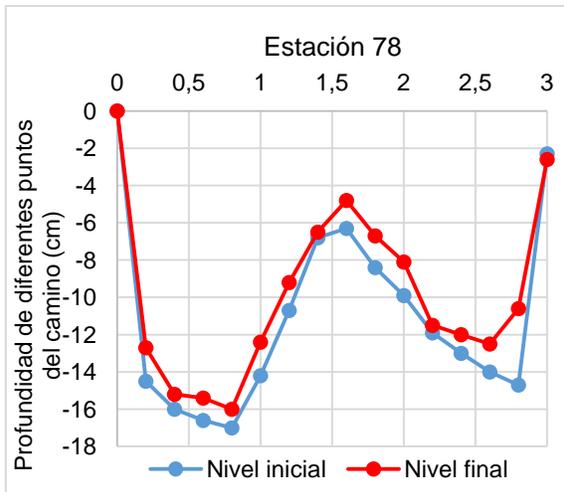


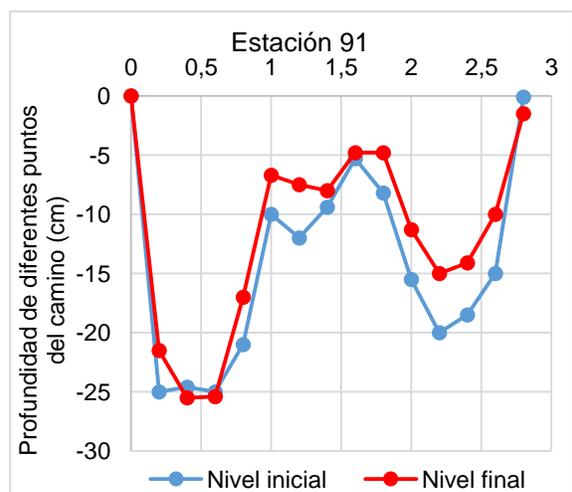
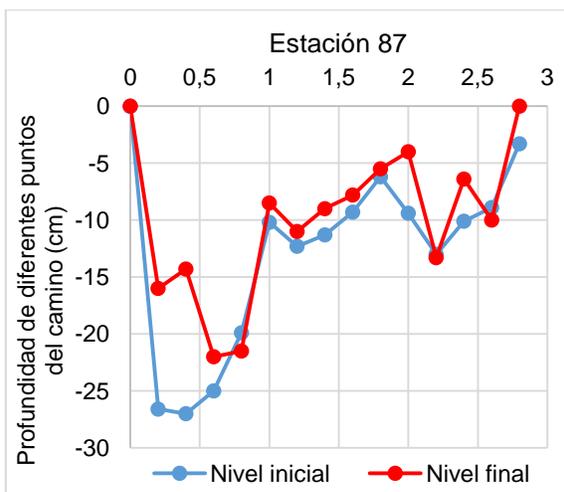
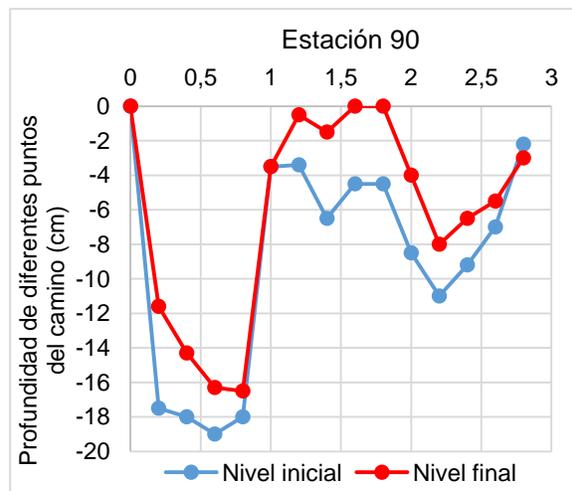
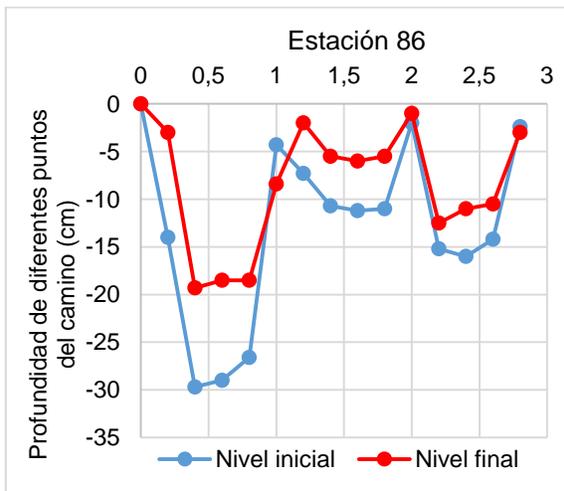
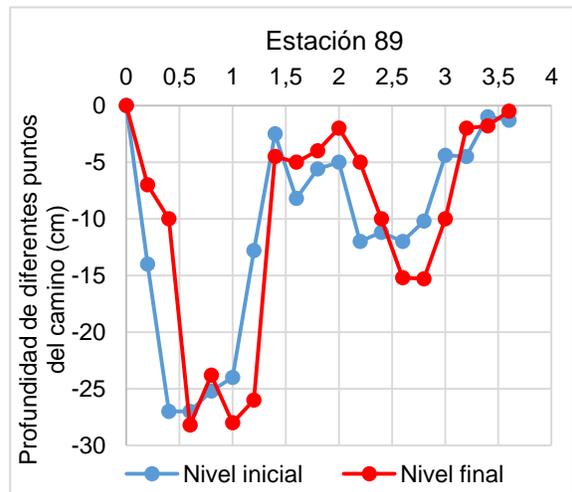
