

**EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE EROSIÓN; MEDIANTE LA
CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO REDUCIDO PARA SUELOS ARCILLOSOS
DE LA FORMACIÓN TILATA EN LA CIUDAD DE TUNJA- SECTOR PIRGUA.**

EMILCEN LEMUS PINEDA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA BOYACA
2015**

**EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE EROSIÓN; MEDIANTE LA
CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO REDUCIDO PARA SUELOS ARCILLOSOS
DE LA FORMACIÓN TILATA EN LA CIUDAD DE TUNJA- SECTOR PIRGUA.**

EMILCEN LEMUS PINEDA

**Proyecto de grado para optar por el título de
Ingeniero Civil**

**Director
Ing. Esp. José Rodrigo Méndez Zuluaga**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
TUNJA BOYACA
2015**

Nota de aceptación:

Director

Jurado

Jurado

Ciudad y Fecha: _____

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Primeramente a Dios el dador y consumidor de la vida

Mi padres Gilberto Lemus y Cecilia Pineda por su ejemplo, apoyo, amor incondicional y lo más importante enseñarme a amar a DIOS.

Mis hermanitos Edwin, Fredy y Sandra por su apoyo, amor y cada momento de felicidad y travesura que me han regalado.

Ingeniero José Rodrigo Méndez Zuluaga director y revisor del proyecto por su tiempo y apoyo. Además de su colaboración en cada etapa del proyecto.

Al decano de la facultad de ingeniería civil Carlos Andrés Caro por su aporte en el diseño de la precipitación.

Al estudiante de la Facultad de Ingeniería Civil, Oscar Sainea por su asesoría en la construcción del modelo.

A mis amigas y colegas por su apoyo en el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Milton Fernando Ballesteros Barreto por su apoyo en el desarrollo del proyecto.

A los docentes de la Universidad Santo Tomas, Facultad de Ingeniería Civil quienes son parte fundamental de mi desarrollo profesional

Hay dos formas de ver la vida:

Una es creer que no existen milagros,

La otra es creer que todo es un milagro”

Albert Einstein

DEDICATORIA

Este proyecto representa un escalón más de mi proyecto de vida, culminar el proyecto es un sueño hecho realidad y con la certeza de ser el primero de muchos más. Agradezco a Dios por su infinito amor a quien dedico una este logro de cinco años de esfuerzo y dedicación.

Emilcen Lemus Pineda

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
4. ESTADO DEL ARTE	14
4.1 EROSIONABILIDAD.....	15
4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA EROSIONABILIDAD.....	15
4.2.1 Erosionabilidad en suelos cohesivos.....	15
4.2.2 El porcentaje de arcilla.....	17
4.3 ENSAYOS DE EROSIONABILIDAD.....	17
4.3.1 Ensayo de caída simple de agua.....	18
4.3.2 Ensayo de desmoronamiento (Crumb test).....	18
4.3.3 Ensayos químicos: ESP Y S.A.R.....	18
4.3.4 Ensayo de Pinhole.....	18
4.3.5 Ensayo de flujo en canal.....	20
4.3.6 Ensayo de luz ultravioleta.....	20
4.3.7 Ensayo de dispersión (Soil Conservation Service).....	21
4.3.8 Ensayo de erosión por chorro de agua.....	21
4.4 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS SENSITIVAS A LA EROSIÓN.....	22
4.5 TIPOS DE EROSION.....	22
4.5.1 Erosión por el viento.....	22
4.5.2 Erosión por gotas de lluvia.....	24
4.5.3 Tamaño y velocidad de las gotas de lluvia.....	25
4.5.4 Erosión laminar.....	25
4.5.5 Erosión en surcos.....	26
4.5.6 Erosión por afloramiento de agua.....	27
4.5.7 Erosión interna.....	27
4.5.8 Erosión en cárcavas.....	27
Erosión laminar y en surcos.....	28
4.5.9 Erosión en masa (deslizamientos).....	29
4.6 Estabilización.....	29
5. DESCRIPCIÓN DE LA SUB-CUENCA.....	31

5.1	LOCALIZACIÓN	31
5.2	UBICACIÓN ESPACIAL	32
5.3	DIVISORIA DE AGUAS	33
5.4	COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y CLIMATOLÓGICO.....	34
5.5	GEOLOGÍA.....	35
5.6	ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA SUB-CUENCA	37
5.6.1	Pendiente media corriente principal.	38
5.7	FORMA.....	39
5.7.1	Área.....	39
5.7.2	Longitud cuenca.....	40
5.7.3	Factor de forma (Kf).....	40
5.7.4	Coeficiente de compacidad.....	41
5.8	DRENAJE	41
5.8.1	Longitud total de corrientes.....	41
5.8.2	Densidad de drenaje.....	41
5.8.3	Patrón de drenaje sub-cuenca.....	42
5.9	PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL.....	42
5.9.1	Promedio Aritmético.....	43
5.10	Polígonos De Thiessen.....	44
5.11	EVAPORACIÓN MENSUAL.....	46
5.11.1	Balance De Energía.....	46
5.11.2	Evapotranspiración.....	46
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
6.1	DELIMITACIÓN ÁREA DE ESTUDIO.....	48
6.2	MUNICIPIO DE TUNJA	48
6.3	DESCRIPCIÓN FÍSICA	48
6.4	LÍMITES DEL MUNICIPIO	49
6.5	ZONA DE ESTUDIO.....	49
6.6	PLANO DE LOCALIZACIÓN DE SONDEOS.....	50
6.6.1	Ubicación de cárcavas en Tunja con zona de riesgo.....	50
7.	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO Y LOS MODELOS.....	58
7.1	DISEÑO PRELIMINAR	58
7.2	DISEÑO FINAL.....	59

7.3	CONSTRUCCION DEL MODELO	63
7.4	PROCESO CONSTRUCTIVO	63
7.4.1	Instalación de vidrio:.....	65
8.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	67
8.1	MODELOS TIPO 1.....	67
8.2	MODELO TIPO 2.....	72
8.3	MODELO TIPO 3.....	76
8.4	MODELO TIPO 4.....	79
8.5	MODELO TIPO 5.....	85
8.6	CALCULO DE LIMITES DE ATTERBERG	89
9.	CONCLUSIONES	90
10.	RECOMENDACIONES	92
11.	GLOSARIO	93
12.	Bibliografía	104

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Proceso de erosión.....	14
Figura 2. Ensayo de Pinhole.....	19
Figura 3. Características dispersivas y sales disueltas en el agua de poro. SHERARD et. al (1975).....	19
Figura 4. Canal para ensayo de erosión.....	21
Figura 5. Ensayo de erosión por chorro de agua desarrollado en la UIS – Bucaramanga – Colombia.....	22
Figura 6. Mecanismo de erosión por acción del viento.....	23
Figura 7. Erosión por gotas de lluvia.....	24
Figura 8. Proceso de erosión laminar.....	25
Figura 9. Procesos de formación de surcos y cárcavas.....	27
Figura 10. Erosión en la cabeza vertical de una cárcava.....	28
Figura 11. Localización Sub-cuenca Río Jordán.....	31
Figura 12. Ubicación Sub-cuenca en la ciudad de Tunja.....	32
Figura 13. Divisoria de Aguas Sub-cuenca.....	33
Figura 14. Topografía sub-cuenca.....	38
Figura 15. Área y perímetro Sub-cuenca Río Jordán.....	39
Figura 16. Longitud cauce principal.....	40
Figura 17. Patrón de drenaje Pinnado.....	42
Figura 18. Estaciones de trabajo cuenca Río Jordán.....	43
Figura 19. Polígonos de Thiessen.....	44
Figura 20. Localización vereda Pirgua en Boyacá.....	48
Figura 21. Localización general zona de estudio.....	49
Figura 22. Delimitación de la zona de estudio.....	50
Figura 23. Plano de cárcavas en Tunja.....	51
Figura 24. Diseño preliminar de equipo utilizado.....	58
Figura 25. Diseño final modelo reducido a escala.....	59
Figura 26. Vista zona de carga en perfil sin doblez y planta con doblez.....	60
Figura 27. Vista zona de descargas en perfil sin doblez y planta con doblez.....	60
Figura 28. Canal transporte de partículas.....	61

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Dispersividad de acuerdo al ensayo de Pinhole (Sherard 1976).	20
Tabla 2. Erosionabilidad de acuerdo al ensayo de dispersión.	21
Tabla 3. Formas y mecanismos de erosión y obras de estabilización.	30
Tabla 4. Temperatura cuenca Río Jordán	34
Tabla 5. Pendiente media sub-cuenca Río Jordán.	38
Tabla 6. Precipitación promedio aritmética mensual.....	44
Tabla 7. Precipitación mensual Polígonos de Thiessen.....	45
Tabla 8. Evaporación Sub-cuenca Río Jordán.....	46
Tabla 9. Valores de Evapotranspiración mensual mediante Thornthwaite.	47
Tabla 10. Ubicación cárcavas en Tunja.	51
Tabla 11. Datos con los que se ejecuta la toma de datos para el primer modelo ..	69
Tabla 12. Resultado del modelo 1, con precipitación de 60mm/h y pendiente 15%	72
Tabla 13. Datos con los que se ejecuta el segundo modelo	74
Tabla 14. Resultados de la prueba realizada para el modelo tipo 2.	75
Tabla 15. Datos con los que se ejecuta la toma de datos para el Tercer modelo ..	78
Tabla 16. Resultados la prueba del modelo tipo 3.	79
Tabla 17. Datos con los que se ejecuta la toma de datos para el primer modelo ..	81
Tabla 18. Resultado toma de datos modelo 4.....	84
Tabla 17. Datos con los que se ejecuta la toma de datos para el primer modelo ..	86
Tabla 18. Resultado toma de datos modelo 4.....	88

LISTA DE FOTOGRAFIAS

	Pág.
Fotografía 1. Erosión en surcos.....	26
Fotografía 2. Doble calzada Bogotá-Sogamoso k 14+800 evidencia de erosión en masa.....	29
Fotografía 3. Perdida de zona urbana por problemas erosivos barrio el milagro...	53
Fotografía 4. Presencia erosión laminar y pérdida de vegetación barrio Asís	53
Fotografía 5. Se evidencia perdida de material en masa debido a erosión por lluvia.	54
Fotografía 6. Presencia de surcos en la doble calzada Bogotá- Sogamoso ubicada k 14+300.....	54
Fotografía 7. Problemas de remoción en masa doble calzada Bogotá- Sogamoso entrada del relleno.	55
Fotografía 8. Formación de cárcava en la doble calzada - Sogamoso ubicada k 14+600.....	55
Fotografía 9. Medida de control en procesos erosivos	56
Fotografía 10. La erosión por lluvia causo perdida de capa vegetal variante Bogotá- Sogamoso k 14+280	56
Fotografía 11. Proceso erosivo por tubificación vía Bogotá Sogamoso a 200metros del relleno sanitario.....	57
Fotografía 12. Sistema de precipitación.....	62
Fotografía 13. Pluviómetro utilizado para medir la precipitación en el modelo	63
Fotografía 14. Corte y soldadura para adecuación de la base.	64
Fotografía 15. Corte y soldadura para adecuación de la base.	65
Fotografía 16. Chasis con una pendiente de 45°	65
Fotografía 17. Vidrio de seguridad utilizado para simular un canal transportador de partículas.	66
Fotografía 18. Construcción de zona de carga	66
Fotografía 19. Funcionamiento gato hidráulico en el modelo reducido	66
Fotografía 20. Maceración de material utilizado en el modelo.	67
Fotografía 21. Se toma el peso de todo el material instalado en la zona de carga.	68
Fotografía 22. Instalación y Compactación de material capa de 3 cm.....	68
Fotografía 23. Calibración e instalación de precipitación con el pluviómetro	69
Fotografía 24. Toma de densidad en el material instalado en el modelo.	70
Fotografía 25. Calibración para toma de muestras del modelo 1.....	70
Fotografía 26. Registro de precipitación por medio del pluviómetro realizado para el modelo 1.	71
Fotografía 27. Pequeñas socavaciones ´por gotas de lluvia.....	71
Fotografía 28. Material erosionado con una pendiente del 15% y precipitación de 60mm/h.....	72
Fotografía 29. Modelo tipo 2 con una pendiente 25%.....	73

Fotografía 30. Sistema de lluvia modelo tipo 2 con una pendiente 25%.....	73
Fotografía 31. Verificación y Calibración de la precipitación modelo 2	74
Fotografía 32. Modelación de la segunda prueba.....	75
Fotografía 33. Modelo tipo 3 pendiente 45% y 60 mm/hora de precipitación.	76
Fotografía 34. Verificación y calibración de la precipitación modelo tipo 3	77
Fotografía 35 . Toma de pruebas modelo tipo 3	77
Fotografía 36. Modelación tercera prueba.	78
Fotografía 37. Realización prueba en el modelo 3.....	79
Fotografía 38. Instalación de material en forma de cárcava prueba modelo 3	80
Fotografía 39. Peso de todo el material instalado en la zona de carga.	80
Fotografía 40. Calibración e instalación de precipitación con el pluviómetro	81
Fotografía 41. Toma de densidad en el material instalado en el modelo.	82
Fotografía 42. Calibración para toma de muestras del modelo 4.....	82
Fotografía 43. Toma de lluvia por medio del pluviómetro. Realizado para el modelo 3.....	83
Fotografía 44. Pequeñas socavaciones ´por gotas de lluvia.....	83
Fotografía 45. Material erosionado con una pendiente del 15% y precipitación de 120mm/h.....	84
Fotografía 46. Calibración pendiente y precipitación modelo 5.	85
Fotografía 47. Instalación de material en forma de cárcava prueba modelo 3	85
Fotografía 49. Calibración e instalación de precipitación con el pluviómetro	86
Fotografía 50. Toma de densidad en el material instalado en el modelo.	86
Fotografía 51. Calibración para toma de muestras del modelo 4.....	87
Fotografía 52. Toma de lluvia por medio del pluviómetro. Realizado para el modelo 3.....	87
Fotografía 53. Pequeñas socavaciones ´por gotas de lluvia.....	88
Fotografía 54. Material erosionado con una pendiente del 15% y precipitación de 120mm/h.....	89

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Topografía cuenca rio Jordán	96
Anexo 2 . Localización zona de estudio	97
Anexo 3. Localización zona de estudio en cuenca alta del chicamocho.....	98
Anexo 4.sub cuenca rio Jordán Anexo 5.estaciones de precipitación. Anexo 6. Hidrografía de la zona de estudioAnexo 7. Polígonos de Thiesen	99
Anexo 5. Plano geológico de Boyacá	103

1. INTRODUCCIÓN

En ciertos tipos de suelos los procesos erosivos causan desaparición acelerada del suelo. Dependiendo de las características geotécnicas y de precipitación se puede dar origen a la presencia de la cárcavas; deteriorando las condiciones de estabilidad de algunas zonas.

Existen estudios para el control de erosión en donde la mayoría son ensayos realizados en campo. Sin embargo no existen estudios específicos para el análisis de pérdida de suelo en las cárcavas de la ciudad en el sector de pigua. Sin embargo para la presente investigación se tuvo en cuenta la utilización de muestras en la zona noroccidental.

Teniendo presente los procesos erosivos que se han generado en la formación Tilata (Tst) a problemas de carcavamiento; se pretende realizar una evaluación de la pérdida de suelo; causado por factores como la precipitación y las condiciones topográficas de la zona. Por tal motivo es necesario estudiar la relación entre el fenómeno de la erosión del suelo y el tipo de material encontrado en la formación Tilata (Tst) en la vereda Pigua en la zona Noroccidental. Para tal fin se propuso como objetivo crear un prototipo original tipo canal; en dimensiones reducidas; en el cual se pueda modelar este fenómeno controlando variables como la precipitación y la pendiente del modelo. Se espera obtener de los modelos resultados que permitan conocer la tasa de pérdida del material ajustando lo más posible a las condiciones reales que pueden presentarse en una cárcava.

La tasa de pérdida del material depende de diversas variables como precipitación, viento, tempera, características del suelo, morfología de terreno dependiendo del talud, orientación Pendiente, longitud además del uso del suelo; sin embargo solo se tendrán en cuenta para los modelos las condiciones climáticas, como topografía y geológicas que se considera son las más representativas. Por tal motivo la investigación se realiza con los alcances mencionados con el fin de representar datos aproximados a la realidad.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Evaluar el fenómeno de erosión; mediante la construcción de un modelo reducido para suelos arcillosos de la formación Tilata de la ciudad de Tunja en el sector de Pírgua zona Noroccidental.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ✓ Diseñar y construir un dispositivo en forma de canal; en el cual se modelará la pérdida de suelo por procesos erosivos en las arcillas encontradas en inmediaciones de la vereda de Pírgua de la ciudad de Tunja zona Noroccidental.
- ✓ Realizar una evaluación de la pérdida de suelo; generado por efecto de la precipitación en suelos arcillosos de la formación mencionada.
- ✓ Calcular la cantidad de material erosionado en función de valores de precipitación y pendiente del modelo.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Surge la necesidad de contar con métodos para medir la tasa de pérdida del suelo en la formación Tilata (Tst) de la ciudad de Tunja; causado por problemas erosivos. Los factores climáticos causan pérdida de suelo en gran magnitud lo cual afecta la estabilidad de la formación. El volumen de pérdida del material causado por procesos erosivos no se conoce y por lo tanto se hace necesario investigar en este campo.

Aumenta el interés de diseñar y construir un prototipo el cual genere en forma más precisa los datos acerca de la tasa de pérdida de suelo. El modelo reducido identifica cómo es el comportamiento de un suelo cuando se producen cambios climatológicos. Los procesos erosivos han originado gran cantidad de problemas sociales y ambientales en las zonas donde se encuentran las cárcavas. Causando en los pobladores un alto índice de afectación y perjudicado su hábitat. Por este motivo y ante la necesidad de brindar aportes a la comunidad investigativa de la universidad se pretende realizar la investigación.

4. ESTADO DEL ARTE

La erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento (Figura 1); puede ser generada por agua como por el viento.

Como regla general las regiones con suelos muy erosionables, pendiente alta, clima seco y fuertes vientos pero con lluvias intensas ocasionales, sufren las mayores pérdidas por erosión. Las actividades humanas frecuentemente intensifican o aceleran la rata de erosión, especialmente por la deforestación o la remoción de la capa vegetal, así como por la concentración de la escorrentía en forma artificial. De los totales de erosión que se producen en el mundo cerca de 1/4 a 1/3 de los sedimentos se transportan hasta el mar y los demás se depositan en los planos de inundación, los canales de los ríos, los lagos y los embalses. (DIAZ, 2001)

La erosión es tal vez el factor más importante de contaminación del agua en cuanto a volúmenes de contaminantes se refiere.

La erosión según Ayres (1960), depende de cuatro variables principales:

$$E = f (R.G. S.V)$$

E = Rata de erosión

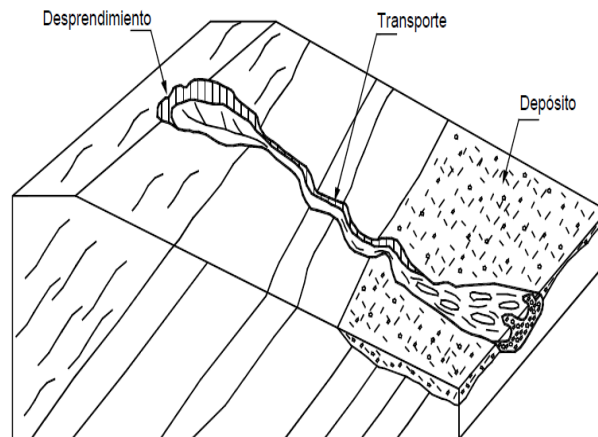
R = Factor que depende de la cantidad e intensidad de la lluvia

G = Factor que depende de la pendiente y topografía del terreno

S = Factor que depende de las propiedades físicas y químicas del suelo

V = Factor que depende de las características de la cobertura vegetal.

Figura 1 Proceso de erosión.



Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

4.1 EROSIONABILIDAD.

El problema de la erosión no depende de un corte profundo sino de fuerzas en la superficie del suelo; la influencia de la geometría y la localización de las partículas tienen gran participación en la pérdida del material. Las partículas en la superficie están expuestas a fuerzas netas menores que las que están debajo y cuando existe orientación de la partícula, la erosión es mucho menor. La iniciación del movimiento de una partícula de suelo debido a la acción hidráulica se define como el instante en el cual las fuerzas generadas por el fluido arrancan y levantan la partícula produciendo su movimiento, excediéndose por lo tanto la fuerza estabilizante debida a la gravedad y las fuerzas de fricción y cohesión.

Los fenómenos son diferentes para suelos granulares y para suelos cohesivos. (DIAZ, 2001)

4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA EROSIONABILIDAD.

La erosionabilidad depende de las propiedades del suelo y del agua. Agena y Saad (1995) cuantifican la erosionabilidad por medio de tres factores:

- Dispersión de las arcillas
- Erosión propiamente dicha.
- Granulometría del suelo.

Vanoni expresa que los factores básicos que definen la erosionabilidad de un suelo son 2 tipos diferentes de fuerzas que son (diagrama 1):

- las fuerzas activas
- las fuerzas pasivas

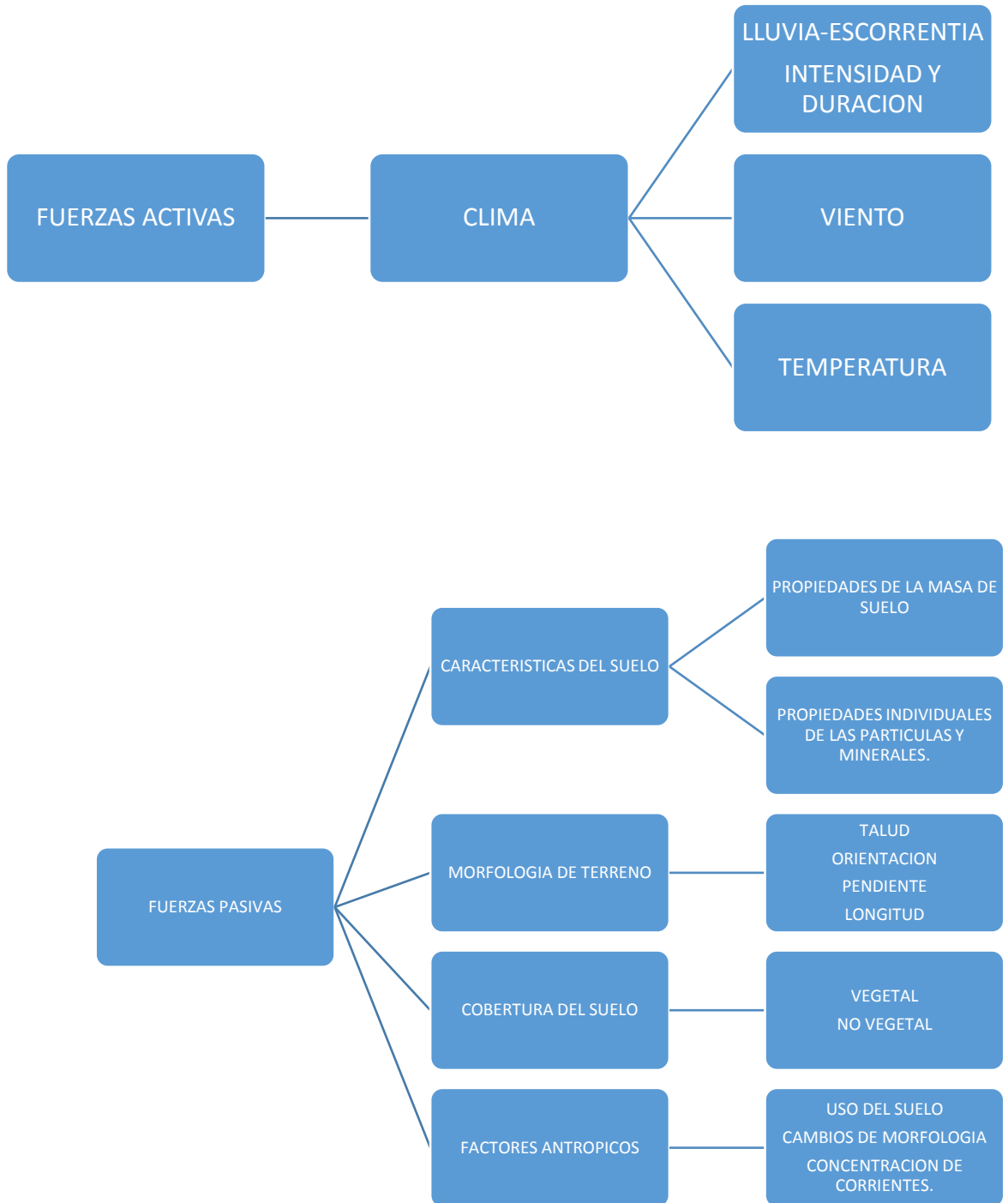
Para arenas y gravas las fuerzas que resisten el movimiento son causadas principalmente por el peso propio de las partículas. Los suelos finos (arcillosos) en cambio deben ésta fuerza generalmente a la cohesión.