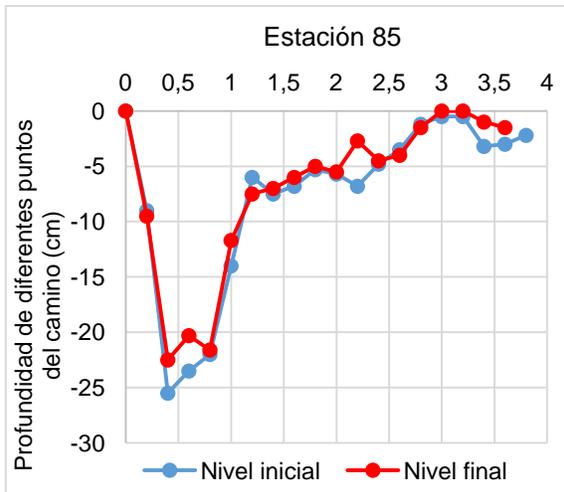


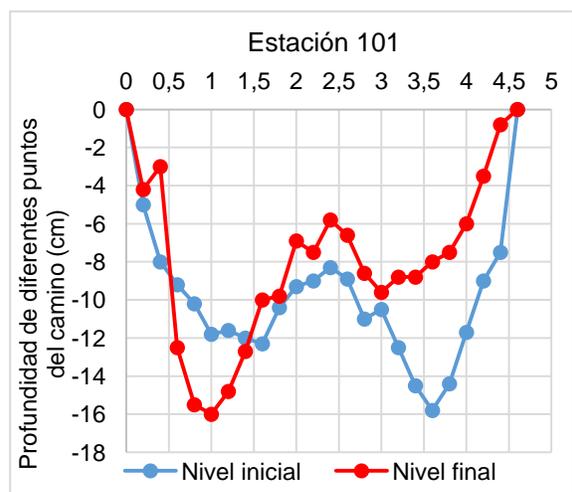
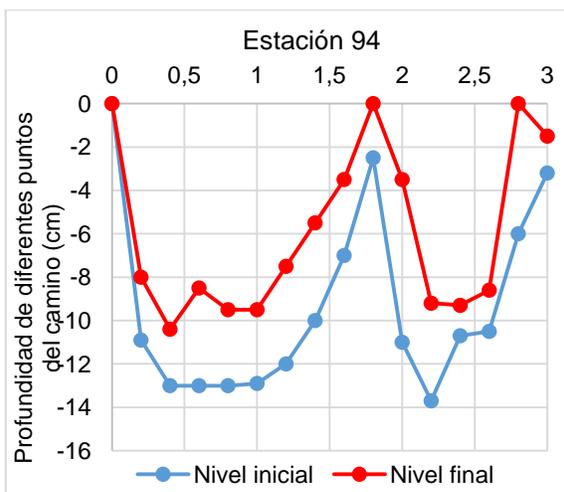
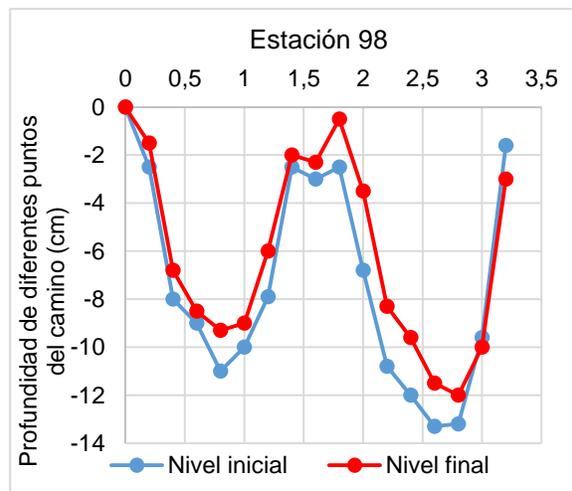
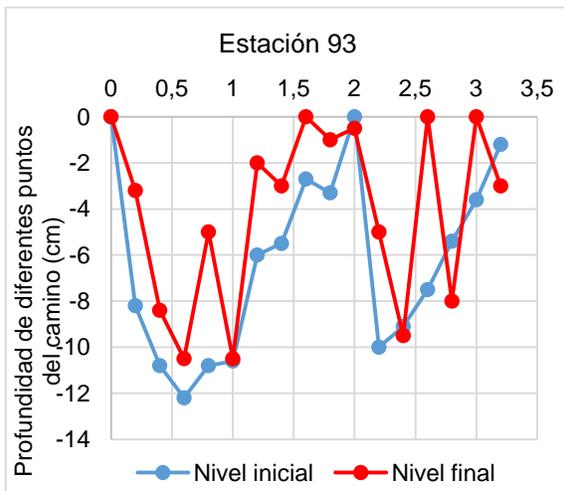