En el siguiente diagrama se observar como los distintos factores y los más relevantes en la erosión en suelos.

4.2.1 Erosionabilidad en suelos cohesivos.

El conocimiento físico de la forma como ocurre la erosión en suelos cohesivos es muy limitado y no existen modelos racionales capaces de cuantificar las ratas de erosión en ellos. Los sedimentos producto de la erosión de suelos cohesivos son transportados principalmente en suspensión y afectan en forma significativa la calidad del agua.

Diagrama 1. Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión de los taludes y laderas.



Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

La erosionabilidad y el tipo de arcilla. La erosión ocurre cuando las partículas de arcilla entran en suspensión en la corriente de agua. La mayoría de las fallas importantes de taludes por erosión han ocurrido en arcillas con baja a mediana plasticidad (CL y CL-CH) que contienen algo de Montmorillonita.

La erosionabilidad depende principalmente de las características de la estructura incluyendo la presencia de arenas, limos, la mineralogía de las arcillas (en especial la presencia de Montmorillonita o illita, así sea en pequeñas cantidades) y la presencia de iones intercambiables.

El origen mineralógico de la arcilla especifica el grado de actividad de una arcilla. Las Kaolinitas son relativamente inactivas y muestran poca habilidad para absorber agua y expandirse. Las arcillas de tres capas muestran gran actividad superficial debido a la gran substitución isomorfa y la gran habilidad para absorber aguas, especialmente las Montmorillonitas; las Illitas presentan mayores fuerzas de atracción entre las partículas debidas a los iones de K presentes y su potencial de expansión es reducido. La facilidad de expansión trae como consecuencia una mayor susceptibilidad a la erosión.

En los últimos años se ha logrado entender muy claramente que hay cierto tipo de arcillas que son muy erosionables. (DIAZ, 2001)

4.2.2 El porcentaje de arcilla.

Grissinger encontró que al aumentar el porcentaje de arcilla en un suelo, la erosionabilidad disminuye, con la excepción de la Montmorillonita cálcica. Esta excepción se debe posiblemente a los paquetes de partículas que se forman en las arcillas cálcicas, las cuales son comunes en ambientes tropicales.

Los suelos con altos porcentajes de arenas tienden a ser no cohesivos y fácilmente erosionables y aquellos con altos porcentajes de arcillas son cohesivos y resisten la separación de las partículas, sin embargo, una vez separadas éstas son llevadas muy fácilmente por el agua debido a su tamaño minúsculo. Sin embargo, el solo hecho de la presencia de un tipo de arcilla dispersiva independientemente del porcentaje es un factor determinante en la erosionabilidad del suelo. (DIAZ, 2001)

4.3 ENSAYOS DE EROSIONABILIDAD.

Para identificar los suelos erosionables se emplean varios métodos de ensayo muy conocidos los cuales son los siguientes:

4.3.1 Ensayo de caída simple de agua.

El agua cae sobre una muestra de suelo y el agua y los productos de erosión son recogidos en un recipiente. Se hace un análisis cuantitativo basado en el grado de lodosidad.

4.3.2 Ensayo de desmoronamiento (Crumb test).

Este ensayo fue desarrollado por Emerson (1964). Una muestra de suelo se coloca en agua y se observa cualitativamente en forma visual, si se forma una nube de partículas coloidales alrededor de la muestra. La presencia de esta nube es una evidencia de que el suelo es dispersivo.

Este ensayo no produce resultados confiables en suelos dispersivos en los cuales la arcilla predominante es la Kaolinita. El uso de una solución de NaOH como medio dispersivo aumenta la posibilidad de detectar un suelo dispersivo, pero puede ocurrir que un suelo no dispersivo se clasifique como dispersivo.

4.3.3 Ensayos químicos: ESP Y S.A.R.

La concentración de iones se determina y se correlaciona con tablas o figuras, tales como la de Sherard.

4.3.4 Ensayo de Pinhole.

Fue desarrollado para una medida directa de la erosionabilidad de los suelos de grano fino compactados y consiste en hacer fluir agua a través de un pequeño agujero en un espécimen de suelo donde el flujo de agua a través del Pinhole simula el flujo del agua a través de una grieta u otra estructura. Un agujero del 1 mm de diámetro es introducido o taladrado a través de un espécimen de suelo cilíndrico de 25 mm de largo por 35 mm de diámetro.

Las cargas de 50, 180 y 380 mm resultan en flujos con velocidades de rangos Aproximadamente de 30 a 160 cm/s y con gradientes hidráulicos en rangos aproximadamente desde 2 a 15. El ensayo fue desarrollado por Sherard et al (1976) y en pocos años se ha convertido en un ensayo físico ampliamente usado. Es importante que el ensayo sea hecho sobre suelo con contenido de humedad natural, porque secándolo podría afectar los resultados. Si el material contiene partículas gruesas de arena o grava, éstas deben ser eliminadas tamizando la muestra a través del tamiz de 2 mm (Nº 10). El contenido de humedad natural debe ser determinado y el contenido de agua deseado para la compactación debe alcanzarse agregando la cantidad de agua requerida (o gradualmente secándolo al aire, si está demasiado mojado. Ver Figura 2 (JOSE LUIS HERNANDEZ TOVAR, 2012).

También se emplean ensayos químicos que determinan los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio en la estructura de la arcilla y en el agua de poro del suelo. El porcentaje de sodio con respecto a los demás cationes indica el potencial dispersivo de la arcilla. La literatura internacional a optado por correlacionar las

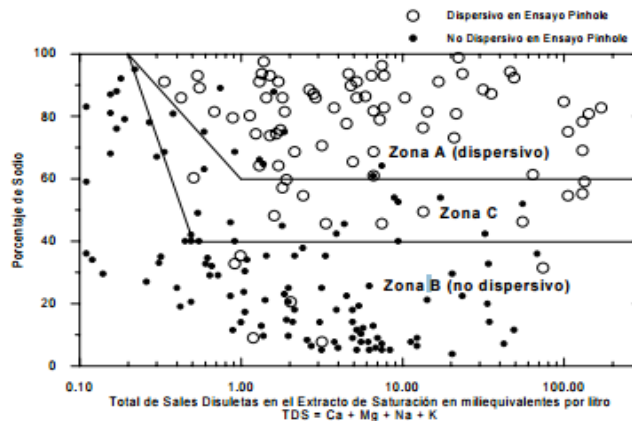
características dispersivas con análisis químicos efectuados en el agua de poro del suelo, determinando el porcentaje de sodio con respecto al total de sales disueltas. A partir de estos valores, y basados en resultados de ensayos Pinhole, SHERARD et.al (1975) elaboraron la Figura N° 1 y establecieron tres zonas. La Zona A, con altos valores de % Na corresponde a suelos dispersivos, la Zona B, con bajos valores de % Na corresponde a suelos no dispersivos, y la Zona C es definida como transición. Figura 3 (J. ALMOROX ALONSO, 2010)

Figura 2. Ensayo de Pinhole.



Fuente: TOVAR & GRANADOS N. 2012. Tesis UIS, Bucaramanga Santander

Figura 3. Características dispersivas y sales disueltas en el agua de poro. SHERARD et. al (1975).



Fuente: Identificación de Arcillas Erodibles Dispersivas Utilizando Ensayos Agronómicos de Suelos. Sotelo. Rubén Rafael.

El ensayo puede ser realizado para varios niveles de cabeza de agua y se puede clasificar como suelo dispersivo (D1, D2), suelo intermedio (ND4, ND3) suelo no disperso (ND2, ND1) de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1. Dispersividad de acuerdo al ensayo de Pinhole (Sherard 1976).

Categoría de dispersión	Clasificación	Descripción de los resultados del ensayo.
Suelo dispersivo	D1	Falla rápidamente con una cabeza de 2 pulgadas
	D2	Falla menos rápidamente con una cabeza de 2 pulgadas
Suelo intermedio	ND4	Falla lentamente con una cabeza de 2 pulgadas
	ND3	Falla lentamente con una cabeza de 7 pulgadas o ligeramente con una cabeza de 15 pulgadas.
Suelo no dispersivo	ND2	Erosión ligera con cabeza de 15 a 40 pulgadas (no ocurre erosión coloidal).
	ND1	No ocurre erosión con cabeza de 40 pulgadas

Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

4.3.5 Ensayo de flujo en canal.

Se hace pasar agua sobre un canal de suelo en el laboratorio y se observa el comportamiento (Figura 4). Se han desarrollado varios sistemas para medirla fuerza tractiva al flujo en un canal abierto. La fuerza tractiva es la fuerza tangencial por unidad de área que se aplica sobre la superficie del canal. Cada material tiene una fuerza tractiva máxima a la cual se produce erosión.

El sistema de fuerza tractiva se ha popularizado mucho en los últimos años y se han desarrollado equipos capaces de determinar este parámetro para diferentes suelos y para diferentes materiales de control de erosión.

Se observa el diseño de un canal en el cual pasara cierto caudal simulando condiciones reales en el terreno; para así poder medir la fuerza tractiva que se presenta al entrar en contacto el suelo con un fluido. (DIAZ, 2001)

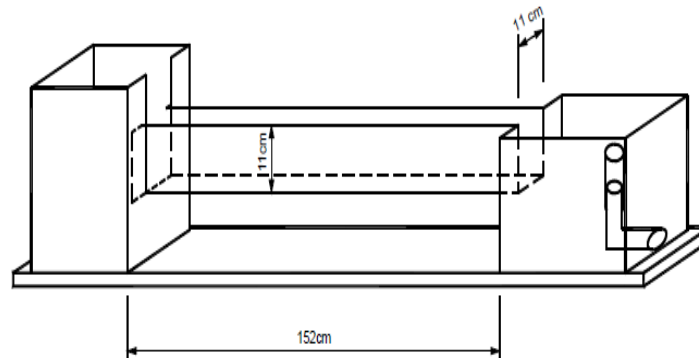
4.3.6 Ensayo de luz ultravioleta.

Se mezcla Acetato de Uranio y Zinc con una morona de suelo y se observa la fluorescencia con luz ultravioleta, la cual revela la presencia de sodio.

4.3.7 Ensayo de dispersión (Soil Conservation Service).

El porcentaje de partículas menores de cinco mm se determina en dos ensayos de hidrómetro. El primero con un agente dispersante en la solución y el segundo sin dispersante. Entre mayor sea la relación de partículas menores de cinco mm sin dispersante, la probabilidad de erosión es mayor. Estos porcentajes se expresan dependiendo de la tabla 2.

Figura 4. Canal para ensayo de erosión.



Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

Tabla 2. Erosionabilidad de acuerdo al ensayo de dispersión.

Porcentaje de Dispersión	Probabilidad de erosión
20 a 25%	Erosión Mediana
25 a 50%	Erosión Alta
Más de 50%	Erosión muy Alta

Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

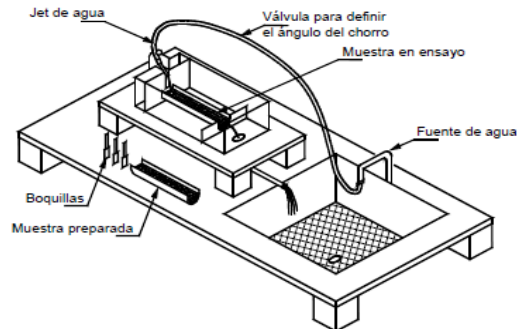
$$\text{PORCENTAJE DE DISPERSION} = \frac{\text{Porcentaje partículas de 5mm sin dispersante}}{\text{Porcentaje partículas menores de 5mm con dispersante}} * 100$$

4.3.8 Ensayo de erosión por chorro de agua

Este ensayo desarrollado por el ingeniero colombiano Jaime Suarez Díaz, consiste en la colocación de un jet de agua con una boquilla a un determinado ángulo sobre una muestra de suelo (Figura 5). Se mide el volumen de suelo erosionado durante un determinado tiempo.

El ensayo permite utilizar tres boquillas, tres ángulos de incidencia del chorro y una gama de caudales de agua, los cuales se controlan midiendo la presión de agua antes de la boquilla. De acuerdo al tipo de flujo en el campo se determina la boquilla, el ángulo de incidencia y la presión de agua.

Figura 5. Ensayo de erosión por chorro de agua desarrollado en la UIS – Bucaramanga – Colombia.



Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

4.4 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS SENSITIVAS A LA EROSIÓN.

Para la construcción de obras de infraestructura, urbanizaciones, vías, oleoductos etc., se requiere identificar las áreas sensitivas a la erosión para objeto de la planeación de las obras y para el diseño de las obras de control. La geología y el comportamiento histórico de cada formación permiten en la primera instancia detectar las áreas más complejas, tanto para erosión como para sedimentación; posteriormente se deben hacer sondeos con toma de muestras y ensayos de laboratorio para determinar la erosionabilidad.

4.5 TIPOS DE EROSION.

La erosión es el resultado de la acción de las fuerzas de fricción de gases o fluidos en movimiento. Se conocen varios tipos de erosión así:

4.5.1 Erosión por el viento.

Es desgaste que puedes sufrir las rocas o bien a la remoción del suelo por parte del viento. El viento, aunque no lo parezca, puede actuar como un remodelado del relieve y es capaz de llevar grandes cantidades de polvo de un punto del planeta Tierra a otro, aunque los granos de arena pueden ser llevados solamente a pequeñas distancias.

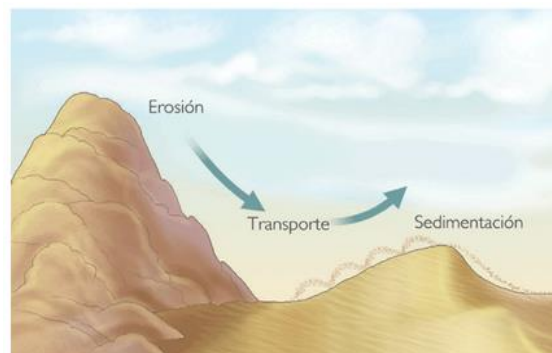
Entre las partículas de la arena, el mineral más abundante que encontraremos es el cuarzo. El cuarzo suele ser resistente a la meteorización química, también a la

disolución y a la abrasión, o sea que la erosión eólica refiere al viento y a la arenilla que se puede encontrar en la tierra, pero no a la arena en sí.

El viento es capaz de actuar como un agente de erosión, pero esto depende en parte de lo que trate de erosionar. No tiene problemas para levantar y transportar partículas de tierra, pero ya encuentra frente a un desafío cuando se topa con una roca dura, a la cual no le podrá hacer más que unos pequeños inapreciables ya que la fuerza cohesiva de la roca serán mayores que la fuerza del viento. (Juan José Ibáñez el, 2008)

En la figura 6. Se presenta el mecanismo de erosión por acción del viento, al presentarse vientos y estar el suelo susceptible a él. El suelo es arrastrado de tres maneras distintas (suspensión, saltación, movimiento superficial). La suspensión se presenta cuando el suelo es demasiado fino y este puede levantarse con gran facilidad por el viento y es movido por largas distancias. La saltación es notoria en partículas un poco más grandes las cuales son levantadas por el viento pero en distancias más cortas y por último el movimiento superficial que es cuando la fuerza ejercida por el viento no alcanza a ser levantadas las partículas de suelo sino solo las mueve a distintas distancias. (J. ALMOROX ALONSO, 2010)

Figura 6. Mecanismo de erosión por acción del viento.



Fuente: www.madrimasd.org

Los factores más importantes son la humedad y la temperatura. Solamente los suelos secos son susceptibles a erosión por el viento.

El viento puede recoger y cargar partículas en suspensión de suelos secos con partículas de tamaño menor a 0.1 mm o sea limos o arenas muy finas.

La erosión por el viento consiste de tres fases distintas:

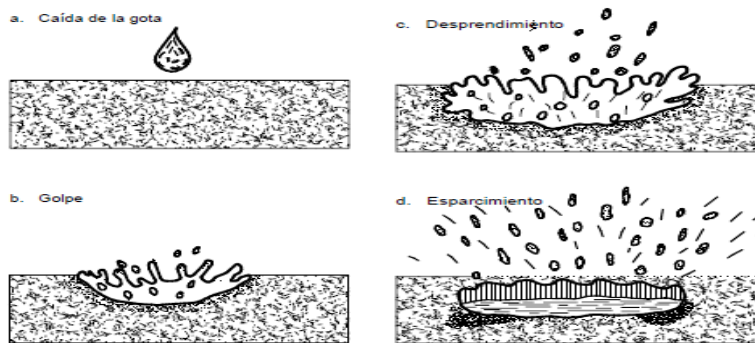
- **Desprendimiento:** El movimiento del suelo por acción del viento es un resultado de la turbulencia de la velocidad. La velocidad requerida al iniciar el movimiento aumenta, al aumentar el tamaño de las partículas. Para la mayoría de los suelos esta velocidad es de aproximadamente 20 km/h a una altura de 30 centímetros por encima de la superficie.

- **Transporte:** La velocidad requerida para el transporte de las partículas una vez se inició es menos que la requerida para el desprendimiento. La mayor parte de las partículas del suelo se transportan cerca de la superficie de la tierra a una altura no mayor a 1.0 metro. Aproximadamente 62 al 97% del total de las partículas es transportado en esta zona cerca de la superficie. Este hecho sugiere la utilidad de instalar barreras bajas o rompedoras de viento para impedir el movimiento de estas partículas.
- **Depósito:** Al disminuir la velocidad del viento o al encontrarse las partículas con una barrera estas caen o se sedimentan por acción de las fuerzas de gravedad.

4.5.2 Erosión por gotas de lluvia.

Ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo. Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas luego son transportadas por la escorrentía. Al caer una gota de lluvia levanta partículas de suelo y las reparte en un área de aproximadamente un metro cuadrado. Parte de la lluvia se infiltra y la otra fluye sobre la superficie. (DIAZ, 2001)

Figura 7. Erosión por gotas de lluvia



Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

En la Figura 7 se observa el proceso de erosión por una gota de lluvia así:

- ✓ la caída de gota de agua que es notoria en las precipitaciones.
- ✓ Golpe. Cuando el agua penetra la estructura del suelo.
- ✓ Desprendimiento: cuando la estructura del suelo es modificada y algunas partículas del suelo son soltadas de la estructura original.
- ✓ Esparcimiento: las partículas sueltas son lanzadas junto con el agua a distintas partes.

La erosión por golpeo de la lluvia (Splash erosión) ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el

desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo. Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas. Estas partículas son luego transportadas por la escorrentía. Al caer una gota de lluvia levanta partículas de suelo y las reparte en un área de aproximadamente un metro cuadrado. Parte de la lluvia se infiltra y parte fluye sobre la superficie.

4.5.3 Tamaño y velocidad de las gotas de lluvia.

El tamaño de las partículas de lluvia varía de 0.5 a 5 mm de diámetro, de acuerdo a la intensidad de la lluvia (Figura 6). Durante una lluvia las gotas son de diferentes tamaños. La velocidad de las partículas de lluvia puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$v_t = 3.86d_r^{0.67}$$

Dónde:

v_t = Velocidad en metros / segundo.

d_r = Diámetro en milímetros

La velocidad de las gotas varía generalmente de 3 a 10 metros por segundo.

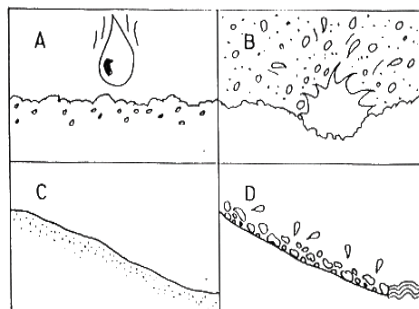
Con el tamaño y velocidad de las gotas puede calcularse la energía cinética, la cual es generalmente superior a la de una escorrentía normal.

La lluvia es en sí entonces la fuente más importante de erosión, medida en volumen de suelo desprendido. Cuando el terreno tiene pendiente de más del dos por ciento se forman pequeños surcos y en pendientes menores la erosión es laminar por la acción de la escorrentía que transporta el suelo desprendido por la lluvia. (DIAZ, 2001)

4.5.4 Erosión laminar.

Es debida al impacto de la gota de lluvia y al posterior transporte del suelo, disgregado por el flujo superficial o poco profundo y homogéneo. Pueden ser síntomas la existencia de plantas con raíces al descubierto y la abundancia de fragmentos rocosos en la superficie. La erosión laminar y en surcos son muy peligrosos Y difícilmente controlables. Ver figura 8 (J. ALMOROX ALONSO, 2010)

Figura 8. Proceso de erosión laminar.

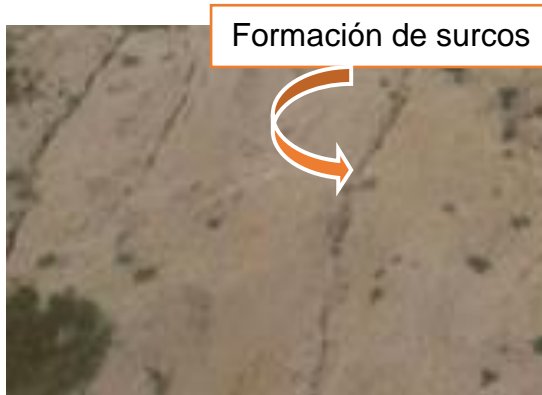


Fuente: www.verdezona.blogspot.com/

4.5.5 Erosión en surcos.

La concentración del flujo en pequeños canales o rugosidades hace que se profundicen estos pequeños canales formando una serie de surcos generalmente semiparalelos. Fotografía 1 se presencia la formación de surcos por erosión en los taludes de la formación Tilata de la ciudad de Tunja, que inicia desde la parte superior del talud y va aumentando hasta llegar al punto más bajo del terreno.

Fotografía 1. Erosión en surcos.



Fuente. El Autor.

En la Fotografía anterior la erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie. Al concentrarse el flujo en pequeñas corrientes sobre una pendiente, se genera una concentración del flujo el cual por la fuerza tractiva de la corriente produce erosión, formándose pequeños surcos o canales, los cuales inicialmente son prácticamente imperceptibles pero poco a poco se van volviendo más profundos. En estos surcos la energía del agua en movimiento adquiere cada vez, una fuerza mayor capaz de desprender y transportar partículas de suelo. Inicialmente, los pequeños canales presentan una forma en V la cual puede pasar a forma en U.

La erosión en surcos es la causante del mayor porcentaje de producción de sedimentos sobre la superficie de la tierra. La mayor parte del volumen total de sedimentos transportados por procesos erosivos ocurre en forma de surcos, después de la acción del golpeo de la lluvia. La acción de golpes de la lluvia y el flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente, forma inicialmente microsurdos de erosión y a medida que la longitud de flujo es mayor los surcos se hacen más profundos y de menor densidad por una unidad de área.

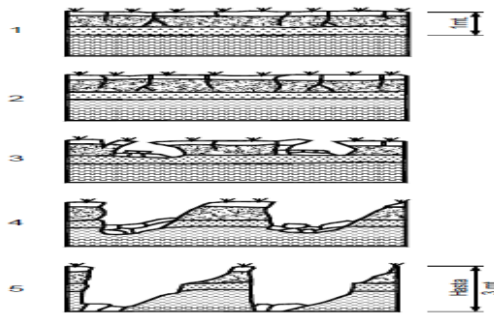
Cuando los surcos se hacen más profundos y más anchos se dice que los surcos se convirtieron en cárcavas. Si los canales de erosión tienen profundidades de menos de 30 centímetros se les clasifica como surcos y si la profundidad es

mayor, como cárcavas. Los surcos pueden eliminarse con rastrillado y siembra de vegetación. Las cárcavas requieren de obras más complejas de ingeniería.

En la figura 9 se evidencia el proceso de formación de surcos en 5 pasos:

- El terreno con pequeñas infiltraciones en él.
- Infiltraciones de agua cada vez más profundas y en forma paralela.
- Pérdida de material a causa de la infiltración de agua en el suelo, descascaramiento de la parte superior del suelo. Pasa de ser llamada erosión por surcos a cárcavas.
- Erosión por cárcavas profundas.
- Si la profundidad entre el nivel superior y el fondo del surco es superior a 30 cm ya es llamado cárcava. (DIAZ, 2001)

Figura 9. Procesos de formación de surcos y cárcavas.