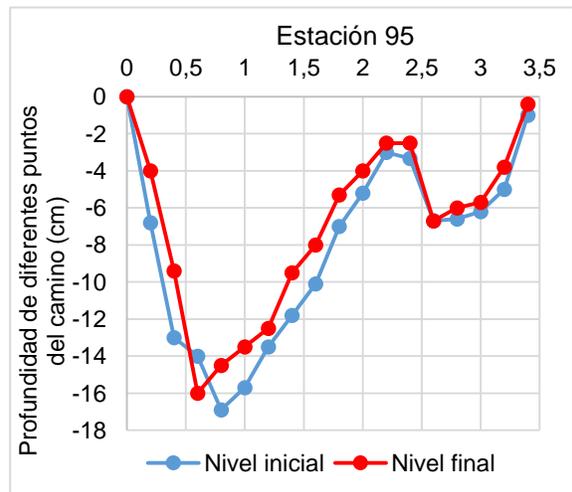
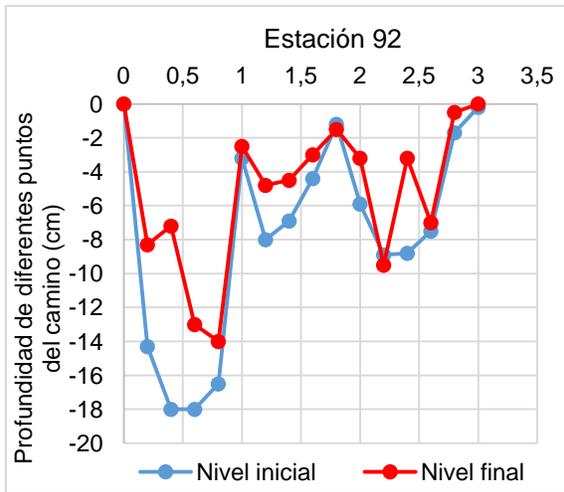


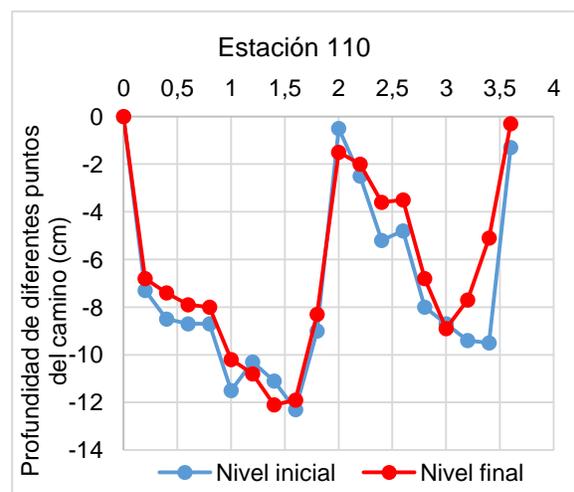
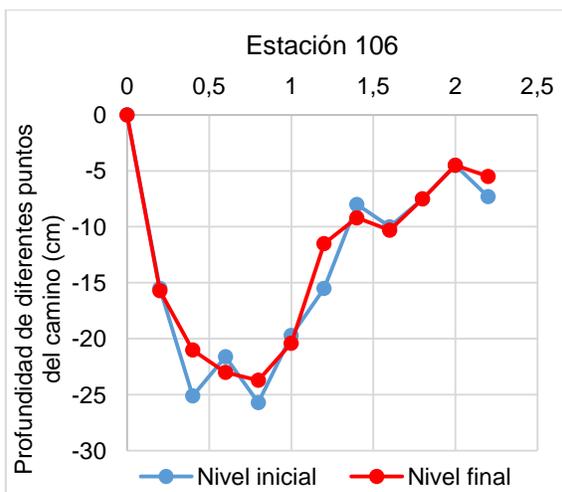
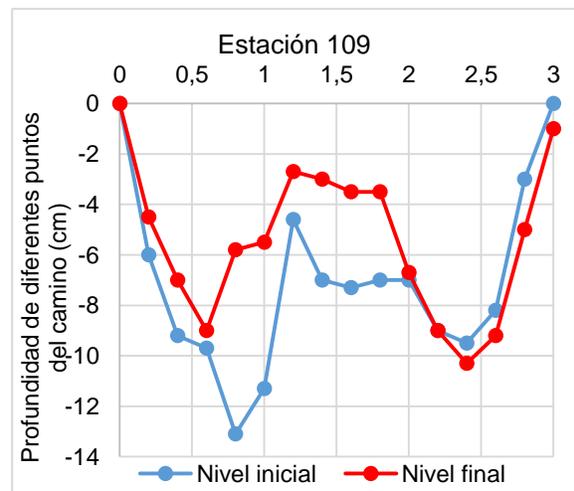
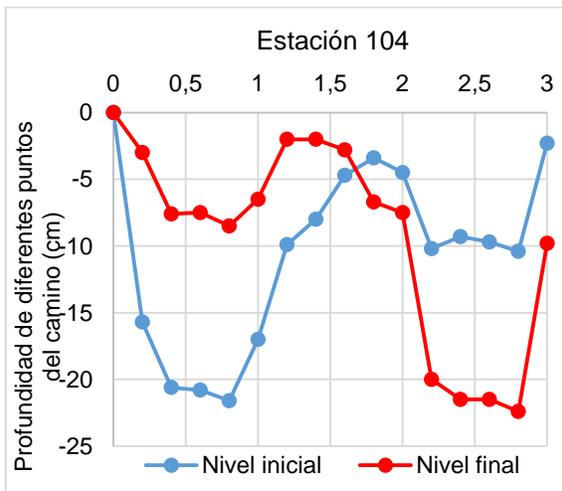