Fuente: [http:// www.ecoambientes.tripod.com](http://www.ecoambientes.tripod.com)

4.5.6 Erosión por afloramiento de agua.

El agua subterránea al aflorar a la superficie puede desprender las partículas de suelos sub-superficial formando cárcavas o cavernas.

4.5.7 Erosión interna.

El flujo de agua a través del suelo puede transportar partículas formando cavernas internas dentro de la tierra.

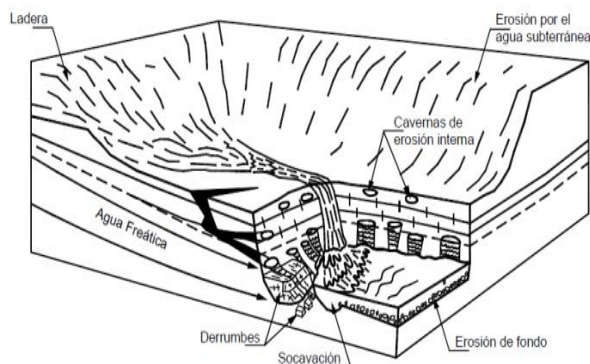
4.5.8 Erosión en cárcavas.

Los surcos pueden profundizarse formando canales profundos o la concentración en un sitio determinado de una corriente de agua importante puede generar canales largos y profundos llamados cárcavas. Una vez se inicie la cárcava es muy difícil de suspender el proceso erosivo.

Los procesos más importantes en el crecimiento de una cárcava son:

- Profundización del fondo de la cárcava. El fondo de la cárcava se va profundizando en forma continua o discontinua. El proceso continúa hasta que se logra una pendiente de equilibrio o aparece un manto profundo más resistente a la erosión.
- Avance lateral. Al profundizarse el fondo de la cárcava esta se amplía por la inestabilidad geotécnica de los taludes laterales.
- Erosión acelerada concentrada en los sitios de cambio topográfico en el fondo de la cárcava. En los cambios de pendiente la turbulencia y la fuerza concentrada de la corriente de agua acelera localmente el proceso de erosión y socavación. Los procesos de turbulencia pueden modelarse hidráulicamente; Sin embargo, es extraordinariamente difícil determinar para cada caso específico el mecanismo de turbulencia que va a actuar. El modelamiento hidráulico de cárcavas es muy complejo.
- Avance de la cabeza de Cárcava. El avance más dramático es comúnmente el avance de la cárcava hacia arriba de la pendiente, aumentándose permanentemente la altura del escarpe vertical entre la corona y la cabeza (Figura 10). Entre más alto es el escarpe, la inestabilidad es mayor y la cárcava avanza a una mayor velocidad. El afloramiento de agua en las paredes o pies de los taludes de la cárcava es un factor muy importante en el avance tanto lateral como aguas arriba en el proceso de erosión. Al encontrar corrientes de agua subterránea se aumenta a su vez el proceso de inestabilidad del escarpe y la rata de avance de la cárcava. (DIAZ, 2001)

Figura 10. Erosión en la cabeza vertical de una cárcava.



Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

Erosión laminar y en surcos. Dentro de las cárcavas se pueden producir procesos de erosión laminar o erosión en surcos, debidos especialmente al impacto de las gotas de lluvia y la esorrentía difusa.

4.5.9 Erosión en masa (deslizamientos).

El término erosión o remoción en masa se relaciona a movimientos de masas importantes de suelo conocido con el nombre genérico de deslizamientos.

Dentro de los diversos tipos de movimiento del suelo en taludes y laderas algunos están íntimamente relacionados con los procesos típicos de erosión. Entre ellos se indican los siguientes:

- Reptación
- Flujos de tierra
- Avalanchas

Fotografía 2. Doble calzada Bogotá-Sogamoso k 14+800 evidencia de erosión en masa.



Fuente: el autor

4.6 Estabilización.

Se debe tener en cuenta que los problemas de erosión generalmente obedecen a fenómenos los cuales deben analizarse, y obtenerse parámetros para realizar el diseño. Se implementan distintas prácticas de conservación de suelos, estas integran técnicas que pueden ser sencillas si son aplicadas cuando el proceso de carcamamiento es en una edad temprana ya si es en una edad más avanzada es necesarias practicas un poco más complejas para la estabilización y/o mejoramiento de este suelo.

Para la estabilización del fenómeno de erosión existen varios mecanismos que son útiles para minimizar este efecto, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Formas y mecanismos de erosión y obras de estabilización.

Elemento erosionante	Forma	Mecanismo	Obras de estabilización
Gotas de lluvia	Semilaminar	Golpeo desprendimiento y esparcimiento.	Cobertura vegetal de altura media y baja, revestimientos tratamiento químico, impermeabilización.
Escorrentía	Semilaminar (difusa)	Desprendimiento y transporte a lo largo de canales intermitentes con Avance hacia arriba.	Cobertura vegetal, canales, recubrimiento con suelos Resistentes.
	En surcos	Desprendimiento y transporte a lo largo de canales intermitentes con Avance hacia arriba.	Recubrimientos diversos, Cobertura vegetal, barreras, canaletas.
	En cárcavas	Desprendimiento, turbulencia en canales intermitentes con avance hacia arriba.	Recubrimientos diversos, trinchos, muros, barreras, canaletas, lavaderos, bioingeniería y Biotecnología.
Agua quieta Impermeabilización o en movimiento	Disolución	Los componentes químicos solubles en agua son disueltos por el agua	Impermeabilización
	Dispersión	Desmoronamiento o separación de las partículas saturadas.	Impermeabilización, geotextiles, recubrimientos.
Afloramiento de agua	Cárcavas en Taludes	El gradiente hidráulico del afloramiento desprende el suelo en Cáscaras o flujo.	Drenes de pantalla, subdrenes de penetración, biotecnología

Fuente: Control de erosión zonas tropicales; JAIME SUAREZ DIAZ.

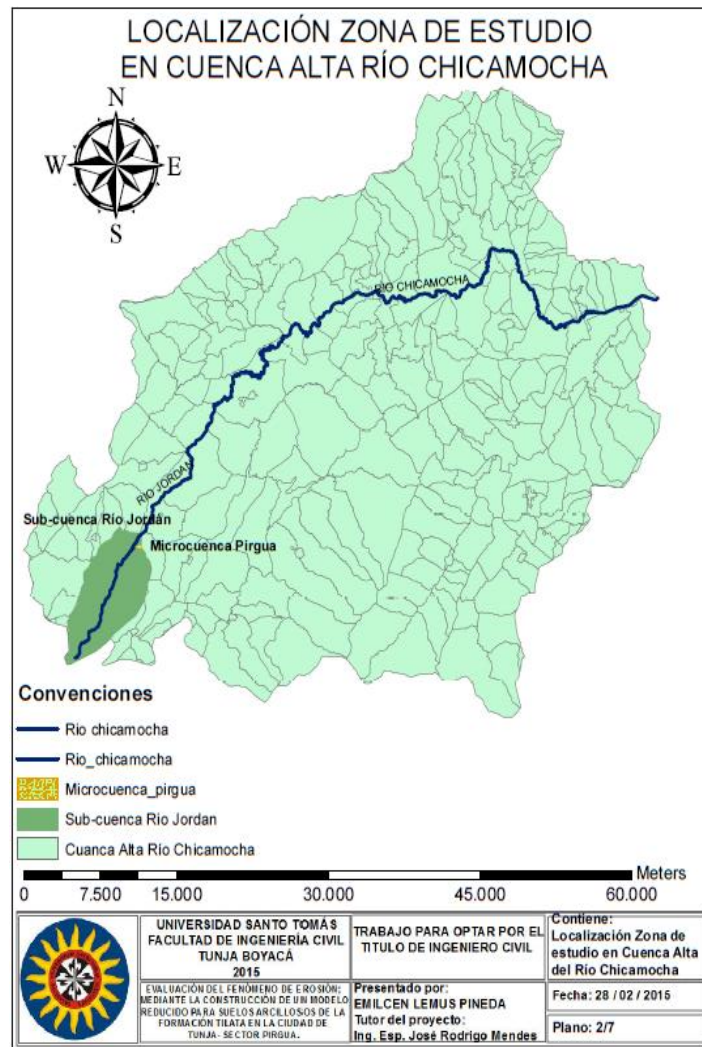
5. DESCRIPCIÓN DE LA SUB-CUENCA

A continuación se presenta la caracterización de la Sub-cuenca de estudio, con el fin de obtener datos hidrológicos que sirvan para ver las condiciones presentes y como afectan en la erosión en la formación Tilata.

5.1 LOCALIZACIÓN

La micro-cuenca Pírgua donde se encuentra ubicado el sitio de estudio, está dentro de la sub-cuenca del Río Jordán. Este es uno de los afluentes hídricos de la ciudad de Tunja Colombia. No es navegable y poco caudaloso, da inicio al Río Chicamocha (Ver figura 11).

Figura 11. Localización Sub-cuenca Río Jordán



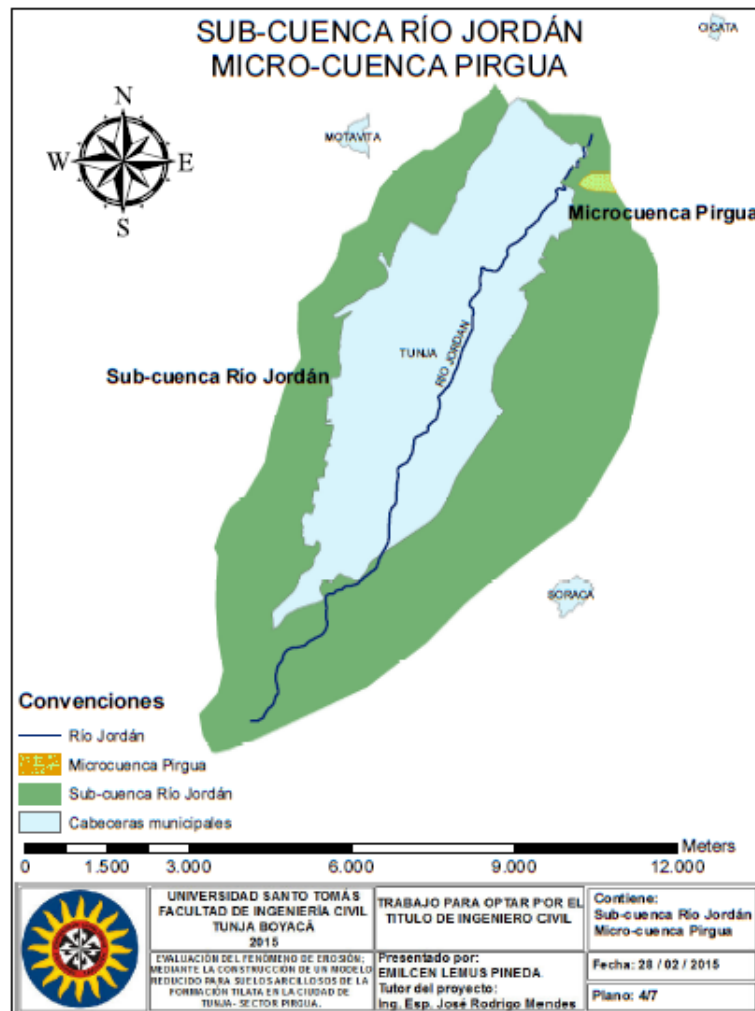
Fuente: El Autor.

La zona de estudio tomada para determinar la precipitación es una parte de la sub-cuenca del Jordán, en la figura 11, se observa en un color verde oscuro señalada la parte de la Sub-cuenca del Río Jordán objeto de estudio, se toma hasta este punto ya que es donde el cauce central de la Micro-cuenca Pigua drena sus aguas al Río Jordán. Este tramo de la Sub-cuenca alberga un poco más de doscientas mil personas, tiene una longitud aproximada de 13.74 km. La micro-cuenca donde se ubica la zona de estudio de erosión tiene un área de 0.164 km² y está ubicada al Noreste de la Sub-cuenca del Río Jordán, muy próxima al campus de la Universidad de Boyacá y sobre la doble calzada. El río Jordán nace en los páramos de la vereda de Runta en el sur de la ciudad.

5.2 UBICACIÓN ESPACIAL

La parte de estudio de la sub-cuenca del Río Jordán se encuentra sobre el área perimetral de la ciudad de Tunja. Figura 12

Figura 12. Ubicación Sub-cuenca en la ciudad de Tunja.



Fuente: El Autor.

Atraviesa la misma de Sur a Norte desde su inicio en la vereda Runta hasta el punto de concentración en el viaducto Río Jordán en el Norte de la ciudad. Comprende los municipios de: Tunja, Soracá, Oicatá, Motavita.

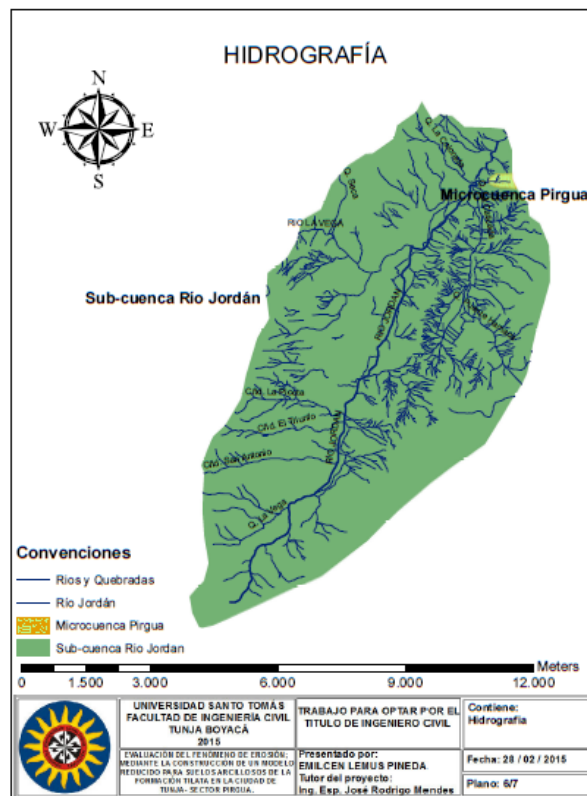
El suelo y la topografía son muy variados, posee un área de 58.31km². Presenta suelos bastante degradados por la tala en zonas altas, implementación de cultivos, Sobrepastoreo de potreros y pastizales nativos. La industrialización paulatina ha ocasionado la desaparición casi total de la estructura natural de los suelos. Otro factor importante lo constituye la construcción de la doble calzada Briceño – Tunja - Sogamoso, la cual atravesó toda la sub-cuenca.

El paisaje del río Jordán se encuentra en 90% transformado o remplazado por edificaciones públicas y privadas. La población presenta un volumen significativo con tasas de crecimiento altas, lo que reduce el área agrícola y ganadera, con ello aumenta la presión social sobre la poca cobertura vegetal nativa.

5.3 DIVISORIA DE AGUAS

El cauce principal es alimentado por pequeñas quebradas como La Vega, La Colorada, El Triunfo, San Antonio, Río La Vega. (Figura 13)

Figura 13. Divisoria de Aguas Sub-cuenca.



Fuente: El Autor.

La zona donde de ubicación del de la cárcava en estudio, se caracteriza por ser seca y no contar con una densidad de drenaje elevada, lo que genera mayor erosión eólica por la escasa presencia de humedad en el suelo.

5.4 COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y CLIMATOLÓGICO

A continuación se hace una caracterización de la climatología de la zona de estudio, se presentan datos que de alguna forma u otra aportan en el fenómeno de erosión de las cárcavas en la formación Tilata, al ser una zona fría, humedad y de fuertes precipitaciones en la época invernal influyen en que la erosión sea mayor.

- **Temperatura:** la temperatura dentro de la sub-cuenca y en general la zona de estudio oscila entre los intervalos que se presentan en la tabla 4. Sabiendo que por la ubicación a nivel del mar se presenta generalmente un clima muy frío, en especial los meses de invierno, donde las temperaturas bajan ostensiblemente.

Tabla 4. Temperatura cuenca Río Jordán

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima absoluta (°C)	23.6	23.9	25.2	24.4	22.2	20.9	20.6	21.8	23.4	22.3	22.4	23.8	22.9
Temperatura máxima media (°C)	19.0	19.4	19.2	18.4	17.3	16.3	16.0	16.4	17.2	17.8	18.1	18.2	17.8
Temperatura media (°C)	12.9	13.3	13.6	13.6	13.2	12.4	11.9	12.1	12.5	13.0	13.2	12.8	12.9
Temperatura mínima media (°C)	7.1	7.9	8.9	9.6	9.6	9.0	8.3	8.2	8.1	8.7	8.9	7.7	8.5
Temperatura mínima absoluta (°C)	0.2	-1.1	2.1	4.4	4.6	2.2	1.8	2.0	1.4	3.2	0.5	-0.3	1.7
Precipitación total (mm)	14.9	26.8	53.9	77.7	84.6	56.4	44.9	43.1	52.0	88.9	69.9	31.5	644.6
Días de lluvias (≥ 1 mm)	5	8	13	17	19	18	18	19	16	17	15	9	174
Humedad relativa (%)	77	75	77	80	82	84	83	82	80	80	80	80	78

Fuente: IDEAM

Para la zona de estudio se evidencia que los meses de mayor temperatura son los correspondientes a Marzo y Abril. Tiempo en el cual el suelo presenta erosión eólica por el transporte de material seco a causa del viento.

- **Humedad relativa:** la humedad relativa presente en la zona de estudio se encuentra entre el 75 y 84 (%). Estos valores indican que es medio alta, lo que genera muy probablemente puntos de rocío en ciertas horas que al ser constantes pueden generar gotas de agua sobre el terreno, incidiendo directamente en pequeñas erosiones a través del tiempo en la formación Tilata.
- **Radiación solar:** en la región se presentan valores máximos en febrero en los niveles de 480 cal/cm²/día, que luego descienden gradualmente hasta junio, mes de mínimos con 420 cal/cm²/día; nuevamente se incrementan poco a poco hasta septiembre, para descender hasta noviembre. La radiación solar se comporta de forma bimodal incidiendo en los meses secos, lo que conlleva a que los taludes de

la formación Tilata al ser altamente arcillosos, pierdan humedad y se produzcan procesos de erosión eólica.

- **Régimen de precipitación:** la precipitación que se presenta en la cuenca es de orden bimodal, los periodos de lluvias se presentan dos veces al año, a causa de la intensidad la erosión laminar del suelo es mayor, formándose surcos en las laderas no recubiertas y un elevado proceso de arrastre de material.

5.5 GEOLOGÍA.

El área de estudio se encuentra ubicada en la cordillera oriental y hace parte de la meseta cundiboyacense. Las formaciones presentes en la zona hacen de la secuencia conformada por rocas de origen sedimentario depositadas durante los periodos cretáceo, terciario y cuaternario. (Ver Anexo 1.)

- **Tilata (TQt):** Se da el nombre de Tilata a una formación que se encuentra en capas horizontales entre Tilata y la represa del Sisga, formada alternativamente de gredas, capas arenosas y cascajos con unos 150 m de espesor visible. Presenta materiales horizontales homogéneos. A lo largo del sinclinal de Tunja, Oicatá, Paipa se observa un conjunto grueso arcillo – arenoso, que forma una terraza de unos 150 m, aproximadamente conformada por arenas y limos de color variable entre amarillo y rojizo, con intercalaciones conglomeráticas y frecuente estratificación cruzada (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999). Esta formación aflora en los bordes del valle central extendiéndose preferentemente en una dirección NE-SW, exhibiendo geomorfológicamente pequeñas colinas sobre parte de los flancos del sinclinal, principalmente en el oriental. Al oriente del campamento de Caminos Vecinales (barrio Los Patriotas) se aprecian capas de arenas de litificación incipiente, blancas, de grano medio a fino, cuarzosas, con matriz arcillosa y ocasionales niveles de gravas, subyaciendo a una sucesión de arcillas blancas, grises y verdosas. El borde oriental de la pista de aterrizaje «Gustavo Rojas Pinilla» de la ciudad de Tunja, está conformada por arcillas blancas y grises, sub-horizontales y compactas; el lado occidental de la pista lo conforma una sucesión de arenas y arcillas vario-coloreadas, todo este sector se halla fuertemente afectado por procesos erosivos proporcionando una morfología característica de cárcavas profundas y amplias. La formación posee en el área de estudio un espesor aproximado de 72 m y yace discordante sobre la formación Bogotá (Agudelo y Castro, 1999).

- **Bogotá (Tpb):** Esta formación se compone de una sucesión monótona de arcillolita abigarrada de colores gris, violeta y rojo en forma de bancos, separados por niveles de areniscas arcillosas blancas a amarillas. Aflora en ambos flancos del sinclinal de Tunja y Ventaquemada y también en algunas zonas del anticlinal de Puente de Boyacá. Según Van Der Hammen (1958), ha sido datada del paleoceno superior y eoceno inferior, presenta concordancia con las areniscas de

la formación Cacho y hacia el techo yace en discordancia con la formación Tilata. En la zona afloran en un área bastante extensa rocas de esta formación distribuyéndose ampliamente en ambos flancos de la estructura, constituyendo una de las unidades sobre la cual se han desarrollado profundas y extensas cárcavas. Esta formación se divide en cuatro conjuntos litológicos de los cuales el cuarto o superior es el que no aflora en toda su potencia (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999). El conjunto inferior se compone en su parte basal, de areniscas arcillosas vario-coloreadas, sobre las que yacen unas areniscas compactas y cuarzosas de grano fino; presenta ocasionales alternancias de arcillolitas grises. Sobre las anteriores, se encuentran unas arcillolitas grises y amarillas con un banco de arenisca gris blancuzco de grano grueso y matriz caolinítica, friable, la cual se encuentra hacia el techo en contacto con una arenisca gris clara de grano fino y matriz caolinítica. Suprayaciendo se presentan unas arcillolitas grises con delgadas alternancias de areniscas amarillentas (Agudelo y Castro, 1999). Seguidamente, se presenta un banco de 8 m de espesor constituido por una arenisca de color gris de grano fino, cuarzoza, con muscovita y biotita dispuestas en formas de lentes, lo cual le imprime un bandeamiento oscuro no continuo. Reposando sobre estas se observan unas arcillolitas amarillas y habanas con alternancias de limolitas amarillas. La parte más superior de este conjunto la conforman unas areniscas grises de grano fino de 12 m de espesor constituidas por ortoclasa, cuarzo y biotita. El espesor aproximado de este conjunto es de 130 m. El conjunto medio en el área se encuentra totalmente cubierto por depósitos coluviales y fluviolacustres. En el conjunto superior constituido en su gran mayoría por arcillolitas rojizas y grises, se observa hacia la base, una arenisca gris rojiza con manchas verdosas, de grano fino, alto contenido de óxidos y compacta, sobre esta reposan unas arcillolitas rojas con ocasionales alternancias de arcillolitas amarillas y blancas. Hacia la parte media se observa una arenisca amarilla rojiza de grano fino a muy fino. El espesor medio de este conjunto es de 117 m (Agudelo y Castro, 1999).

- **Cacho (Tpc):** Se presenta como componente básico de los anticlinales de Gachaneca y Puente de Boyacá y los sinclinales de Tunja y Ventaquemada. Con un espesor de 100 200 m, por presentar areniscas de buena calidad se ha incrementado su explotación para la obtención de arenas. De acuerdo con Hubach (1957), las areniscas del Cacho constituyen la base de la formación Bogotá conformadas por areniscas cuarzosas de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio en la parte superior de la secuencia y arena gruesa en los niveles inferiores. presenta una edad Paleocena de 66.4 ± 2.5 Ma, algunos niveles conglomeráticos de grano redondeado a subredondeado, con matriz arcillosa y cemento ferruginoso; es muy frecuente la estratificación cruzada y marcas de corriente en los niveles superiores. En la parte media existen horizontes arcillolíticos grises y blancos con estratificación fina a delgada y niveles alterados de color rojo ha rozado. La base de las areniscas marca el techo de la formación

Guaduas (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999).

- **Guaduas (Tkg):** Se denomina formación Guaduas al conjunto de estratos que contienen los mantos de carbón explotables. Se encuentra en forma concordante sobre la formación Guadalupe y está compuesta en su gran mayoría por arcillolitas carbonáceas, areniscas y arcillas abigarradas, con la presencia de mantos de carbón de diferentes espesores que son económicamente explotables. Su espesor presenta variaciones considerables a lo largo de la región, en algunos sectores presenta espesores de 600 m. (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999).
- **Grupo Guadalupe, Labor y Tierna (Ksgl):** Data de edad Coniciano-Maestrichtiano, este grupo está compuesto por las formaciones Plaeners, Labor y Tierna. La formación Plaeners presenta un espesor aproximado de 110 m de porcelanitas, chert y esporádicas fosforitas, con una parte intermedia de arcillas y areniscas, con presencia de foraminíferos, vértebras y escamas de peces. Se observa en el sector de Soracá y sobre la vía Tunja Villa de Leiva (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999). La formación Labor y Tierna en el sector de Soracá se encuentran conformada por unos 117 m inferiores de lutitas grises oscuras con pequeñas intercalaciones de arenisca y por 50 m superiores de arenisca. El grupo Guadalupe es de origen marino como lo indica la presencia de la fauna típica en toda la sección. Esta formación es componente base del sinclinal de Tunja. (Alcaldía Mayor de Tunja y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 1999).
- **Depósito Fluvio-Lacustre (Qfl):** Se encuentra formando los valles de los ríos Chulo y La Cascada. Presenta una morfología de relieve suave a plano; son depósitos no consolidados y su composición varía lateralmente, así como la granulometría de sus elementos; situación que refleja la frecuente variación de la intensidad de las corrientes hídricas que los depositaron. Sobre el eje del sinclinal su espesor alcanza unos 37 m; los materiales que lo componen están constituidos por intercalaciones de arena y arcilla de color carmelita y con oxidaciones rojizas, lo que sugiere la alternancia de episodios lacustres y fluviales en su formación. Estos depósitos reposan discordantemente sobre la formación Tilata ocupando los paleocauces definidos por el relieve post-erosivo, esto significa que la fase fluvio-lacustre es netamente posterior a la sedimentación de la formación Tilata, es decir del pleistoceno superior (Agudelo y Castro, 1999).

5.6 ANALISIS MORFOMETRICO DE LA SUB-CUENCA

La zona de estudio ubicada dentro de la Sub-cuenca del Río Jordán presenta una topografía uniforme, con una variación mínima en la pendiente del 1.11%, entre la zona más alta de la cuenca (2900 m.s.n.m.) y el punto del Viaducto Río Jordán

(2750 m.s.n.m.) ver figura 14. Gran parte de esta condición ha generado inundaciones dentro de la ciudad de Tunja.

5.6.1 Pendiente media corriente principal.

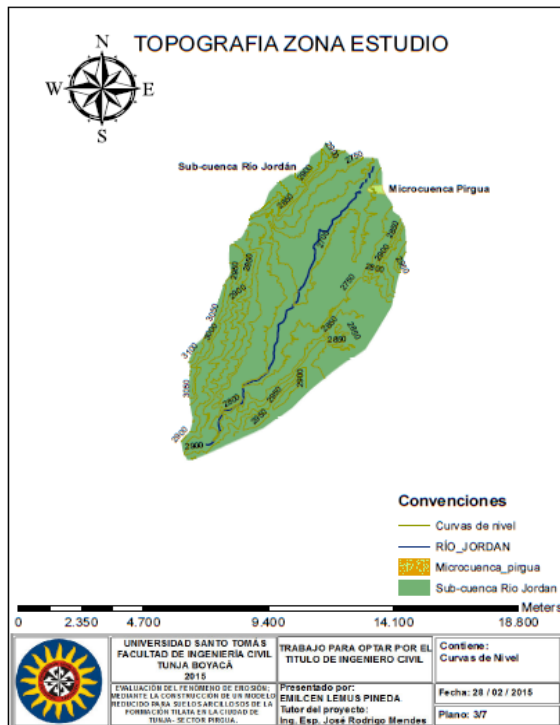
El cauce del Río Jordán desde su inicio en la vereda la Runta hasta el punto de estudio en inmediaciones del Viaducto del Río Jordán presenta una topografía muy plana, con un relieve máximo de 150 metros, lo que la convierte en una zona de fácil inundación en periodos de lluvia intensos. En la tabla 5, se relaciona la pendiente del cauce principal con su longitud total.

Tabla 5. Pendiente media sub-cuenca Río Jordán.

PENDIENTE MEDIA		
Longitud	Altura	Pendiente (%)
1174	100	8,52
1520	50	3,29
4167	50	1,20
7249	50	0,69

Fuente: El Autor.

Figura 14. Topografía sub-cuenca.



Fuente: El Autor.

5.7 FORMA

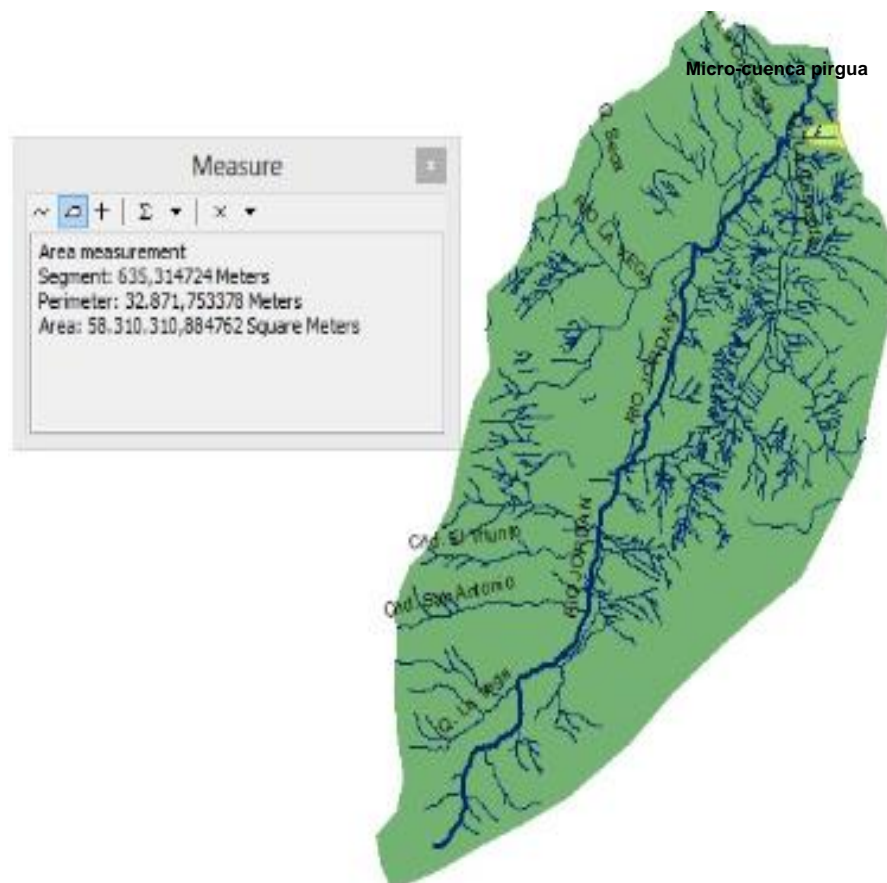
La forma de la Sub-cuenca es un factor determinante para relacionar el comportamiento hídrico, la presencia de inundaciones repentinas se originan en gran medida por la forma topográfica presente en la sub-cuenca.

5.7.1 Área.

La cual se ubica la micro-cuenca de estudio en el sector Pírgua con una extensión de 0,164 km² y un perímetro de 1768.11 metros. En la figura 15, se observa la micro-cuenca Pírgua.

Presenta un área muy pequeña y de topografía quebradiza, el sector de estudio genera condiciones de gran escorrentía superficial y poca infiltración por ser un suelo arcilloso; lo que hace que el proceso erosivo sea mayor.

Figura 15. Área y perímetro Sub-cuenca Río Jordán.

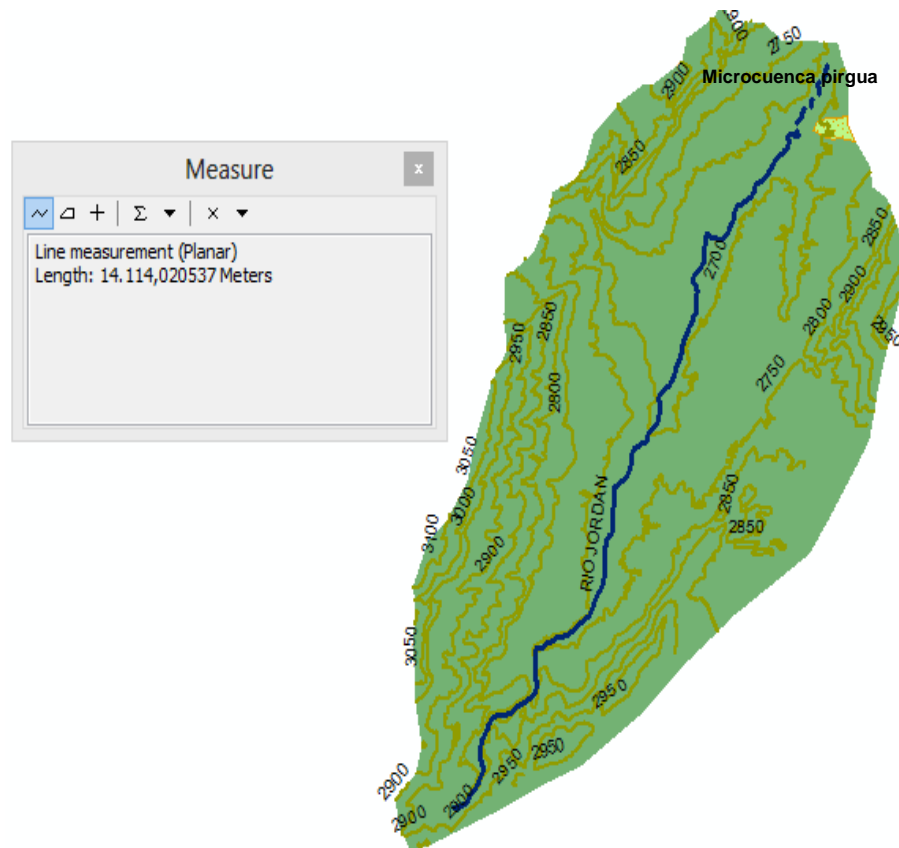


Fuente: El Autor.

5.7.2 Longitud cuenca.

La sub-cuenca presenta una longitud en su cauce principal desde su inicio en la vereda la Runta hasta el viaducto Río Jordán de 14.11 km. En la figura 16 se observa el recorrido que presenta el cauce en la Sub-cuenca, parte de su recorrido pasa por la zona urbana, donde se ha reducido su sección transversal y se ha vulnerado su ronda de río mínima.

Figura 16. Longitud cauce principal.



Fuente: El Autor.

5.7.3 Factor de forma (Kf).

La forma superficial de la Sub-cuenca tiene interés por el tiempo que tarda en llegar el agua desde los límites hasta la salida de la misma. El factor de forma de Horton expresa la relación existente entre el área de la cuenca y un cuadrado de la longitud axial de la misma.

$$Kf = \frac{A}{La^2} = \frac{58.31 \text{ km}^2}{14.11^2 \text{ km}} = 0.29$$

La sub-cuenca del Río Jordán presenta un factor de forma de 0.29, lo que la hace

Ligeramente redondeada, indicando esto que tiene medias posibilidades a presentar crecidas súbitas.

5.7.4 Coeficiente de compacidad.

Señala la mayor o menor compacidad de la cuenca a través de la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie de la cuenca, entre más cercano a la unidad es más circular la cuenca por tanto es más compacta, y aumenta conforme disminuye la compacidad.

$$I_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

$$I_c = 0.28 \frac{32.87 \text{ km}}{58.31 \text{ km}^2} = 1,25$$

La Sub-cuenca del Río Jordán presenta un coeficiente de compacidad de 1,25 siendo cercano a uno, lo que indica que la cuenca presenta una forma semicircular y tiene una tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua producto de escurrimiento, lo que la hace por su forma ser propicia a presentar inundaciones repentinas.

5.8 DRENAJE

La densidad y el patrón de drenaje relacionan la cantidad de agua producto de escorrentía que presenta la cuenca y lo permeable que pueda llegar a ser, al presentarse una densidad elevada la infiltración es baja. A continuación se relaciona el comportamiento hídrico superficial que presenta la Sub-cuenca del Río Jordán.

5.8.1 Longitud total de corrientes.

Hace referencia a la cantidad y la longitud de todos los drenajes que se presentan en el área de aporte de agua a la sub-cuenca.

$$C_t = \sum \text{longitud de las corrientes } C_t = 166.25 \text{ Km}$$

5.8.2 Densidad de drenaje.

Es la relación entre la longitud total de las corrientes de agua de la sub-cuenca y su área total.

$$D_d = \frac{L}{A} = \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$$

$$D_d = \frac{166.25 \text{ km}}{53.81 \text{ km}^2} = 3.08 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$$

La Sub-cuenca presenta una densidad de 3.08 Km/Km², este valor indica que la sub-cuenca excepcionalmente bien drenada. Este valor también indica que el tiempo de concentración tiende a ser menor por la producción mayor de caudal superficial por parte de la sub-cuenca.

5.8.3 Patrón de drenaje sub-cuenca.

La cuenca presenta un patrón de drenaje dendrítico, es el patrón que más frecuentemente se presenta, y se caracteriza por mostrar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos. Se desarrolla en suelos homogéneos, moderadamente permeables, con pendientes suaves y sin ningún tipo de control. Se presenta, con frecuencia, en zonas de rocas sedimentarias blandas, aluviones finos, tobas volcánicas, depósitos de till glacial (brecha consolidada o roca sedimentaria, cuyos materiales de partida se han formado por fenómenos glaciares), principalmente. (Figura 17)

Figura 17. Patrón de drenaje Pinnado.

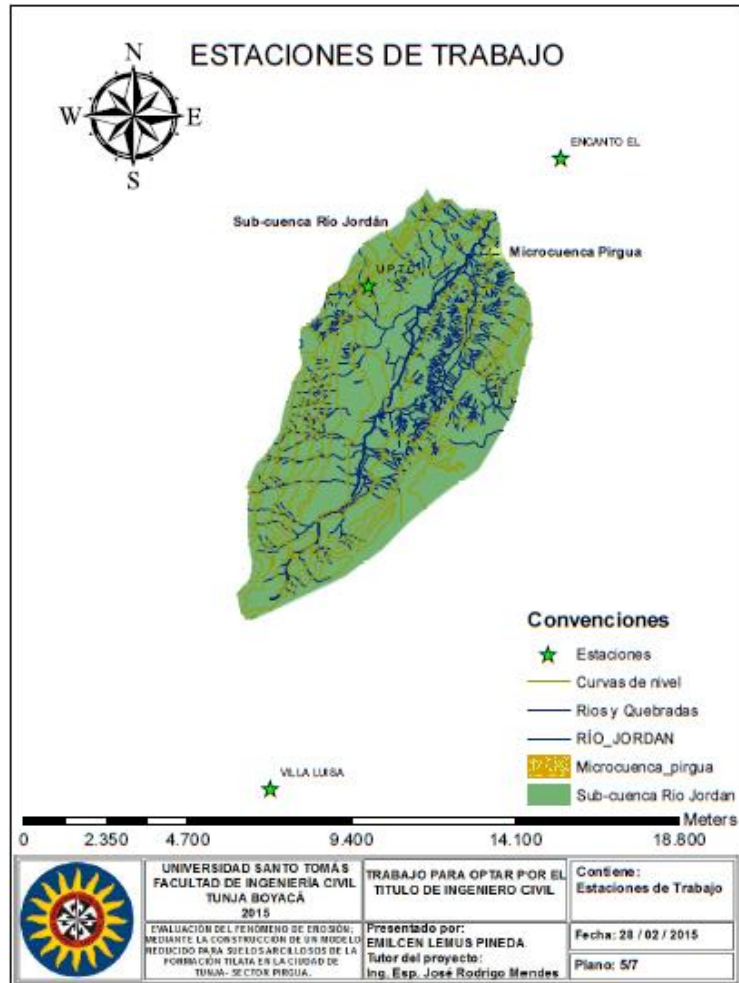


Fuente: Cuencas hidrográficas – Carlos Hernando Londoño Arango.

5.9 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL.

Como parte de la caracterización de la zona de estudio se obtuvo la precipitación media espacial, tomando como referencia las estaciones de la UPTC, Villa Luisa, y El Encanto (Ver figura 18); al tomarse estas tres estaciones se pensó en que rodearan la cuenca y estuvieran lo más próximo para que la precipitación sea muy cercana a la real, se consiguieron las cartas de precipitación del IDEAM (Anexo 2) para periodos mensuales multianuales de los últimos 20 años.

Figura 18. Estaciones de trabajo cuenca Río Jordán.



Fuente: El Autor.

5.9.1 Promedio Aritmético.

Para la obtención de datos similares a la precipitación real se tomó la información de las cartas pluviométricas y se realizó un promedio aritmético (ver tabla 6) teniendo como base las estaciones de la UPTC, Villa Luisa y El Encanto. Con estos datos se determinó la precipitación por medio de los polígonos de Thiessen. La precipitación es uno de los factores detonante del proceso de erosión en la formación Tilata del sector Pirgua Tunja.

Tabla 6. Precipitación promedio aritmética mensual.

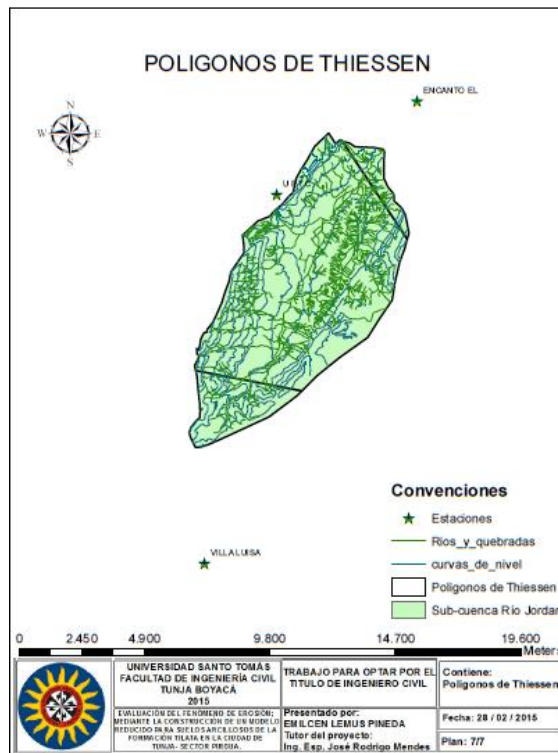
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ARITMEICA				
MES	VILLA LUISA	UPTC	EL ENCANTO	PROMEDIO
Enero	21.54	23.74	22.77	22.68
Febrero	33.53	29.44	28.02	30.33
Marzo	61.49	54.89	63.63	60.00
Abril	95.01	72.14	96.42	87.86
Mayo	131.10	82.86	83.66	99.20
Junio	111.32	60.49	61.44	77.75
Julio	109.84	48.54	48.77	69.05
Agosto	88.19	36.26	43.97	56.14
Septiembre	83.89	52.28	52.03	62.73
Octubre	104.02	87.16	101.79	97.66
Noviembre	95.32	71.39	80.61	82.44
Diciembre	51.83	29.31	36.65	39.26

Fuente: El Autor.

5.10 Polígonos De Thiessen.

La precipitación media de la sub-cuenca del Río Jordán se obtuvo mediante los polígonos de Thiessen (Ver figura 19) en el software Arc-Gis.

Figura 19. Polígonos de Thiessen.



Fuente: El Autor.

Con base en el área de total de la sub-cuenca y la información media de las tablas de precipitación se realizó la obtención del parámetro. Para el análisis del modelo a escala se utilizara la precipitación máxima obtenida y la pendiente dada al talud, tomando estos puntos de comparación para evaluar la erosión debido a la incidencia directa que tiene la lluvia y la pendiente sobre el proceso erosional del suelo.

Se obtuvieron los polígonos de Thiessen por medio de Arc-Gis, para las estaciones de trabajo UPTC, Villa Luisa y El Encanto. Después de determinarlos se halló el área aferente a cada estación para poder obtener la precipitación media para la sub-cuenca. En la tabla 7. Se relaciona los datos obtenidos para cada estación con su área aferente y los datos de Thiessen para la sub-cuenca en general.

Al obtener el área y la precipitación mensual promedio de cada estación se realiza la suma para las tres zonas respectivamente, luego se divide en el área total de la Sub-cuenca y así ya se tendrán los valores mensuales de precipitación, con estos podemos analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca, al tener la cantidad de precipitación generada se puede conocer el caudal pico generado.

Tabla 7. Precipitación mensual Polígonos de Thiessen.

PRECIPITACIÓN PROMEDIO ARITMETICA							
MES	VILLA LUISA	ÁREA	UPTC	ÁREA	EL ENCANTO	ÁREA	THIESEN
Enero	21.54	8.03	23.74	47.77	22.77	2.51	23.39
Febrero	33.53	8.03	29.44	47.77	28.02	2.51	29.94
Marzo	61.49	8.03	54.89	47.77	63.63	2.51	56.17
Abril	95.01	8.03	72.14	47.77	96.42	2.51	76.34
Mayo	131.10	8.03	82.86	47.77	83.66	2.51	89.54
Junio	111.32	8.03	60.49	47.77	61.44	2.51	67.54
Julio	109.84	8.03	48.54	47.77	48.77	2.51	57.00
Agosto	88.19	8.03	36.26	47.77	43.97	2.51	43.75
Septiembre	83.89	8.03	52.28	47.77	52.03	2.51	56.62
Octubre	104.02	8.03	87.16	47.77	101.79	2.51	90.11
Noviembre	95.32	8.03	71.39	47.77	80.61	2.51	75.08
Diciembre	51.83	8.03	29.31	47.77	36.65	2.51	32.73

Fuente: El Autor.

Dentro de un balance hidrológico se tiene que analizar las entradas y salidas de agua a la cuenca o sub-cuenca, teniendo presente lo importante que es la cantidad de caudal manejado dentro de la sub-cuenca, se determinaron algunos parámetros de salida como la evaporación y la evapotranspiración los cuales son procesos de perdida de caudal dentro del área de aportación, a continuación se

presenta la obtención por el método de balance de energía y de Thornthwaite respectivamente de cada parámetro, tomando como referencia la estación de temperatura de la UPTC, próxima a la zona de Pírgua.

5.11 EVAPORACIÓN MENSUAL

La evaporación es un proceso fundamental en la naturaleza, para la sub-cuenca de estudio y cualquier parte es primordial ya que es el proceso en el cual el agua mediante un cambio de estado de líquido a gaseoso retorna el agua a la superficie terrestre mediante el proceso de lluvia.

En la sub-cuenca de estudio y la micro-cuenca principalmente, es importante conocer como es el comportamiento de la evaporación ya que es una forma de salida del agua de la sub-cuenca y entre mayor sea menor cantidad de agua estará presente en el terreno, convirtiéndola a la sub-cuenca en más seca y mejora las condiciones para la erosión eólica.

5.11.1 Balance De Energía.

Este método toma como sistema de control al tanque evaporímetro, realizando un balance entre la energía aportada por el sol y el agua evaporada gracias a esos aportes. En este sentido se define como un flujo de agua desde la superficie del agua a la atmósfera. Para la determinación de la evaporación en la sub-cuenca se tomó la estación de temperatura de la UPTC, valores de radiación neta de 200 (W/m²). En la tabla 8 se presentan los valores de evaporación obtenidos por el método descrito.

Tabla 8. Evaporación Sub-cuenca Río Jordán.

BALANCE DE ENERGIA												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Lv (J/Kg)	2467109	2465450	2465213	2464739	2466872	2469242	2469953	2469953	2469716	2468057	2467346	2467109
Rn (W/m ²)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Pw (kg/m ³)	997	997	997	997	997	997	997	997	997	997	997	997
E (mm/s)	8.131E-08	8.137E-08	8.14E-08	8.14E-08	8.13E-08	8.12E-08	8.12E-08	8.12E-08	8.12E-08	8.1E-08	8.13E-08	8.131E-08
E (mm/día)	7.025	7.030	7.031	7.032	7.026	7.019	7.017	7.017	7.018	7.023	7.025	7.025

Fuente: El Autor.

5.11.2 Evapotranspiración.

Son las pérdidas de vapor de agua a partir de los suelos, representada por el fenómeno de evaporación directa del suelo y el de la transpiración a partir de la superficie de las hojas de las plantas. Se determinó por el método de Thornthwaite tomando la estación de temperatura de la UPTC (Anexo 3). En la tabla 9 se presentan los datos obtenidos de evapotranspiración media mensual, para la zona de estudio.

Tabla 9. Valores de Evapotranspiración mensual mediante Thornthwaite.

EVAPOTRANSPIRACIÓN				
Mes	Ij	I	a	Eto
Enero	4.91	57.77	1.40	5.68
Febrero	5.28	57.77	1.40	6.07
Marzo	5.33	57.77	1.40	6.13
Abril	5.44	57.77	1.40	6.24
Mayo	4.96	57.77	1.40	5.74
Junio	4.45	57.77	1.40	5.19
Julio	4.30	57.77	1.40	5.03
Agosto	4.30	57.77	1.40	5.03
Septiembre	4.35	57.77	1.40	5.08
Octubre	4.70	57.77	1.40	5.46
Noviembre	4.86	57.77	1.40	5.63
Diciembre	6.07	57.77	1.40	5.68

Fuente: El Autor.