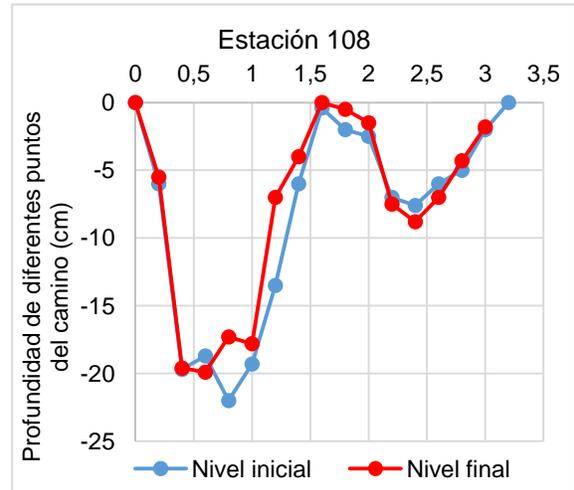
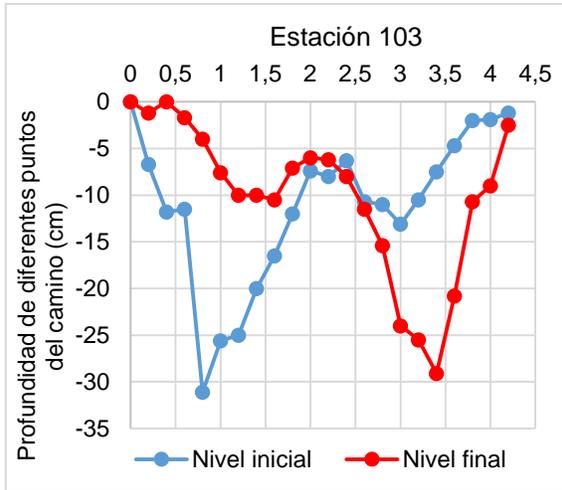


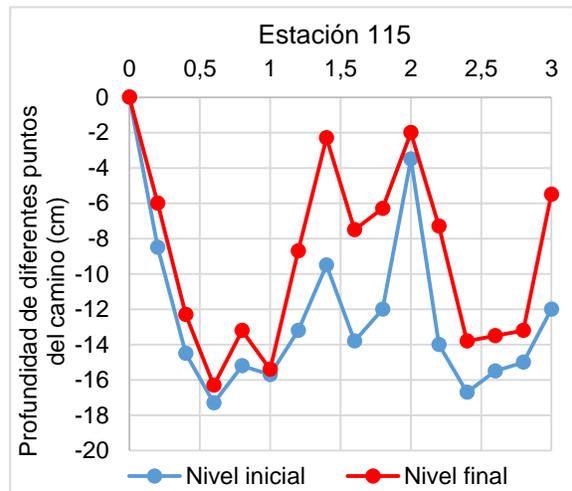
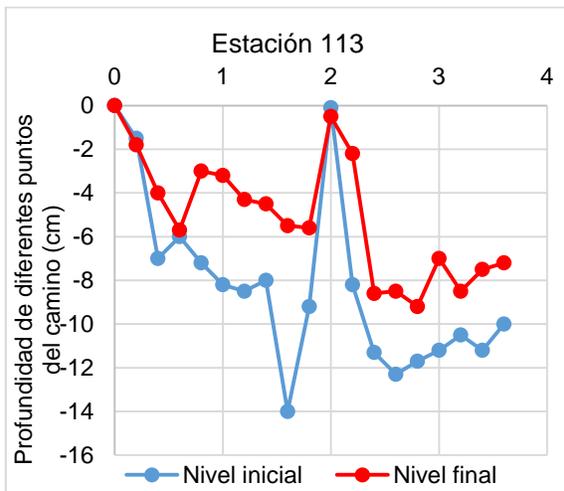
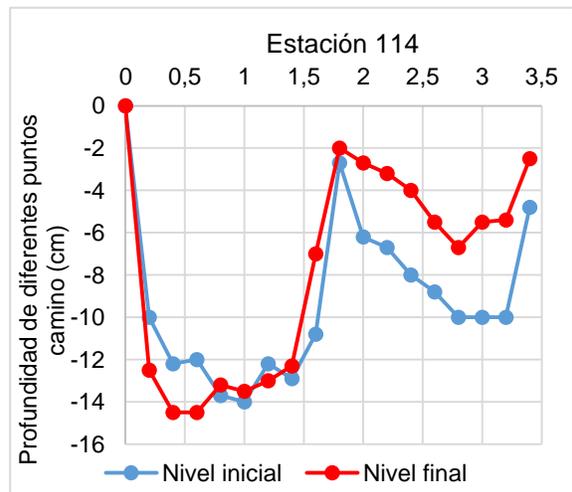
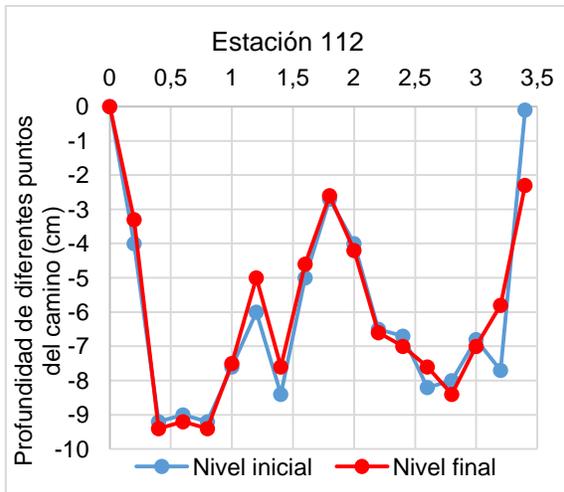












## Anexo 5.

Imágenes que corresponden a la primera toma de datos en campo (finales del abril del 2015).







## Anexo 6.

Imágenes que corresponden a la segunda toma de datos en campo (enero del 2016).