6. MATERIALES Y METODOS

En el presente capitulo se enfocará en dar a conocer las características de la zona de estudio, así como evidencia fotográfica del estado de las cárcavas y un recorrido por las zonas de mayor evidencia del proceso erosivo en la formación Tilata (TQt) en la ciudad de Tunja.

6.1 DELIMITACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

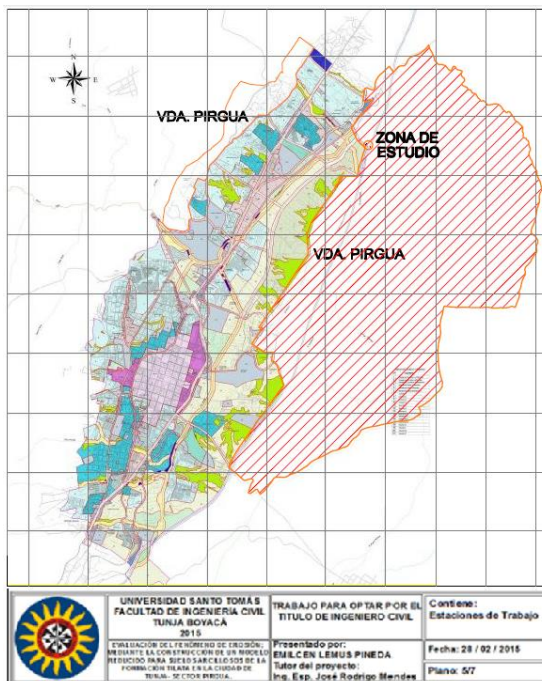
6.2 MUNICIPIO DE TUNJA

Tunja es una ciudad y municipio de Colombia, capital del departamento de Boyacá. Cuenta con una población estimada para 2015 de 206.407. Fue la capital de la república homónima creada en la Constitución de Tunja el 9 de diciembre de 1811. Elevación: 2.810 m, Población: 145.138 (2005) Organización de las Naciones Unidas. (Figura 20)

6.3 DESCRIPCIÓN FÍSICA

Tunja Registra 200 desarrollos urbanísticos en la zona urbana y 10 veredas en el sector rural: Barón Gallero, Barón Germanía, Chorroblanco, El Porvenir, La Esperanza, La Hoya, La Lajita, Pírgua, Runta y Tras del Alto. Los ríos Jordán que atraviesa a la ciudad de sur a norte y la Vega que va de occidente a oriente, se consideran sus principales fuentes hídricas.

Figura 20. Localización vereda Pírgua en Boyacá.



Fuente: El autor.

6.4 LÍMITES DEL MUNICIPIO

Limita por el NORTE con los municipios de Motavita y Cóbbita, al ORIENTE, con los municipios de Oicatá, Chivatá, Soracá y Boyacá, por el SUR con Ventaquemada y por el OCCIDENTE con los municipios de Samacá, Cucaita y Sora.

Extensión total: 121.4920 Km²

Extensión área urbana: 19.7661 Km²

Extensión área rural: 101.7258 Km²

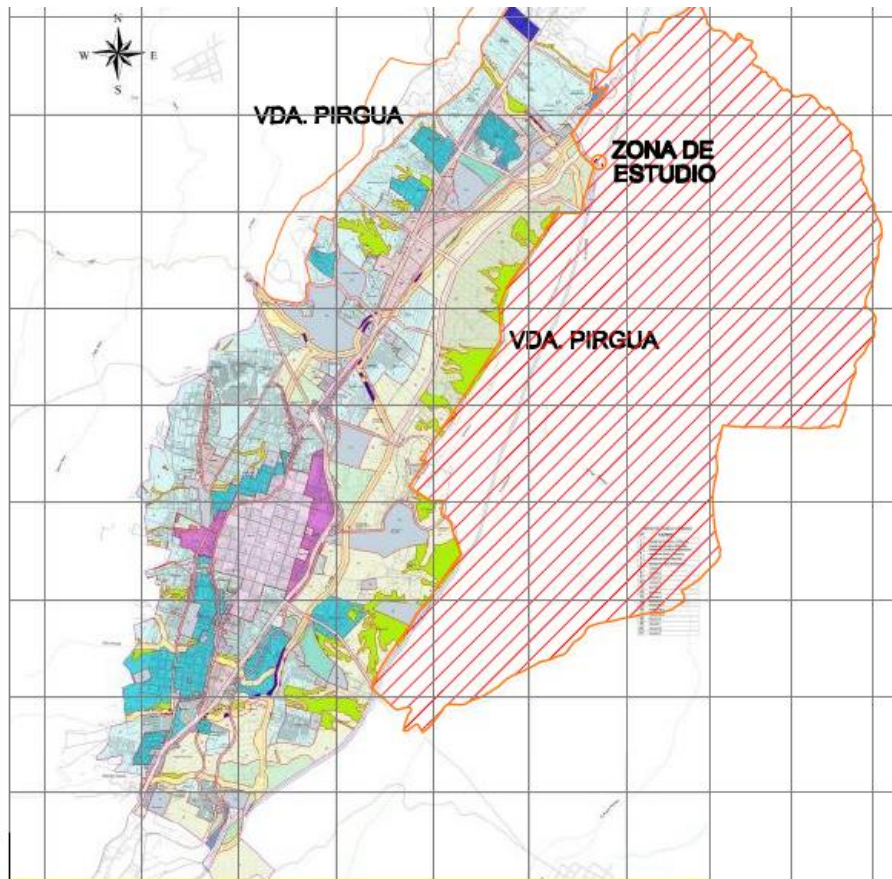
Altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar): 2782

Temperatura media: 13° C.

6.5 ZONA DE ESTUDIO.

Se utilizó material de la formación Tilata-sector pargua-parte nor-occidental (figura 21). En el lugar de estudio se realizaron seis apiques, Con el material de la formación se quiere evaluar como es el comportamiento del material con diferente precipitación y pendiente y densidad de compactación.

Figura 21. Localización general zona de estudio.



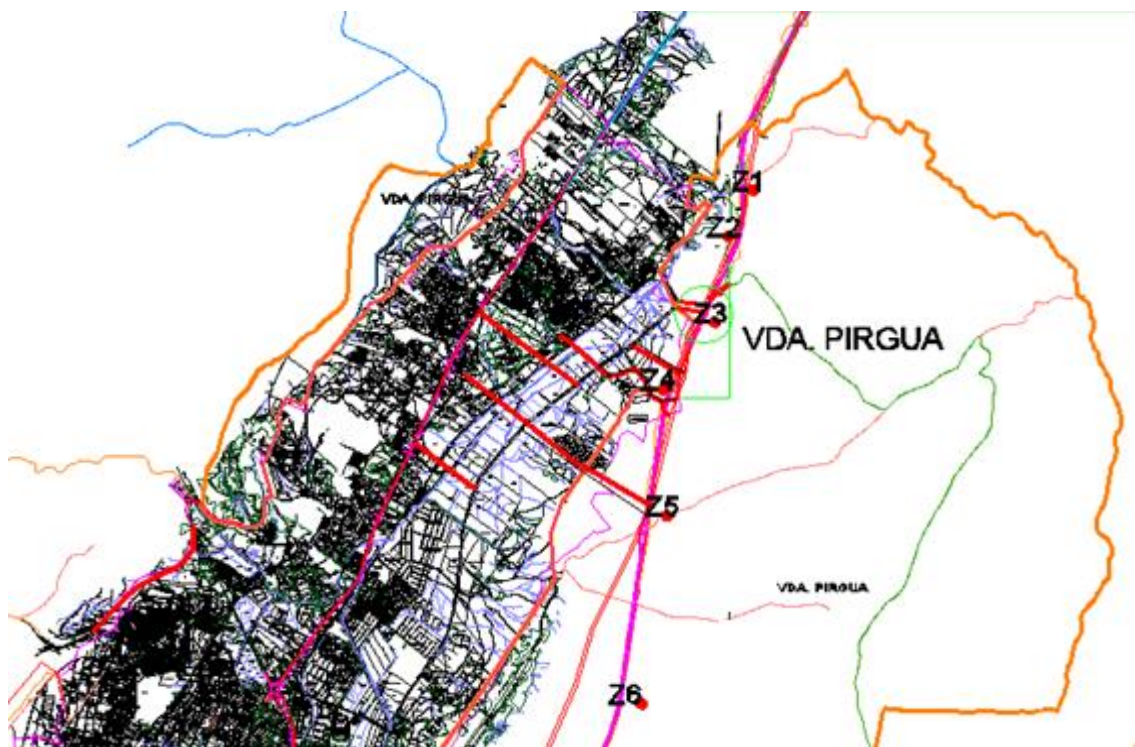
Fuente: El Autor.

6.6 PLANO DE LOCALIZACIÓN DE SONDEOS.

Para determinar el tipo de suelo presente en la zona se realizaron seis apiques en diferentes sitios de la zona de estudio como se observa en la figura 22. En los cuales se tomaron muestras para determinar la humedad natural del terreno y los límites de Atterberg.

Se realizó el ensayo de cono y arena con el fin de conocer la densidad del material en situ y así en el momento de montar el material en el modelo reducido hacerle pruebas de densidad en laboratorio e ir comparando la densidad de campo vs la de laboratorio, con esto calibra otra propiedad del material para tener un modelo a escala más similar al real para la obtención de mejor resultados.

Figura 22. Delimitación de la zona de estudio



Fuente: El Autor.

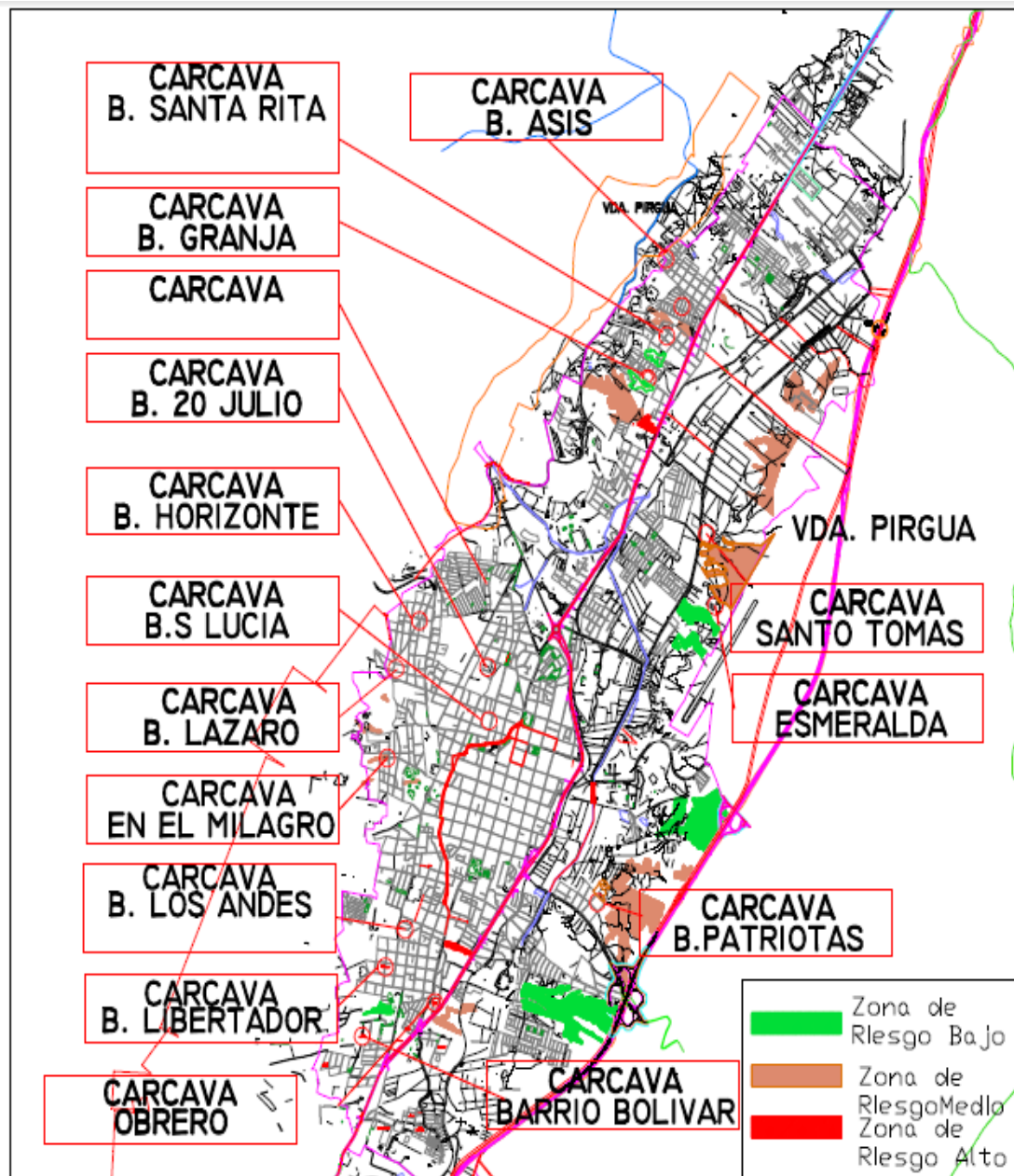
6.6.1 Ubicación de cárcavas en Tunja con zona de riesgo.

Observando el mapa de riesgo podemos encontrar que la cárcava de la Universidad Santo Tomás y la del barrio patriotas se encuentran ubicadas en una zona de riesgo medio. (Ver figura 23).

Los sectores como el barrio Villa Luz, Paraíso, Milagro, Santa Rita, La Granja Bolívar, Estancia el Roble, 20 de Julio, costado Norte de Ricaurte, Bella Villa,

Cortijo, Mirador Escandinavo, San Antonio presentan amenaza alta por erosión hídrica superficial y sub-superficial. (POT, 2013 PRIMERA REVISION).

Figura 23. Plano de cárcavas en Tunja



Fuente: Plan De Ordenamiento Territorial Tunja (POT).

Tabla 10. Ubicación cárcavas en Tunja.

No.	CARCAVAS	DIRRECCIÓN	VERTIMIENTO	TIPO DE VIVIENDA
1	Santa Lucia y 20 de Julio	Carrera 14-16 calle 24-29	12 alcantarillados, 7 drenajes a cárcava	Ladrillo, adobe, Tapia pizada
2	San Lázaro Bello Horizonte	Calle 20 -25 Trans 17-18	23 alcantarillados, 5 pozos sépticos	Ladrillo, adobe
3	Barrio los Andes	calle 8-9 carrera 16-18	10 Alcantarillados, 8 drenajes a cárcava	Ladrillo, adobe, ladrillo en adobe
4	Barrio Colinas de San Fernando	Calle 7a -9a carrera 17-18	5 alcantarillados, 2 drenajes a cárcava	Ladrillo
5	Barrio Libertador	Calle 7-8 carrera 12-14	6 alcantarillados deficientes	Ladrillo
6	Barrio Nazaret y Jordán	calle 7-8 Carrera 9	8 alcantarillado, 2 drenaje cárcava	Ladrillos y Adobe
7	Barrio Obrero	Calle 7-8 carrera 7-8	Drena a la cárcava	Adobe
8	Barrio Hunza	Calle 14-15 Carrera 4	Drena a la cárcava	Ladrillo
9	Barrio La Granja	Calle 51-53 Carrera 7-12	3 alcantarillados, 7 drenajes a cárcavas	Ladrillo
10	Barrio villa Luz Y Santa Rita		3 Alcantarillados 2 drena a la cárcava	Ladrillo y Adobe
11	Barrio Asís	Calle 61-64 Carrera 9-13	1 drena a la cárcava	Bareque teja Zinc
12	Barrio Milagro	Calle 19 carrera 20-22	1 drena a la cárcava	Ladrillo y adobe

Fuente: Sanchez Jc & Tobar N. 1999. Tesis UPTC, Tunja Boyacá.

✓ **Cárcava el milagro**

La cárcava se ubica en calle 19 # 20-22, en la cual se evidencia que la unión de varios surcos generó un problemas de carcavamiento. Este problema afecta a varias viviendas, las construcciones ubicadas en el sector no cumplen con una distancia reglamentaria se ubicadas cerca a la cárcava. Si no tiene un proceso de control el terreno tiende a desaparecer con los años como se evidencia en la fotografía 3.

Fotografía 3. Perdida de zona urbana por problemas erosivos barrió el milagro.



Fuente: El Autor.

✓ **Cárcava Asís**

Ubicada en la Calle 61-64. Esta es una zona de riesgo medio, fotografía 4 se evidencia construcciones en la parte inferior de la cárcava y presencia de erosión laminar, debido al desprendimiento y transporte de capas bien definidas

Fotografía 4. Presencia erosión laminar y pérdida de vegetación barrió Asís



Fuente: El Autor.

✓ **Cárcava de la Granja**

Localizada en la Calle 51-53 Carrera 7-12 barrio la Granja, en la fotografía 5 se puede evidenciar un problema de erosión antiguo, se ven viviendas en la parte alta de la cárcava y no se puede ver un sistema de mitigación a la erosión, lo que genera un riesgo latente para las construcciones y residentes de las mismas.

Fotografía 5. Se evidencia perdida de material en masa debido a erosión por lluvia.



Fuente: El Autor.

Erosión por surcos en la parte superior de la terraza, y deslizamiento de tierra y pequeñas rocas; en la parte media de la terraza se presenta sedimentos arrastrados por el agua desde la parte superior. Fotografía 6

Fotografía 6. Presencia de surcos en la doble calzada Bogotá- Sogamoso ubicada k 14+300



Fuente: El Autor.

Muestra la formación de cárcavas a aproximadamente unos 100 mts de la autopista BTS en la ciudad de Tunja. Se presencia el proceso erosivo que se puede ver por medio de la gran pérdida de material y forma topográfica del terreno. Además la continúa desaparición de vegetación. Fotografía 7

Fotografía 7. Problemas de remoción en masa doble calzada Bogotá- Sogamoso entrada del relleno.



Fuente: El Autor

✓ **Erosión hídrica superficial**

La precipitación causa en algunos lugares escurrimiento concentrado, el cual causa pérdida de material formado pequeños surcos, los cuales se han unido formando cárcavas fotografía en la formación Tilata en la doble calzada en el sector de Pirgua. Fotografía 7: Proceso de erosión a lo largo de la variante de la ciudad de Tunja. Al lado derecho de la imagen se presencia la pérdida de vegetación por el proceso de erosión por surcos. Mientras que en la parte central se puede notar la vegetación deteriorada por el tipo de suelo presente en la formación.

Fotografía 8. Formación de cárcava en la doble calzada - Sogamoso ubicada k 14+600



Fuente: El Autor

✓ **Sistemas preventivos**

En el corte realizado al terreno, para la ejecución de la doble calzada, se evidencia como el proceso erosivo sumado a características del material han generado condiciones de inestabilidad por tal causa se ha venido mitigando este efecto con Sistemas preventivos y correctivos como se observa en la parte superior un muro Fotografía 9 en tierra armada para evitar que se propague el fenómeno de carcavamiento y barreras muertas en la parte inferior.

Fotografía 9. Medida de control en procesos erosivos



FUENTE: Autor

La instalación de vegetación es una medida para evitar el proceso erosivo, en la fotografía 10 se evidencia que la erosión por lluvia, produjo desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo lo cual ocasiono que la medida preventiva desapareciera.

Fotografía 10. La erosión por lluvia causó pérdida de capa vegetal variante Bogotá- Sogamoso k 14+280



Fuente: El Autor.

✓ **Cárcava por escorrentía sub- superficial.**

Proceso erosivo conocido por tubificación, se origina en suelos permeables, el cual por infiltración de lluvia permite el paso o transmisibilidad de agua formando tubos los cuales con el tiempo por la diferencia de peso y material colapsan. Y con el tiempo forma cárcavas.

Fotografía 11. Proceso erosivo por tubificación vía Bogotá Sogamoso a 200metros del relleno sanitario



Fuente: El Autor.

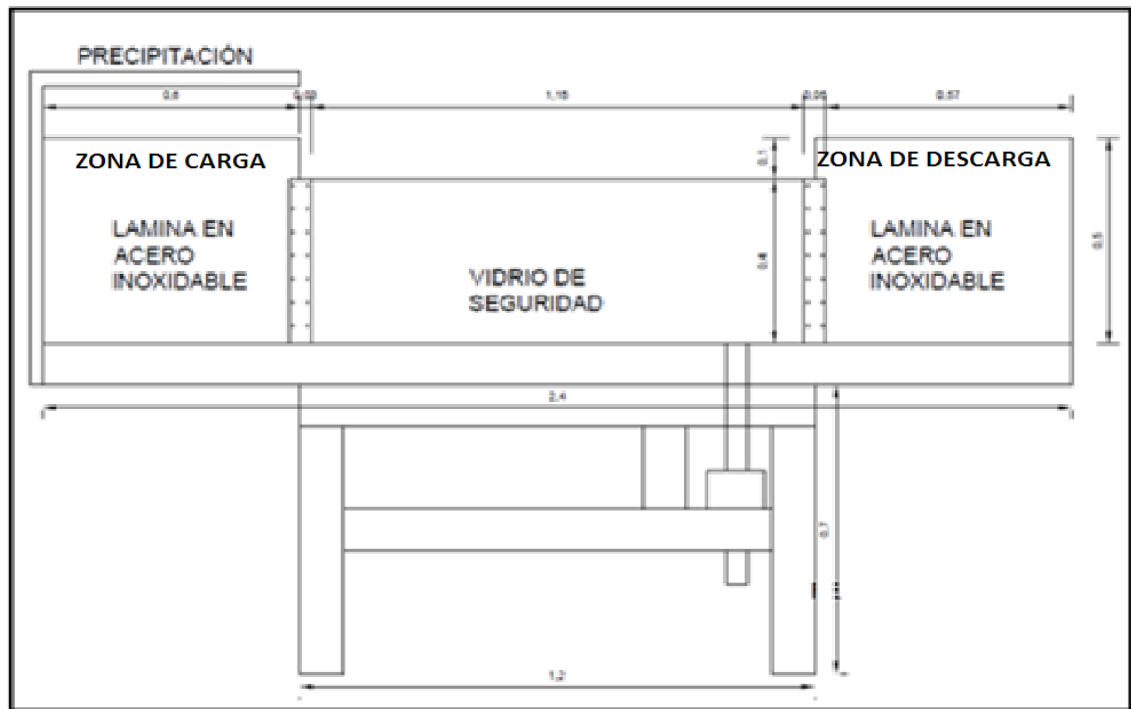
7. DISEÑO, CONSTRUCCION DEL EQUIPO Y LOS MODELOS

En la etapa inicial del del modelo, el director y los autores propusieron como diseño previo la figura 24. Al ser analizada se llegó a la conclusión que el tanque de cargue y descargue no cumplían con los resultados esperados.

7.1 DISEÑO PRELIMINAR

Se diseña la zona de carga con las siguientes dimensiones 0.6m *0.60m *0.50m y descarga con 0.57m *0.57m *0.50m en acero inoxidable. En el diseño inicial el modelo reducido a escala presenta una plataforma uniforme, instalada sobre el chasis construido en perfil americano tipo canal de 1/4" de 2.4 m * 0.10m * 0.05m. El vidrio de seguridad se instala a la altura del chasis asegurándolo con pasadores en acero inoxidable como se observa en la (Figura 24).

Figura 24. Diseño preliminar de equipo utilizado



Fuente: El Autor.

En el diseño preliminar se observó que el modelo no cumplía con los resultados esperados porque:

- ✓ La zona de carga no es adecuada, el material presenta pérdida, al encontrarse todo al mismo nivel no permite que se compacte, y al realizar los ensayos con la precipitación se pierde la mayor parte del material.
- ✓ El sistema de precipitación está ubicado en el borde de la zona de carga, a una distancia de 0.30 m del material, lo cual afecta el resultado porque la

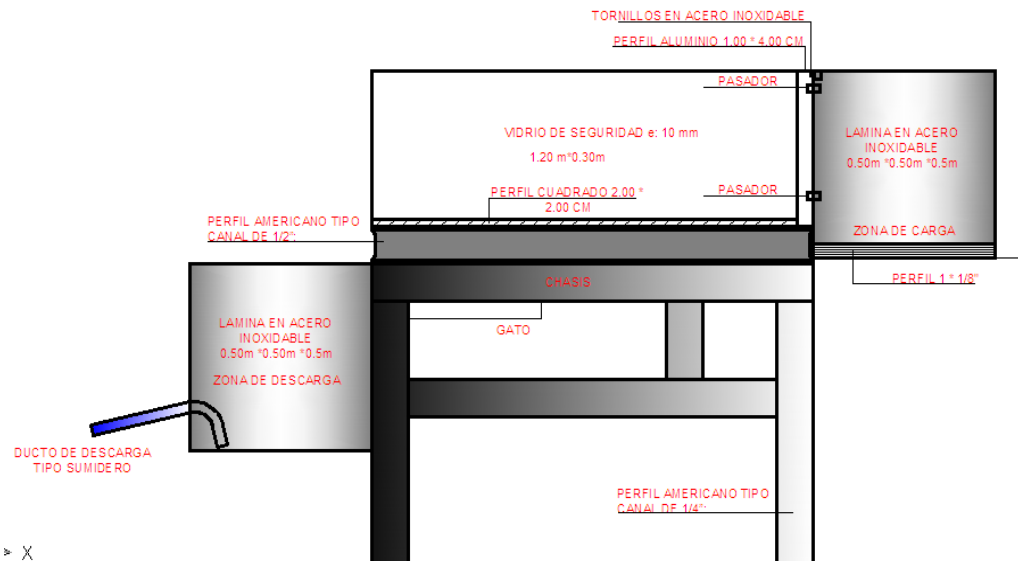
precipitación llega al terreno con presión y no por gravedad ocasionando mayor volumen de pérdida. Además estaba directamente instalado a la zona de carga, por tales causas en cada cambio de pendiente, la precipitación no llega al terreno en forma vertical.

- ✓ Se analiza que la zona de carga presentaría inundación, debido a la falta de pendiente y ducto de desagüe.
- ✓ El vidrio de seguridad al encontrarse instalado directamente sobre la base, presenta problemas de infiltración.

7.2 DISEÑO FINAL

Teniendo en cuenta los problemas presentados en el diseño anterior, se buscó en trabajo conjunto con el director del proyecto y autores, las posibles soluciones, para tal causa se evaluaron dimensiones y formas que podrían generar características semejantes que en terreno. En la Figura 25 se presenta el diseño final.

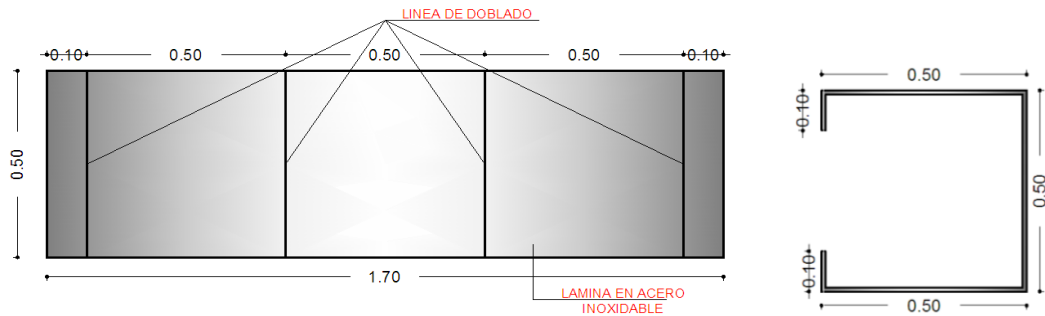
Figura 25. Diseño final modelo reducido a escala



Fuente: El Autor.

- ✓ **Zona De Carga.** Se diseñó (figura 26) y construyó en acero inoxidable con las siguientes dimensiones 0.50 m * 0.50m * 0.50 m, se cambió de posición dejándola 15 cm por debajo del chasis. Para que el material no se pierda por arrastre. Se ubicó la muestra tomada de la cárcava ubicada en el sector Pírgua en la zona de carga, buscando en el modelo reducido obtener una densidad similar a la encontrada in Situ.

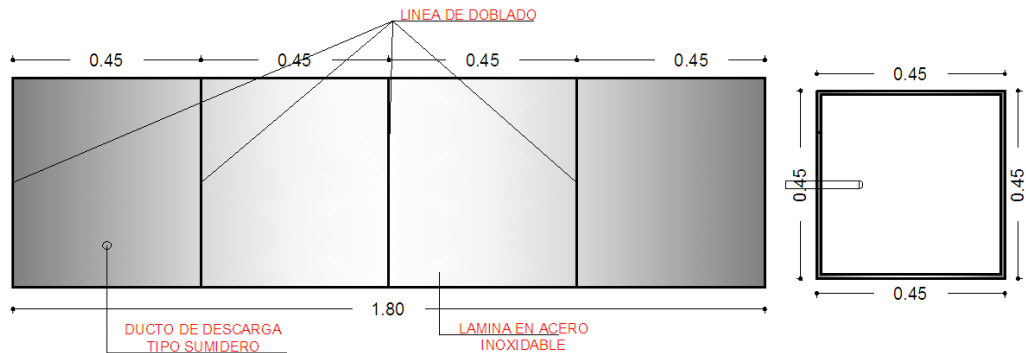
Figura 26. Vista zona de carga en perfil sin doblez y planta con doblez.



Fuente: El Autor.

✓ **Zona de descarga.** Se diseñó y construyó las siguientes dimensiones 0.450 m * 0.450m * 0.45 m (figura 27) es desplazada al borde del chasis, con el fin de obtener material perdido en la cárcava, en el centro de la zona de descarga se le construye un ducto de salida para el agua y poder evitar la alteración del volumen la cual afecta directamente el resultado.

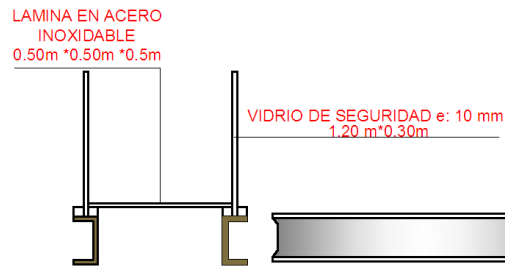
Figura 27. Vista zona de descargas en perfil sin doblez y planta con doblez.



Fuente: El Autor.

✓ **Vidrio de seguridad.** canal para el transporte de partículas se diseñó con el fin de observar el comportamiento del material, cada vez que se cambie la pendiente y medir la altura de pérdida del mismo. con un h: 0.30m, L: 1.20m, e: 0.01 m. la lámina en acero inoxidable presenta un diseño sin interrupciones con el fin de evitar perdida del material. Figura 28.

Figura 28. Canal transporte de partículas



Fuente: El Autor.

✓ **Gato Hidráulico.** la necesidad de generar diferentes pendientes en el sistema y que fuera fácil de manejar hizo que fuese necesario la adición de un gato hidráulico, el cual fue instalado bajo el soporte del canal y muy próximo a la caja de descarga de material, ya que es donde está determinado para que el canal y la caja suban o varíen la pendiente dependiendo de la prueba y el requerimiento. Este equipamiento es un gato hidráulico normal, usado particularmente para reparación mecánica de vehículos el cual se presenta en la Figura 29.

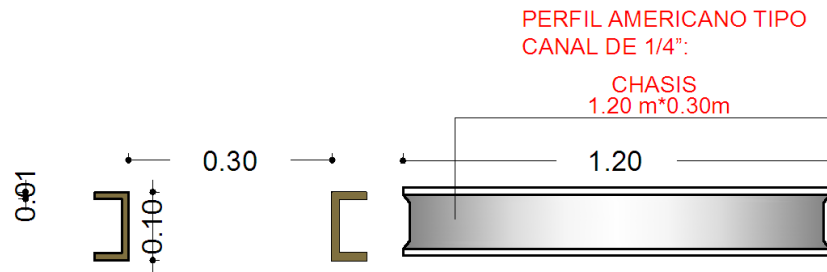
Figura 29. Gato hidráulico



Fuente: El Autor.

✓ **Chasis. Rigidez.** Con el fin de brindar rigidez al modelo se diseñó y construyó un chasis articulado figura 30, en el cual se instala el vidrio de seguridad y perfiles. El chasis funciona articulado y permite variación de pendiente por el gato hidráulico. Se diseñó de esta forma pensando también en las cargas que generaría el material puesto en la zona de carga, ya que al saturarse su peso específico cambiaría lo que provocara un incremento notable y que resistiera esfuerzos generados en el momento de compactar el material.

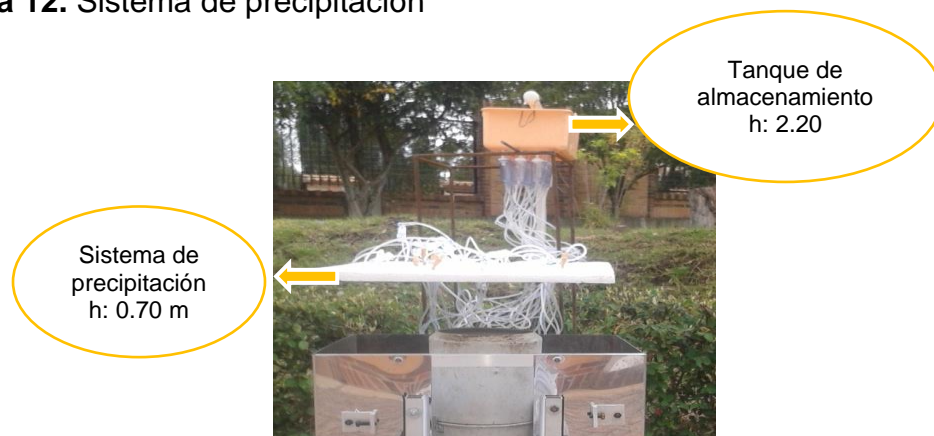
Figura 30. Chasis tipo canal utilizado en la construcción del modelo



Fuente: El Autor.

- ✓ **Sistema de precipitación.** La precipitación es una de las mayores causante de perdida de material en las cárcavas, teniendo en cuenta que Tunja presenta una precipitación bimodal, el caudal generado es causante de inundaciones. Para simular las condiciones y tratar de hacerlas lo más similares se diseñó un sistema de tubería de 1/2" de pvc, a una altura de 2 m, la cual no dio los resultados esperados porque estaba generando la precipitación en forma de chorro, y la precipitación se genera en forma de gotas. Como segunda opción se diseñó un tanque de almacenamiento con una cabeza de agua constante y presento un comportamiento similar al diseño inicial. Por tal motivo en busca de un sistema que generara gotas y con apoyo de ingenieros de la Universidad Santo Tomás, se diseñó un sistema de lluvia con macro goteos (fotografía 12) El cual permite calibrar las gotas a una intensidad minina media y alta.

Fotografía 12. Sistema de precipitación



Fuente: El Autor.

✓ **Pluviómetro :**

Con el fin de trabajar con una precipitación real, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) facilitó un pluviómetro, el cual está diseñado por norma internacional. Con el cual se tomaron precipitaciones de intensidad baja y alta generadas por el sistema de macro goteos, cada precipitación se verificó 4 veces con diferente intensidad por varias horas hasta obtener una precipitación uniforme y a la intensidad pensada para colocar como parte del modelo físico. Fotografía 13

Fotografía 13. Pluviómetro utilizado para medir la precipitación en el modelo



Fuente: El Autor.

7.3 CONSTRUCCION DEL MODELO

La construcción de modelo en su primera etapa fue dirigida por el director y en colaboración de la autora, en la etapa final que incluye la construcción y ensamblaje del vidrio de seguridad y zona de carga y descarga por expertos en sector metalmecánico dirigidos por el señor Oscar Sainea actualmente estudiante de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Santo Tomás de Tunja.

7.4 PROCESO CONSTRUCTIVO

La construcción de modelos reducidos ayudan a predecir el comportamiento de elementos, en Colombia no se encuentra muchas publicaciones acerca de diseño y construcción de modelos. De acuerdo con lo investigado por los autores no se encuentra investigaciones específicas que midan la tasa de pérdida en una cárcava producto de la precipitación o pendiente; por tal causa es conveniente llevar a cabo diseño y construcción de equipos de tipo experimental e investigativo. Para la construcción del modelo se utilizó ayuda profesional de personas especializadas en ensamblaje de equipos.

En la construcción del dispositivo tipo Canal, se utilizaron los siguientes materiales:

- Soporte base perfil americano tipo canal de 1/4": donde se instala toda la estructura.
- Perfil en acero inoxidable en L 1/2 " de 3m
- Perfil cuadrado de 2 cm * 2cm: utilizado para el confinamiento del vidrio.
- 2 láminas de vidrio de seguridad de 1.20 m * 0.3 m
- Tornillos en acero inoxidable: para unir los perfiles
- Perfil de 1* 1/8" (soporte cajas)
- Lamina en acero inoxidable
- Gato hidráulico.
- Empaque para vidrio.
- Tubería de media pulgada.
- Material de la cárcava.
- Pintura anticorrosiva.
- Soldadura eléctrica

Se realizó el siguiente proceso de ensamblaje:

5.3.2. Corte de la base en ángulo perfil tipo americano de 3/4. En la Fotografía 145 se observa el procedimiento de corte de la cara de la base, la cual se hizo con el fin de ensamblar correctamente la base con la zona de carga. Las dimensiones utilizadas para esta parte fueron: L1: 0.50 m * L2: 1.20 m * h: 0.70 m unidas con soldadura, estas medidas tomadas bajo el estudio del servicio que presta el equipo y que fuera de fácil manejo a la hora de modelar y observar la erosión.

Fotografía 14. Corte y soldadura para adecuación de la base.



Fuente: El Autor.

5.3.3 Construcción base en acero inoxidable: en las imágenes se evidencia la construcción final de la base (fotografía 15). Siguiendo el diseño se retira la soldadura, para evitar que la base falle se confina en la parte inferior. Teniendo en

cuenta que el modelo estará en contacto con agua y sol se protege con pintura anticorrosiva la cual es aplicada mediante una pistola de aire. Luego de instalar la pintura se dejó secar por un tiempo determinado para obtener un buen terminado.

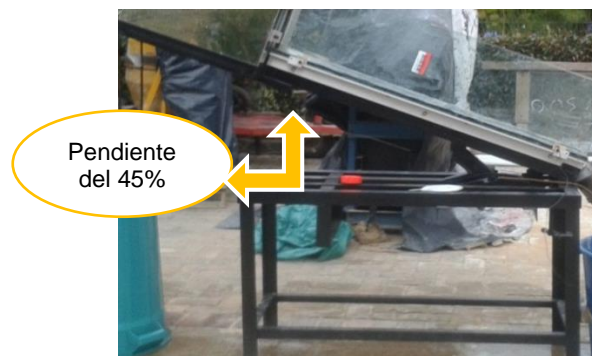
Fotografía 15. Corte y soldadura para adecuación de la base.



Fuente: El Autor.

5.3.3. Construcción de chasis. Se puede observar en la fotografía 16 el chasis se construyó en perfil acero de 1.20m *0.15m, se une a la zona de descarga por medio de un sistema articulado. Y en la zona de carga por medio de un perfil de 1 1/8" con el fin de que funciones como un elemento homogéneo y soportar el peso del material las piezas se unieron con soldadura eléctrica.

Fotografía 16. Chasis con una pendiente de 45°



Fuente: El Autor.

7.4.1 Instalación de vidrio:

El vidrio de seguridad se confina por medio de dos perfiles en aluminio 0.02 m * 0.02 m, el cual cuenta con empaque en caucho para evitar filtraciones o pérdida de material. Los vidrios se instalan con una separación de 0.20 m. Los vidrios utilizados son en vidrio de seguridad. Se verifico antes de iniciar con las pruebas que estuvieran fijos para evitar pérdidas de material y a su vez se alterara la prueba. Ver Fotografía 17.

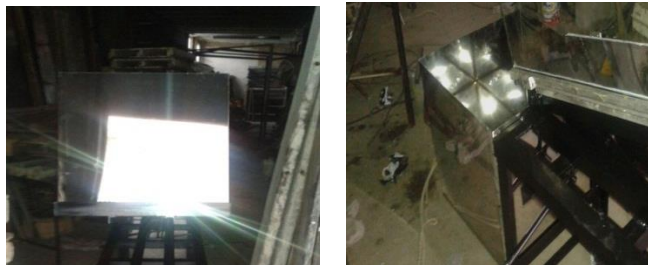
Fotografía 17. Vidrio de seguridad utilizado para simular un canal transportador de partículas.



Fuente: El Autor.

5.3.5 Elaboración de la zona de carga y descarga: Como parte del diseño, se construyó una base en perfil de 1 ^{1/8} (Figura 37). La zona de descarga se unió por medio de tornillos en acero inoxidable con el objeto de que el agua no deteriore la estructura. La zona de carga tiene las mismas dimensiones de la de descarga, la variación va en la posición ya que esta última está 0.15 cm por debajo del nivel del canal.

Fotografía 18. Construcción de zona de carga



Fuente: El Autor.

5.3.6 instalación de gato hidráulico: el modelo se puso a prueba con el gato hidráulico, estimando varias pendientes, comprobando que al colocar la pendiente esta se quedara fija en su sitio y no se presentaran movimientos después de colocar la prueba. Ver fotografía 18.

Fotografía 19. Funcionamiento gato hidráulico en el modelo reducido



Fuente: El Autor.

8. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Para medir la pérdida de material se plantearon 6 tipos de modelos, en los cuales se varia las características geométricas del terreno, se utilizó un terreno plano con diferentes variaciones de pendiente y una precipitación mínima de 60mm/h, en el otro modelo el terreo se instaló y compacto en forma de cárcava con variación en la pendiente y con una intensidad máxima de precipitación de 120mm/h la cual se calibro con el pluviómetro. A continuación se presentan los tipos de modelos realizados.

- Modelo tipo 1: primera prueba se realizó con el material compactado en forma plana, una pendiente de 15% y una intensidad de precipitación mínima de 60 mm/ h.
- Modelo tipo 2: segunda prueba se realizó con el material compactado en forma plana, una pendiente de 25% y una intensidad de precipitación de 60 mm/ h.
- Modelo tipo 3: se realizó con el material compactado en forma plana, una pendiente de 45% y una intensidad de precipitación de 60 mm/ h.
- Modelo tipo 4: se realizó con el material compactado en forma de cárcava, una pendiente de 15% y una intensidad máxima de precipitación de 120 mm/ h.
- Modelo tipo 5: se realizó con el material compactado en forma de cárcava, una pendiente de 45% y una intensidad máxima de precipitación de 120 mm/ h.

8.1 MODELOS TIPO 1.

Se inició a macerar el material algunas partículas venían en tamaños grandes, y no era posible compactarlo dentro de la caja receptora.

Fotografía 20. Maceración de material utilizado en el modelo.



Fuente: El Autor.

Se observa en la Fotografía 20 Cuando el material presento una granulometría uniforme se introdujo en la zona de carga.

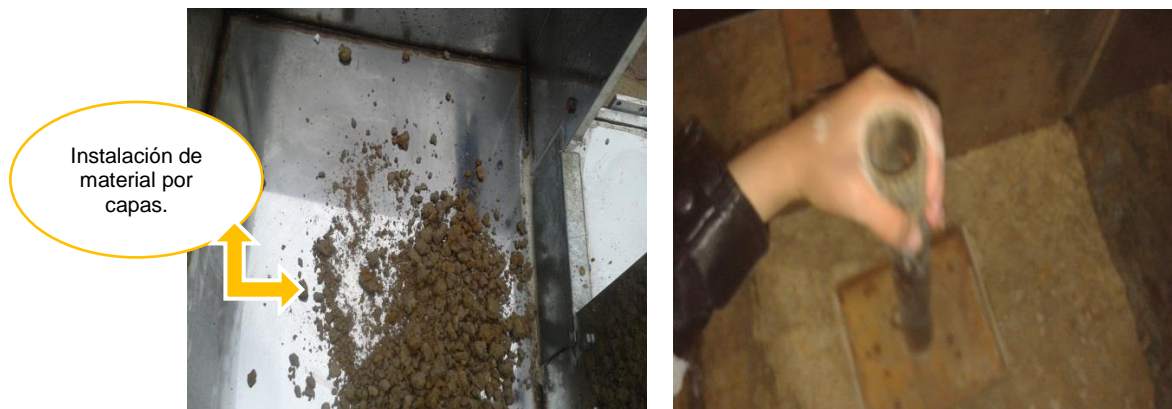
Todo material obtenido de la formación Tilata (TQt), sector Noroccidental de Tunja, variante Bogotá-Sogamoso. Al momento de ser colocado en la zona de carga se pesó. Fotografía 21.

Fotografía 21. Se toma el peso de todo el material instalado en la zona de carga.



El material se instaló y compacto en capas de 0.03 m con pisón manual, hasta alcanzar una densidad de compactación de 1.19 g/cm³ .Fotografía 22 Se compacto a una altura h=0.15 m, con el fin de dejar el terreno al mismo nivel del canal en vidrio.

Fotografía 22. Instalación y Compactación de material capa de 3 cm.



Fuente: El Autor.

El sistema de precipitación se instaló por medio de un sistema de macro goteos conectados a un tanque de almacenamiento continuo, el cual presenta una cabeza constante de 2.20 m del nivel 0.00. El sistema de precipitación se instaló en una lámina de icopor con las siguientes dimensiones 0.50 m * 0.50 m* 0.015 m con el fin de abarcar el área de carga, la cual se encuentra a una distancia de 0.70 m del terreno.

Fotografía 23. Calibración e instalación de precipitación con el pluviómetro



Fuente: El Autor.

En la tabla 11 se muestra los datos de entrada para el modelo 1, tomando como base la densidad obtenida en campo por medio del cono de arena de 1.16 gr/cm³, se apisono el material en el modelo reducido a escala y se tomaron pruebas de densidad con la ayuda de una cazuela a la cual previamente se le había obtenido su peso, área y volumen fotografía 24. En la toma de pruebas se obtuvo un peso unitario del material y el volumen. Con el cual se determinó la densidad que se estaba obteniendo en el material, cuando la densidad del modelo fue muy similar a la obtenida en campo se estableció la condición precisa para empezar a tomar las pruebas.

Tabla 11. Datos con los que se ejecuta la toma de datos para el primer modelo

Modelo 1 reducido a escala		
Descripción	Cantidad	Un
Volumen aproximado	0.0375	m ³
Peso unitario humedad optima	47.21	kg
Densidad - Cono de arena	1.19	g/cm ³
Dimensiones	0.25	m ²
Altura (h) del modelo	0.015	m
Longitud del modelo	0.5	m

Fuente: El Autor.

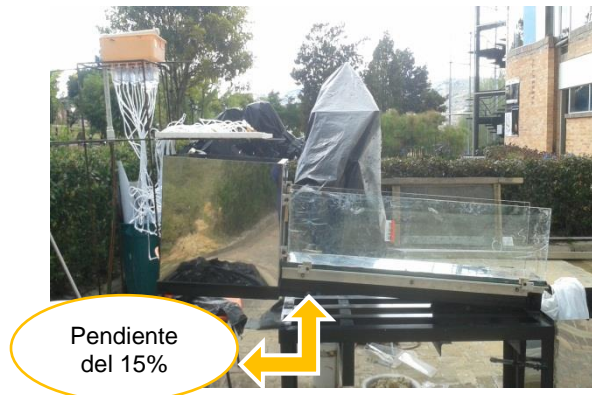
Fotografía 24. Toma de densidad en el material instalado en el modelo.



Fuente: El Autor.

En la fotografía 26 se presenta el modelo con la pendiente ya establecida que para el modelo 1 fue del 15%. Se estableció esta pendiente como valor inicial y se graduó el equipo. Una vez adecuado el equipo se procedió a adecuar el sistema de lluvia exactamente sobre la caja receptora de material y probar las condiciones de altura y lluvia sobre la misma, para que la distribución de la precipitación sobre la caja se presentara uniforme en toda el área.

Fotografía 25. Calibración para toma de muestras del modelo 1.



Fuente: El Autor.

La primera prueba se realizó con una pendiente de 15% y una intensidad de precipitación de 60 mm/h. Una vez ajustada la precipitación y pendiente se dejó llover en el modelo por un transcurso de dos horas, en el cual se observó el comportamiento de la última capa del terreno. El registro de los datos se llevó a cabo para cada uno de los modelos realizados. Al tener la distribución de las gotas sobre el total del área de la caja receptora, se inició a calibrar como tal la precipitación. En la Fotografía 27 se observa la calibración del sistema de simulación de lluvia, para esto se usó el pluviómetro y se tomaron datos cada 10

minutos, haciendo ajustes entre estos hasta obtener la precipitación de 60 mm/hora, que era la primera precipitación de trabajo.

Fotografía 26. Registro de precipitación por medio del pluviómetro realizado para el modelo 1.



Fuente: El Autor.

Al tener calibrado el equipo con la pendiente y la precipitación se inició la toma de pruebas, con precipitación constante de 60 mm/hora y pendiente del 15%. En la primera prueba se evidenció que el material no tuvo un proceso de erosión hasta que la totalidad del terreno se saturó, después de saturado completamente se inició el proceso erosivo y por el canal empezó a pasar material producto de la erosión por lluvia, así mismo el talud simulado empezó a generar pequeñas socavaciones en donde cae la gota. Fotografía 28

Fotografía 27. Pequeñas socavaciones por gotas de lluvia.



Fuente: El Autor.

Con base en los datos presentados en la tabla se observa que el peso de la primera muestra es de 0.031 Kg para una pendiente del 15 % y una precipitación de 60 mm/h. Después de las dos horas de pruebas y de desmontar el equipo se registraron los resultados presentes en la tabla 12.

Tabla 12. Resultado del modelo 1, con precipitación de 60mm/h y pendiente 15%

DATOS OBTENIDOS		
w recipiente # 11	0.3819	kg
W recipiente + muestra	0.410	kg
w de material	0.031	kg

Fuente: El Autor.

Los datos arrojados presentan un total de material recuperado de 0.031 kg, como lo indica fotografía 29 el cual es un valor pequeño para el tiempo, material y pendiente expuestos al ensayo, una de las causas es que para esta prueba el material empezó a erosionar inmediatamente después de saturarse por completo, tiempo en el cual la precipitación caía pero no generaba gran escorrentía y por ende no arrastraba material. Sobre la mitad del tiempo y después de saturarse en su totalidad el terreno se empezaron a ver pequeños canales de agua con material que fluían sobre el canal recolector. Al ser pruebas netamente de experimento es razonable que pase esto, porque el material en campo ha venido sufriendo procesos de desgaste y erosión desde su nacimiento geológico, que puede llevar miles o millones de años y que generan que ante una precipitación estén más expuestos a generar erosión más rápidamente.

Fotografía 28. Material erosionado con una pendiente del 15% y precipitación de 60mm/h



Fuente: El Autor.

8.2 MODELO TIPO 2.

El procedimiento para la toma de muestra es similar al del paso 1. Se instaló el material arcilloso extraído de Pírgua en la zona de carga, se compactó y después

de lograr una densidad similar a la de campo se inició con la simulación de la lluvia, en este punto ya se observa el fenómeno de erosión al estar el suelo saturado por la prueba anterior.

Para esta segunda prueba se le dio una pendiente del 25% (fotografía 30) al modelo reducido a escala, variando significativamente con la pendiente del primer modelo tipo que era del 10%. Con la precipitación calibrada y la pendiente inició la etapa de modelación en la cual se observó el comportamiento por dos horas con lluvia constante.

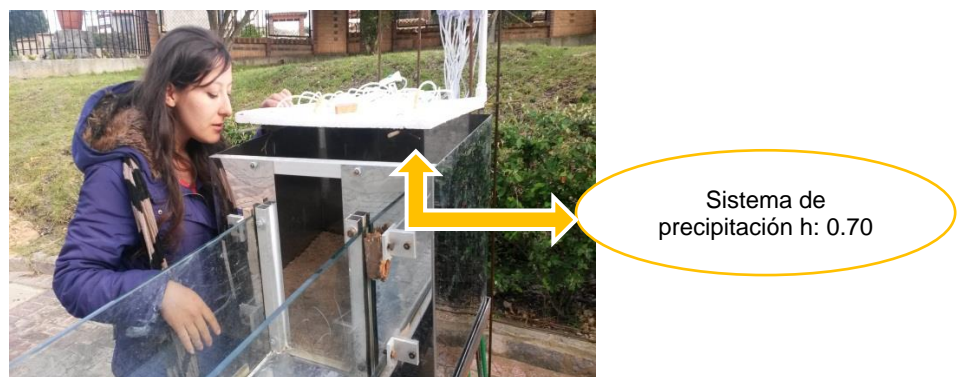
Fotografía 29. Modelo tipo 2 con una pendiente 25%.



Fuente: El Autor.

La distancia de separación del sistema de simulación de la precipitación y el terreno es de 0.70 m, igual al primer modelo, esto con el fin de que solo se varia la pendiente y la precipitación.

Fotografía 30. Sistema de lluvia modelo tipo 2 con una pendiente 25%.



Fuente: El Autor.

Para efectos de este modelo tipo 2 se trabajó con la precipitación de 60 mm/hora, Para verificar que el sistema de goteo siguiera generando la misma precipitación en la fotografía 32 se presenta la re-calibración de la precipitación con el uso del

pluviómetro, dado que broche de seguridad de los macro-gateadores se alcanzaban a abrir y generaba cambios en la precipitación.

Fotografía 31. Verificación y Calibración de la precipitación modelo 2



Fuente: El Autor.

En la tabla 13 se registran los datos de inicio y fin de la prueba para el modelo tipo 2, estos datos son consignados teniendo presente las características del material como y la geometría de la zona de carga.

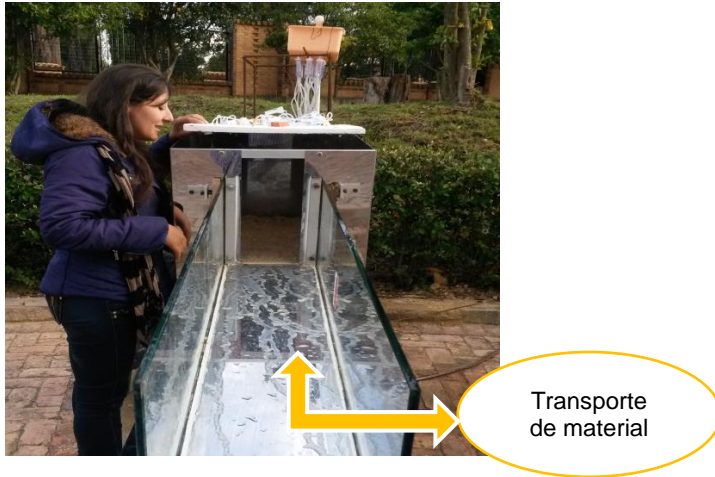
Tabla 13. Datos con los que se ejecuta el segundo modelo

Modelo 2 Reducido a Escala		
Descripción	Cantidad	Un
Volumen aproximado	0.0375	m3
Peso unitario humedad optima	47.45	kg
Densidad - Cono de arena	1.19	g/cm3
Dimensiones	0.25	m2
Altura (h) del modelo	0.015	m
Longitud del modelo	0.5	m

Fuente: El Autor.

Después de tener graduado el equipo y el material compactado se inició la modelación, observándose que la cantidad de material aumento con la variación de la pendiente, pues se generaba aumento en la velocidad de flujo de la escorrentía, provocando con esto el aumento en el arrastre de material hacia el canal. Tomando en cuenta que el material ya tenía un proceso de saturación el fenómeno erosivo se inició en menor tiempo con respecto al modelo 1. Ver fotografía 32.

Fotografía 32. Modelación de la segunda prueba.



Fuente: El Autor.

Otra característica es que al aumentar la pendiente las gotas de agua tenían una menor área de contacto y una mayor velocidad de impacto, provocando una erosión mayor.

Para el modelo tipo 2 se toman datos en un transcurso de dos horas, al terminar las prueba se recolecta en material de la zona de descarga y las partículas presentes el canal. Con el fin de tener la mínima variación en la cantidad de material erosionado se pasa por el Tamiz N° 200 y N° 400 la mezcla de agua y material que se embalzo en la zona de descargue. Se realizó un proceso de secado a 110 ° C en el horno del laboratorio hasta obtener solo la cantidad de material recogido seco. Se tomó el peso y se registró en la tabla 14 los datos obtenidos,

Tabla 14. Resultados de la prueba realizada para el modelo tipo 2.

DATOS OBTENIDOS		
w recipiente # 15	0.401	kg
W recipiente + muestra	0.446	kg
w de material	0.045	kg

Fuente: El Autor.

La cantidad de material recuperado es de 0.045 kg, para el intervalo de dos horas a una precipitación de 60 mmm/hora y una pendiente del 45%. Se evidencia que el aumento de la cantidad de material recuperado, influenciando el cambio principalmente en dos factores; el primero el cambio de la pendiente del terreno y

como segunda medida que el material ya estaba completamente saturado y alargo el tiempo de generación de erosión laminar.

Se está evidenciando que a mayor altura las condiciones erosivas son más fuertes en el terreno y que debido al aumento en la humedad del suelo está provocando procesos erosivos mayores.



8.3 MODELO TIPO 3.

Para la realización de la tercera prueba se repite el procedimiento general, el cual es la compactación y adecuación del material en la zona de carga, la calibración de la precipitación y la adecuación correcta de la pendiente que para esta prueba es del 45% (fotografía 33). Luego de tener listo se procedió al inicio de la modelación y la culminación con la toma de pesos del material saturado.

Fotografía 33. Modelo tipo 3 pendiente 45% y 60 mm/hora de precipitación.



Fuente: El Autor.

El material usado es el mismo de las pruebas anteriores, arcilla de la formación Tirata que aflora en la zona de Pírgua, sobre la doble calzada Bogotá – Sogamoso.

La precipitación fue nuevamente calibrada para comprobar que la intensidad fuera la misma de las pruebas anteriores (60 mm/hora). Al elevar la zona carga se

cambió la altura del tanque de almacenamiento a 2.5 m nivel 0.00 m. Se utilizó el pluviómetro” y se tomaron datos por 10 minutos de la cantidad de precipitación. (Fotografía 34)

Fotografía 34. Verificación y calibración de la precipitación modelo tipo 3



Fuente: El Autor.

Al tener listo cada uno de las anteriores paso se acoplo el modelo nuevamente, ya calibrado todo se dejó listo para el inicio de la tercera prueba de erosión laminar en la formación Tilata de Tunja. Se calibro la altura de caída del agua que fuera de 0.70 m ya que al variar la pendiente esta iba a incidir en que se variara esta distancia.

Fotografía 35 . Toma de pruebas modelo tipo 3



Fuente: El Autor.

En la Tabla 15 se presentan los datos de entrada al modelo para la prueba tipo 3, haciendo evidente las características del material y la compactación de trabajo.

Tabla 15. Datos con los que se ejecuta la toma de datos para el Tercer modelo.

Modelo 3 Reducido a Escala		
Descripción	Cantidad	Un
Volumen aproximado	0.0365	m3
Peso unitario humedad optima	37.35	Kg
Densidad - Cono de arena	1.19	g/cm3
Dimensiones	0.25	m2
Altura (h) del modelo	0.015	M
Longitud del modelo	0.5	M

Fuente: El Autor.

Con el acondicionamiento definitivo del equipo se dio inicio a la simulación de la modelación, se registró tiempo de inicio con el fin de tener las dos horas de prueba exactas. Al estar el suelo saturado por las dos pruebas anteriores y tener una condición de pendiente superior, fue evidente que el proceso de arrastre de material de la ladera artificial hacia el canal era mayor, el punto de contacto de la gota con el suelo era menor y la velocidad de la precipitación sobre el terreno aumento proporcional al aumento de la pendiente. El proceso erosivo se notara más en el talud. La cantidad de material recuperado de la zona de descargue fue superior. En la fotografía 36 se presenta la carga de la prueba para la toma de datos del tercer modelo.

Fotografía 36. Modelación tercera prueba.



Fuente: El Autor.

Terminada la prueba se dio inicio a evaluar la cantidad de material perdida, se sacó el agua contenida en la zona de descargue pasándola por el Tamiz N° 200 y N° 400 respectivamente, el material recuperado fue secado y se valoró su peso

final. En la tabla 16 se presentan los resultados obtenidos en cuanto a pérdida de material por la variación de la pendiente del modelo.

Tabla 16. Resultados la prueba del modelo tipo 3.

Resultados modelo tipo 3		
w recipiente # 4	0.397	kg
W recipiente + muestra	0.448	kg
w de material	0.051	kg

Fuente: El Autor.

Para la prueba tres se registraron una cantidad de pérdida de material mayor a las dos pruebas anteriores, el total de material recuperado fue de 0.051 kg. Se puede evidenciar un aumento en la cantidad de material paralelo al aumento de la pendiente. La variación de la cantidad de material perdido entre la prueba dos y tres es pequeña con respecto a la primera prueba, se puede decir que se relaciona directamente con el grado de saturación del material. (Fotografía 37)

Fotografía 37. Realización prueba en el modelo 3



Fuente: El Autor.

8.4 MODELO TIPO 4

Con el fin de generar condiciones más críticas en el modelo, se retiró el material saturado. En la base se instaló material traído de la formación a una altura de la rasante del canal el cual fue compactado manualmente en capas de 3. Para crear la forma de cárcava se utilizó el material saturado de los anteriores modelos el cual también fue compactado. Como se evidencia fotografía 38 el material a pocas horas de la compactación se contrajo formando pequeñas grietas en el terreno. Material compactado en forma de cárcava con presencia de grietas.

Fotografía 38. Instalación de material en forma de cárcava prueba modelo 3



Fuente: El Autor.

El material de la formación Tilata (TQt), instalado en la base de la zona de carga a medida se compactaba por capas se pesó.

Fotografía 39. Peso de todo el material instalado en la zona de carga.

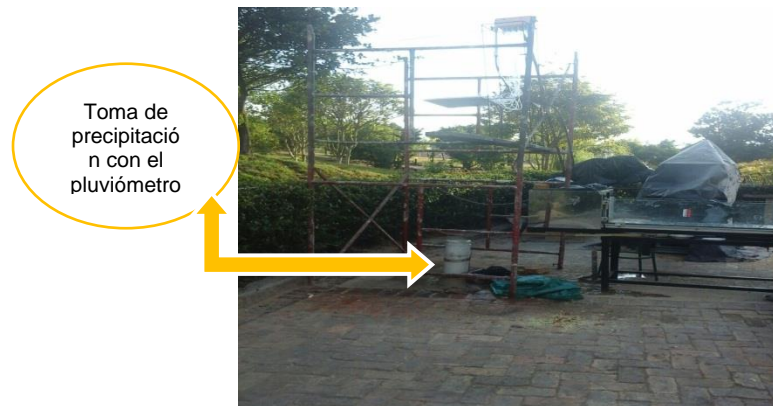


Fuente: El Autor.

El sistema de precipitación se instaló por medio de un sistema de macro goteos conectados a un tanque de almacenamiento continuo, el cual presenta una cabeza constante de 3.50 m del nivel 0.00.

La lluvia simulado con macro – goteos, se instalaron en una lámina de icopor con las siguientes dimensiones 0.50 m * 0.50 m* 0.015 m con el fin de abarcar el área de carga, la cual se encuentra a una distancia de 1.50 m del terreno.

Fotografía 40. Calibración e instalación de precipitación con el pluviómetro



Fuente: El Autor.

En la tabla 17 se muestra los datos de entrada para el modelo 4, tomando como base la densidad obtenida en campo por medio del cono de arena de 1.16 gr/cm³, se apisono el material en el modelo reducido a escala y se tomaron pruebas de densidad con la ayuda de una cazuela a la cual previamente se le había obtenido su peso, área y volumen fotografía 41. En la toma de pruebas se obtuvo un peso unitario del material y el volumen. Con el cual se determinó la densidad que se estaba obteniendo en el material, cuando la densidad del modelo fue muy similar a la obtenida en campo se estableció la condición precisa para empezar a tomar las pruebas.

Tabla 17. Datos con los que se ejecuta la toma de datos para el primer modelo

Modelo 4 reducido a escala		
Descripción	Cantidad	Un
Volumen aproximado	0.0375	m ³
Peso unitario humedad optima	68.21	kg
Densidad - Cono de arena	1.19	g/cm ³
Dimensiones	0.25	m ²
Altura (h) del modelo	0.015	m
Longitud del modelo	0.5	m

Fuente: El Autor.

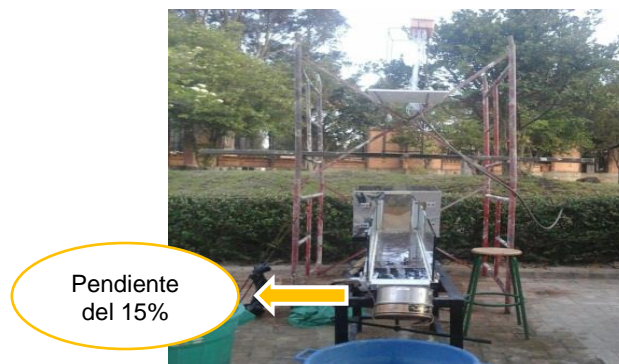
Fotografía 41. Toma de densidad en el material instalado en el modelo.



Fuente: El Autor.

En la fotografía 42 se presenta el modelo con la pendiente ya establecida que para el modelo 1 fue del 15%. Se estableció esta pendiente como valor inicial y se graduó el equipo. Una vez adecuado el equipo se procedió a adecuar el sistema de lluvia exactamente sobre la caja receptora de material y probar las condiciones de altura y lluvia sobre la misma, para que la distribución de la precipitación sobre la caja se presentara uniforme en toda el área.

Fotografía 42. Calibración para toma de muestras del modelo 4.



Fuente: El Autor.

La primera prueba se realizó con una pendiente de 15% y una intensidad de precipitación de 120 mm/ h. (Fotografía 43) Una vez ajustada la precipitación y pendiente se inició la toma de la prueba por un trascurso de dos horas, en el cual se observó el comportamiento de la última capa del terreno. Al tener la distribución de las gotas sobre el total del área de la caja receptora, se inició a calibrar como tal la precipitación. En la Fotografía 27 se observa la

calibración del sistema de simulación de lluvia, para esto se usó el pluviómetro y se tomaron datos cada 10 minutos, haciendo ajustes entre estos hasta obtener la precipitación de 60 mm/hora, que era la primera precipitación de trabajo.

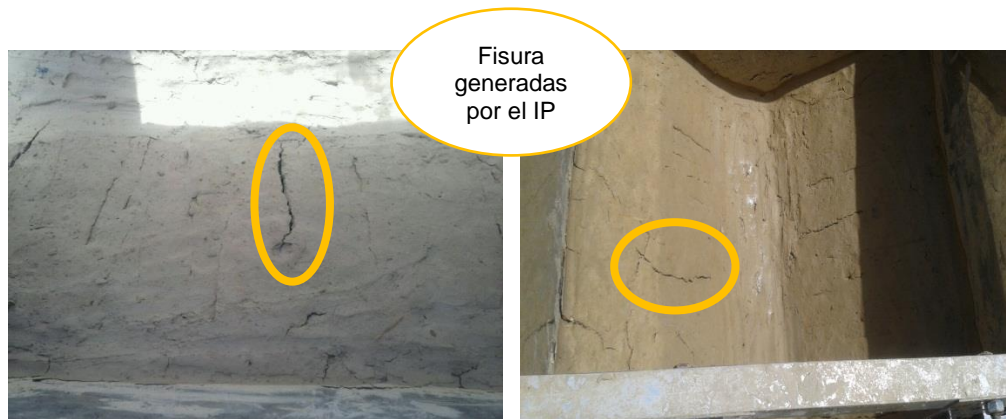
Fotografía 43. Toma de lluvia por medio del pluviómetro. Realizado para el modelo 3



Fuente: El Autor.

Se inició la toma de datos con una precipitación constante de 120 mm/hora y una pendiente del 15%. Las cuales se tomaron en un trascurso de dos horas, el proceso de erosión inicio más rápido debido a que el material presento fisuras una vez instalado. Estas aumentaron con la precipitación. (Ver Fotografía 44).

Fotografía 44. Pequeñas socavaciones ´por gotas de lluvia.



Fuente: El Autor.

Con base en los datos presentados en la tabla se observa que el peso de la primera muestra es de 0.031 Kg para una pendiente del 15 % y una precipitación de 60 mm/h.

Después de las dos horas de pruebas y de desmontar el equipo se registraron los resultados presentes en la tabla 18.

Tabla 18. Resultado toma de datos modelo 4.

DATOS OBTENIDOS		
w recipiente # 11	0.342	kg
W recipiente + muestra	0.410	kg
w de material	0.068	kg

Fuente: El Autor.

Los datos arrojados presentan un total de material recuperado de 0.068 kg, como lo indica tabla 18, el cual es un valor pequeño para el tiempo, material y pendiente expuestos al ensayo, una de las causas es que para esta prueba el material empezó a erosionar inmediatamente después de saturarse por completo, tiempo en el cual la precipitación caía pero no generaba gran escorrentía y por ende no arrastraba material. Sobre la mitad del tiempo y después de saturarse en su totalidad el terreno se empezaron a ver pequeños canales de agua con material que fluían sobre el canal recolector. Al ser pruebas netamente de experimento es razonable que pase esto, porque el material en campo ha venido sufriendo procesos de desgaste y erosión desde su nacimiento geológico, que puede llevar miles o millones de años y que generan que ante una precipitación estén más expuestos a generar erosión más rápidamente.

Fotografía 45. Material erosionado con una pendiente del 15% y precipitación de 120mm/h



Fuente: El Autor.

8.5 MODELO TIPO 5

Para el modelo 5 se trabajó con una precipitación de 120 mm/hora, una pendiente del 45% y una altura del tanque de almacenamiento de 3.80 metros y una caída libre a la caída de la precipitación de 1.00 metro. Este modelo presenta las condiciones más críticas debido a que el suelo de trabajo está previamente saturado, las fisuras son de alrededor de 0.01 m. de ancho, se supone que por las condiciones mencionadas anteriormente el volumen de material erosionado debería ser mayor. (Fotografía 46)

Fotografía 46. Calibración pendiente y precipitación modelo 5.



Fuente: El Autor.

Con las condiciones previamente establecidas para el modelo 5, se realizó el proceso de calibración de la precipitación, la cual debería ser igual a 120 mm/hora, calibrada con el pluviómetro, se reajustó la pendiente del canal que estuviese dando el 45% requerido.

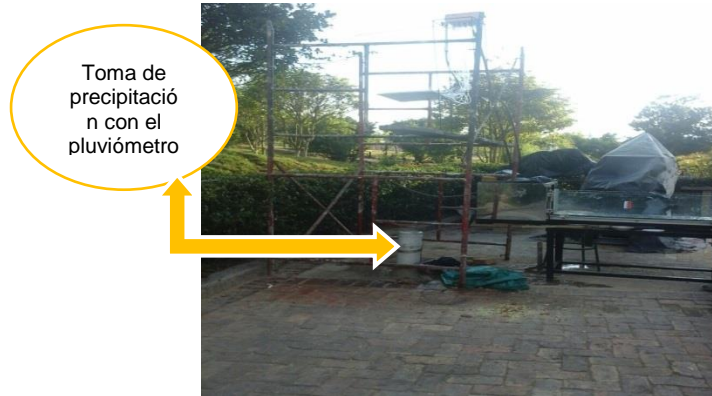
Fotografía 47. Instalación de material en forma de cárcava prueba modelo 3



Fuente: El Autor.

El sistema de precipitación se simuló en las mismas condiciones de modelo tipo 4. Con macro – goteos, se encuentra a una distancia de 1.50 m del terreno. El tanque de almacenamiento presenta una cabeza constante de 3.80 m del nivel 0.00 y una caída del agua de 1.00m. (Fotografía 48)

Fotografía 48 Calibración e instalación de precipitación con el pluviómetro.



Fuente: El Autor.

En la tabla 19 se muestra los datos de entrada para el modelo 5, tomando como base la densidad obtenida en campo por medio del cono de arena de 1.16 gr/cm³. En la toma de pruebas se obtuvo un peso unitario del material y el volumen.

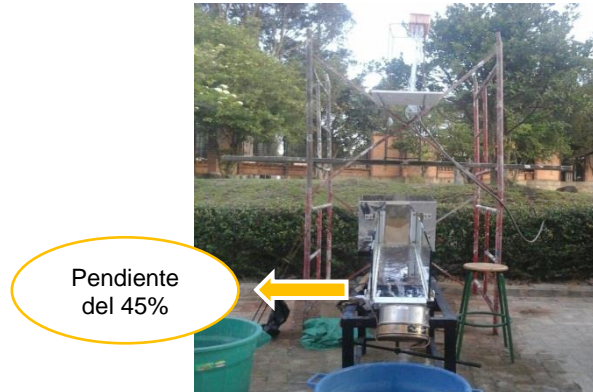
Tabla 19. Datos con los que se ejecuta la toma de datos para el primer modelo

Modelo 5 reducido a escala		
Descripción	Cantidad	Un
Volumen aproximado	0.0375	m ³
Peso unitario humedad optima	68.21	kg
Densidad - Cono de arena	1.19	g/cm ³
Dimensiones	0.25	m ²
Altura (h) del modelo	0.015	m
Longitud del modelo	0.5	m

Fuente: El Autor.

En la fotografía 49 se presenta el modelo con la pendiente 45%. Una vez adecuado el equipo se procedió a adecuar el sistema de lluvia exactamente sobre la caja receptora de material y probar las condiciones de altura y lluvia sobre la misma, para que la distribución de la precipitación sobre la caja se presentara uniforme en toda el área.

Fotografía 49. Calibración para toma de muestras del modelo 4.



Fuente: El Autor.

La primera prueba se realizó con una pendiente de 45% y una intensidad de precipitación de 120 mm/ h. (Fotografía 50). Una vez ajustada la precipitación y pendiente se inició la toma de la prueba por un trascurso de dos horas, en el cual se observó el comportamiento de la última capa del terreno. En la Fotografía 50 se observa la calibración del sistema de simulación de lluvia, para esto se usó el pluviómetro.

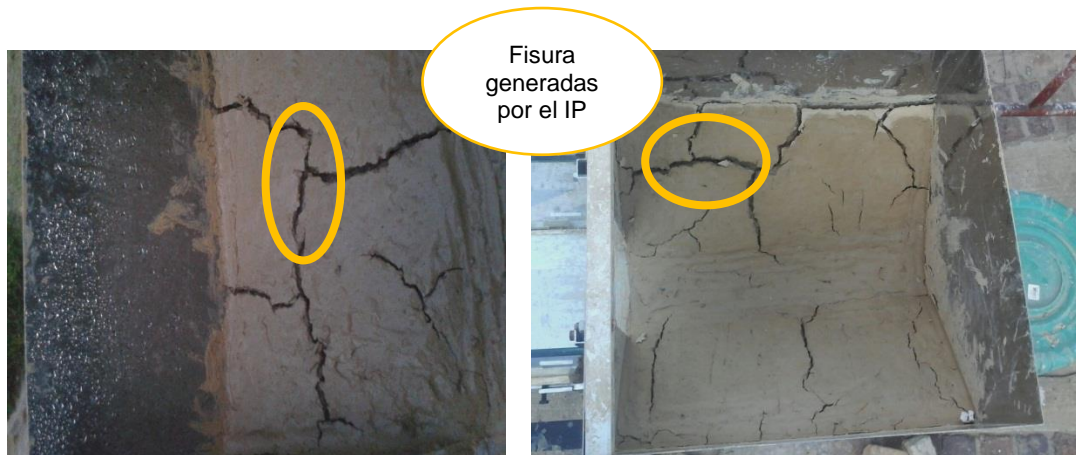
Fotografía 50. Toma de lluvia por medio del pluviómetro. Realizado para el modelo 5



Fuente: El Autor.

Se inició la toma de datos con una precipitación constante de 120 mm/hora y una pendiente de 45% (Ver Fotografía 51).

Fotografía 51. Pequeñas socavaciones por gotas de lluvia.



Fuente: El Autor.

Tabla 20. Resultado toma de datos modelo 5.

DATOS OBTENIDOS		
w recipiente # 11	0.342	kg
W recipiente + muestra	0.410	kg
w de material	1.02	kg

Fuente: El Autor.

Los datos arrojados presentan un total de material recuperado de 1.02 kg, como lo indica tabla 20 es un resultado pequeño, que el proceso erosivo en la formación es una acumulación de años. Y la prueba se realizó por dos horas.

8.6 CALCULO DE LIMITES DE ATTERBERG

Como parte del estudio de caracterización de la zona se realizaron seis sondeos a profundidades de un metro, el cual tenía como objeto tomar pruebas para la realización de ensayos de contenido de humedad y de caracterización mediante límites de Atterberg.

1. CUADRO DE RESULTADOS						
Sondeo	1	2	3	4	5	6
Profundidad (m)	0.50 - 1.00	0.60- 1.00	0.50 - 1.00	0.50- 1.00	0.50 - 1.00	0.50 - 1.00
Contenido de humedad (%)	42.58	31.55	26.73	27.36	29.68	32.52
Limite Liquido	44.40	43.90	44.02	42.20	46.90	41.80
Limite Plástico	19.86	12.72	17.81	13.95	19.16	16.75
Índice de plasticidad	24.54	31.18	26.21	28.25	27.74	25.05
Clasificación del material	CL	CL	CL	CL	CL	CL

Fuente: El Autor.

Para tal efecto se recogieron las muestras y fueron llevadas al laboratorio, se procedió con la realización del ensayo de contenido de humedad para cada una, tomando una cantidad de muestra, pesándola y llevando el material horno por 24 horas a 110 °C, pasado el tiempo se tomaron pesos y se determinó el porcentaje de humedad presente en el material. Luego se realizaron los límites de Atterberg siguiendo los pasos establecidos en la norma I.N.V.E-125 e I.N.V.E-126, esto con el fin de caracterizar el material.

Para todos los casos la composición principal fue arcilla, propicia de la formación Tilata. Esta arcilla presenta un índice de baja plasticidad, lo que la hace muy variable con la presencia de agua, se puede presentar un cambio de estado de semisólida a líquida, si la arcilla es expuesta a condiciones de humedad altas.

Al presentarse un cambio de estado en la composición de la arcilla con la presencia de humedad altas, es más fácil que los fenómenos erosivos causados por la escorrentía arrastren material y se empiecen a evidenciar surcos y muy seguramente cárcavas con el pasar del tiempo.

Por otro lado si no se alcanza a presentar el cambio físico de la arcilla, el material ya habrá presentado un proceso de desgaste, que lo hará más susceptible a sufrir cambios ante la presencia de agentes externos como el viento y la lluvia.

Los altos valores de índice de plasticidad y de limite líquido ocasionan o presentan en el material procesos de agrietamientos, algo que se pudo evidenciar durante el proceso de toma de muestras cuando al estar colocando la arcilla saturada en el modelo a escala, en un momento de tiempo la arcilla se endureció y grieto,

9. CONCLUSIONES

- Las condiciones presentes como precipitación, viento, tempera, características del suelo, morfología de terreno, altas pendientes además del uso del suelo; en las cárcavas de la formación Tilata (TQt) son críticas por tal motivo el proceso erosivo es alto, lo cual ocasionó que el material instalado en el modelo presentara grietas y mayor desprendimiento del material al momento de generarle lluvia.
- Evaluando los resultados obtenidos en función de valores de precipitación y pendiente del modelo se deduce que los fenómenos erosivos afectan de forma más significativa los taludes con altas pendientes como se observa en los resultados obtenidos del modelo 4 y 5 los cuales trabajaron con una pendiente del 45% y generaron una pérdida de 0.068 gr y 1.02 gr respectivamente, en comparación con la prueba del modelo 1 con una pendiente del 15% y la del modelo 2 con una pendiente 25 % las cuales generaron una pérdida de 0.031 y 0.045 gr.
- Se debe tener en cuenta que el proceso erosivo en las cárcavas de la formación, llevan años erosionándose. Y en el modelo se están evaluando por periodos de 2 horas, por tal causa los resultados de perdida de material son tan pequeños.
- La primera prueba realizada en el modelo presenta una pérdida 0.038 g con una precipitación de 60 mmm/hora y una pendiente del 15 La cantidad de material recuperado en el segundo modelo es de 0.045 el intervalo de dos horas a una precipitación de 60 mmm/hora y una pendiente del 45%. Se evidencia que el aumento de la cantidad de material recuperado, influenciando el cambio principalmente en dos factores; el primero el cambio de la pendiente del terreno y como segunda medida que el material ya estaba completamente saturado
- Se está evidenciando que a mayor altura las condiciones erosivas son más fuertes en el terreno y que debido al aumento en la humedad del suelo está provocando procesos erosivos mayores.
- En los modelos 4 y 5 se aumenta la intensidad de precipitación lo cual ocasiona que la gota penetre la estructura del suelo, abarcando mayor área de desprendimiento un aumento en la tasa de pérdida del material.

- El diseño y construcción del modelo es una investigación preliminar en la cual se presentaron diversas modificaciones, debido a que en el momento de ensamblar no generaban el comportamiento esperados. En el sistema de precipitación se generaron tres diseños, de los cuales en una serie de pruebas los dos primeros no cumplían los resultados.
- Es importante resaltar que la pérdida de material generada en situ presenta un comportamiento diferente al modelo de la investigación, debido al que el proceso erosivo es una acumulación de varios años. El modelo busca generar un posible comportamiento además de hacer recomendaciones para calibrar datos que inciden directamente en los resultados.

10. RECOMENDACIONES

1. Realizar modelos en los cuales se evalué el comportamiento de dos materiales obtenidos en las cárcavas, con el fin de analizar el modelo sometido en las mismas condiciones de pendiente y precipitación y conocer sus variaciones la tasa de pérdida del material.
2. teniendo en cuenta que el trabajo de grado es una investigación preliminar, de un problema latente de la ciudad, la cual es altamente erosionable se recomienda usar el modelo en la evaluación de otros materiales y cárcavas de la ciudad.
3. Cuando se diseñan y construyen modelos existen variables que intervienen y son desconocidas, por lo tanto se necesitan investigaciones en donde se calibren datos. Con el fin de obtener parámetros más reales

11. GLOSARIO

CÁRCAVA: Es una zanja producto de la erosión que generalmente sigue la pendiente máxima del terreno y constituye un cauce natural en donde se concentra y corre el agua proveniente de las lluvias. El agua que corre por la cárcava arrastra gran cantidad de partículas del suelo.¹

EROSIÓN comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento. La erosión puede ser generada tanto por el agua como por el viento.²

EROSIÓN INTERNA: El flujo de agua a través del suelo puede transportar partículas formando cavernas internas dentro de la tierra.³

EROSIÓN EÓLICA: Causada por el viento en terrenos sueltos. Posiblemente de poca importancia en la mayoría de áreas agrícolas del país.⁴

EROSIÓN HÍDRICA: Se presenta cuando las lluvias golpean la superficie del suelo y dicho impacto ocasiona desprendimiento y desagregación de las partículas del mismo. Posterior a ello, ocurre el arrastre por el agua de escurrimiento; lo que en pocas palabras significa trabajo de la lluvia en una vertiente.⁴

EROSIÓN PLUVIAL: Como lo indican los autores citados, una parte del proceso se debe a la salpicadura, es decir, al golpe de las gotas de lluvia sobre el suelo desnudo. La fuerza ejercida por este proceso desprende las partículas de los agregados y las dispersan.⁴

¹ MARTÍNEZ Mario RUBIO Erasmo OROPEZA José PALACIOS Carlos: Control de Cárcavas: Secretaría de agricultura ganadería desarrollo rural pesca y alimentación: Estado de México. 2009

² DÍAZ, Claudia Universidad nacional de Colombia. Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización [en línea] <<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingeiinv/article/view/26390/33647>> [Citado 10 Noviembre 2014]

1.1.1 **3** Control de Erosión en Zonas Tropicales. Tipos de erosión, [en línea]. <<http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/9-control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html?download=52:257-capitulo2-tiposdeerosionysucontrol>> [citado en 25 Octubre 2014]

⁴ Universidad de Manizales. Degradación del suelo: Erosión eólica. [en línea] <<http://cedum.umanizales.edu.co/mds/ch1/electivas/mirs/unidad3/pdf/unidad3.pdf>> [citado en 25 Octubre 2014]

EROSIÓN ESCURRIMIENTO DIFUSO: Son cortos desplazamientos de las partículas o formación de pequeños surcos temporales. Es denominada erosión “normal”⁴

EROSIÓN LAMINAR: Es un arrastre uniforme sobre el terreno, en el que se detecta la remoción de capas de suelo muy delgadas. En principio es difícil de percibir, pero cuando se advierte en definitiva el problema, sólo queda una capa muy delgada del primer horizonte del suelo o la manifestación de los horizontes sub superficiales y las raíces de las plantas quedan al descubierto.⁴

EROSIÓN EN SURCOS: Ocasionada por la concentración del escurrimiento por algunos canales más o menos paralelos e independientes entre sí. Estos surcos pueden borrarse temporalmente con herramientas o pueden ser durables hasta el punto de formar cárcavas.⁴

EROSIÓN EN CÁRCAVAS: Se presenta cuando el escurrimiento es más concentrado y las irregularidad es del terreno permiten la unión de varios surcos, que finalmente dan lugar a la aparición de zanjas de gran tamaño, denominadas cárcavas.⁴

EROSIÓN REMOTANTE: También llamada agresiva, se da cuando los surcos y las cárcavas preexistentes retrocede hacia la cima de las laderas por aumento en su tamaño y longitud.⁴

REMOCIÓN EN MASA: Es un movimiento en conjunto de partículas. Son definidos como el desplazamiento de masa de suelo o roca causados por el exceso de agua en el terreno y por efecto de la fuerza de gravedad. Este fenómeno es recurrente y de gran importancia en Colombia, debido por el impacto que tienen en las pérdidas económicas y humanas todos los años.⁴

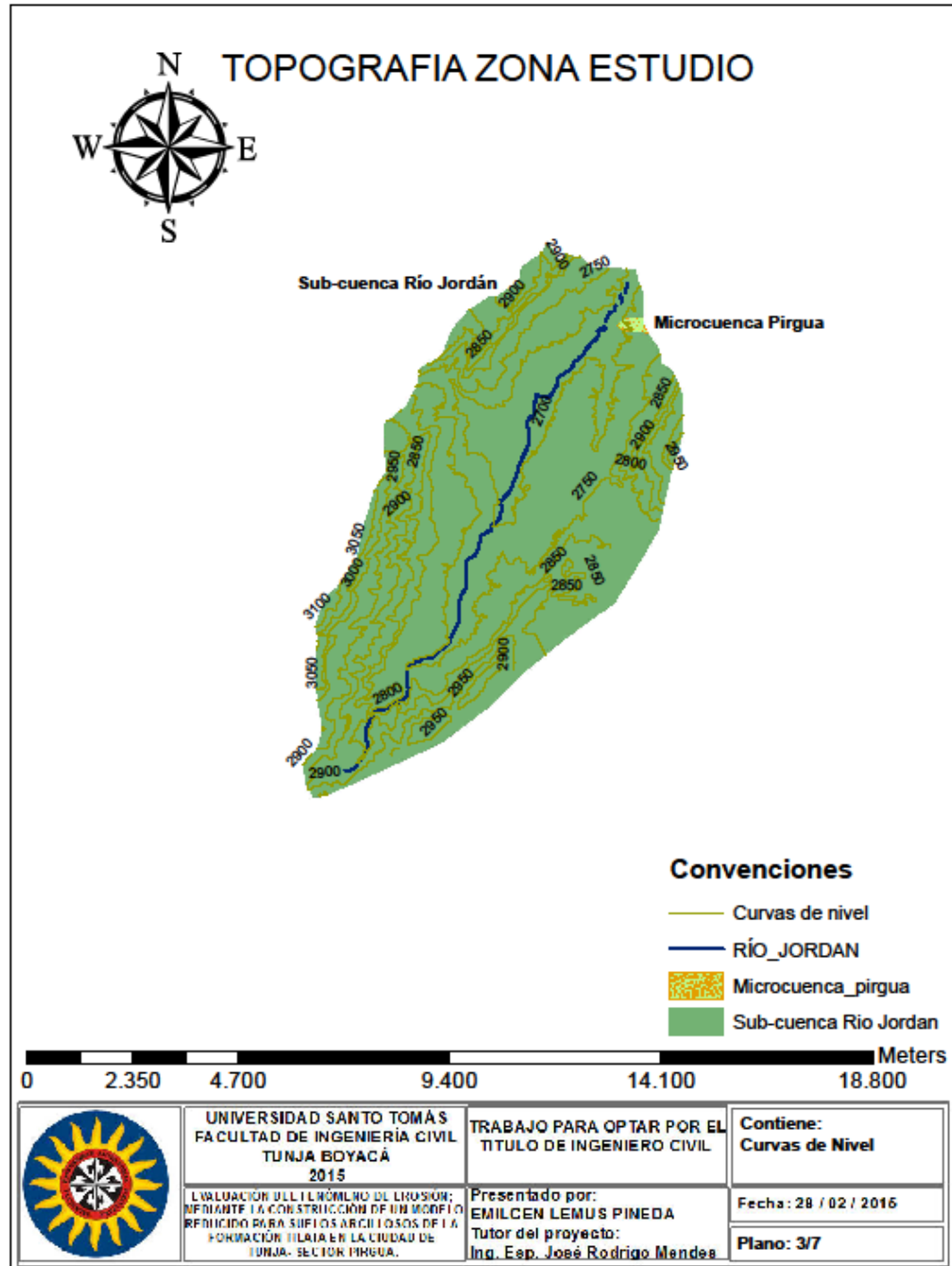
La remoción en masa puede afectar toda clase de materiales, pero hay unos menos susceptibles que otros y ello está condicionado por su grado de cohesión, fricción interna, presencia de fallas, alternancia de materia les con diferente grado de dureza o permeabilidad, entre otras condiciones.⁴

DESLIZAMIENTOS: Son rápidos movimientos de suelo y ocurren por incremento en el peso de la masa. El agua al infiltrarse encuentra capas inferiores

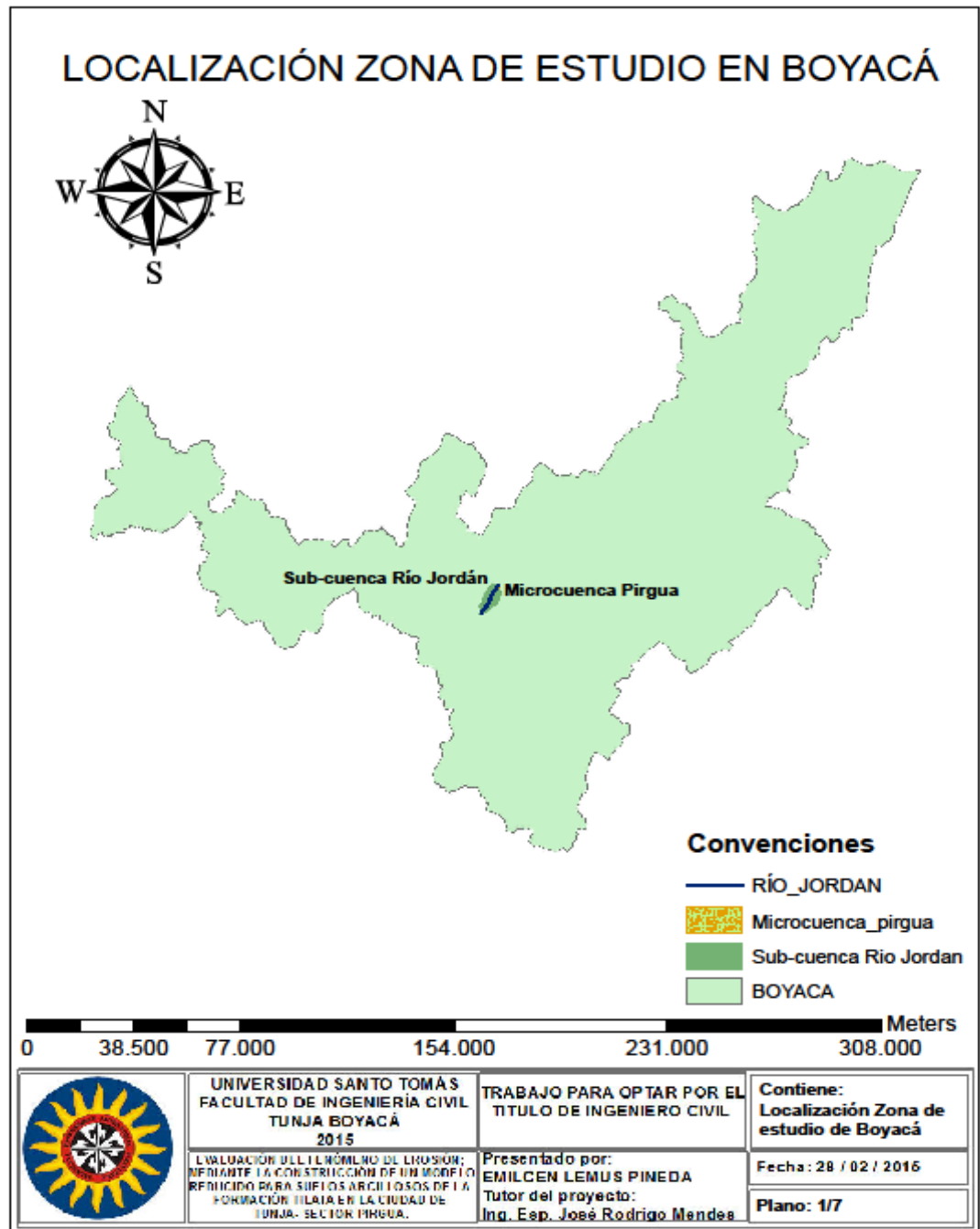
impermeables, y ésta lubrica la superficie de contacto de ambas capas, ocasionando su separación. Existen deslizamientos rotacionales (la parte alta da vuelta y se acomoda en la parte baja) o transaccionales, cuando todo el material se mueve sobre una superficie plana; en este caso las masas no se desintegran. ⁴

LA ARCILLA: es un suelo constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura. ⁴

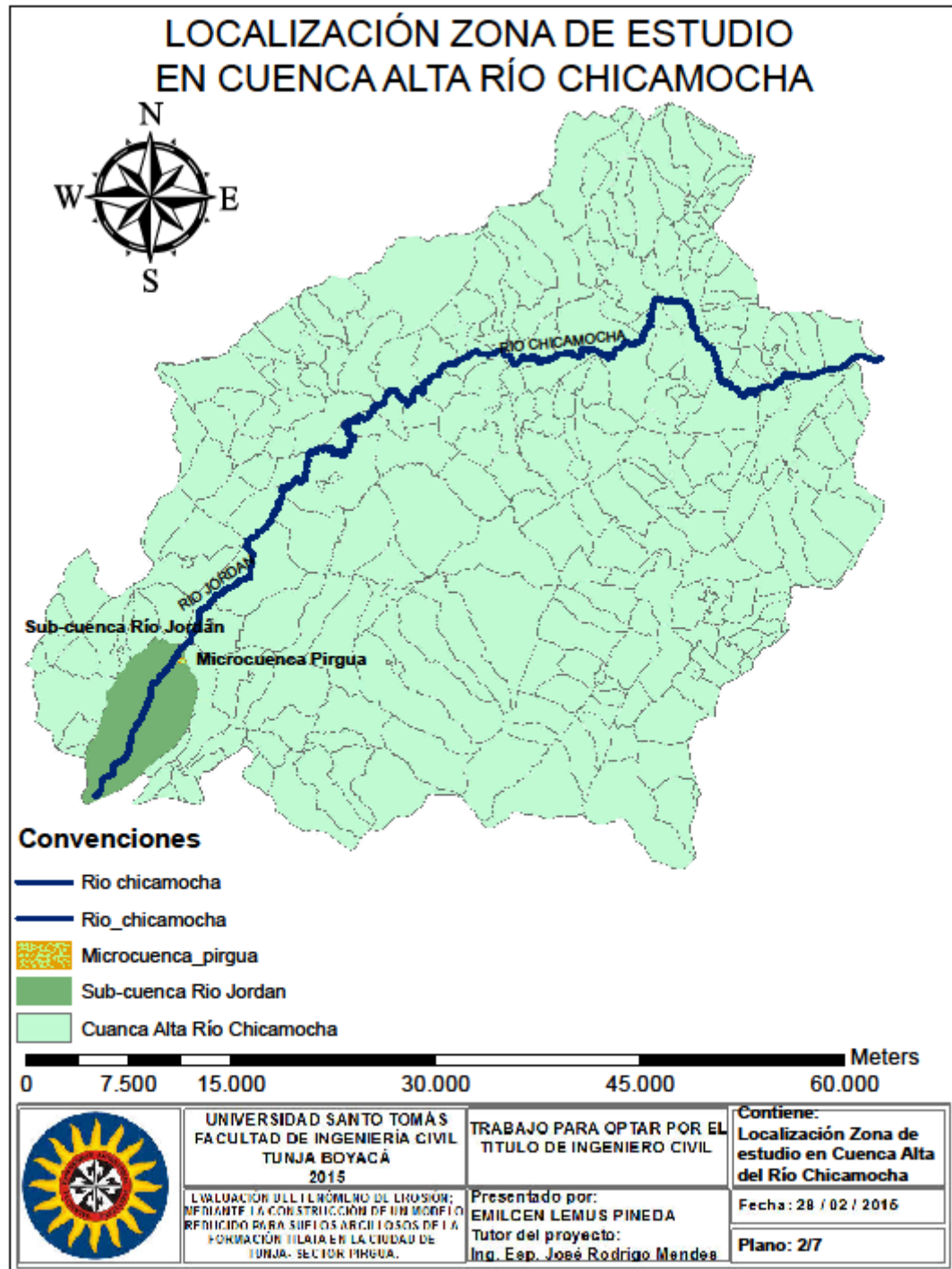
Anexo 1 Topografía cuenca rio Jordán



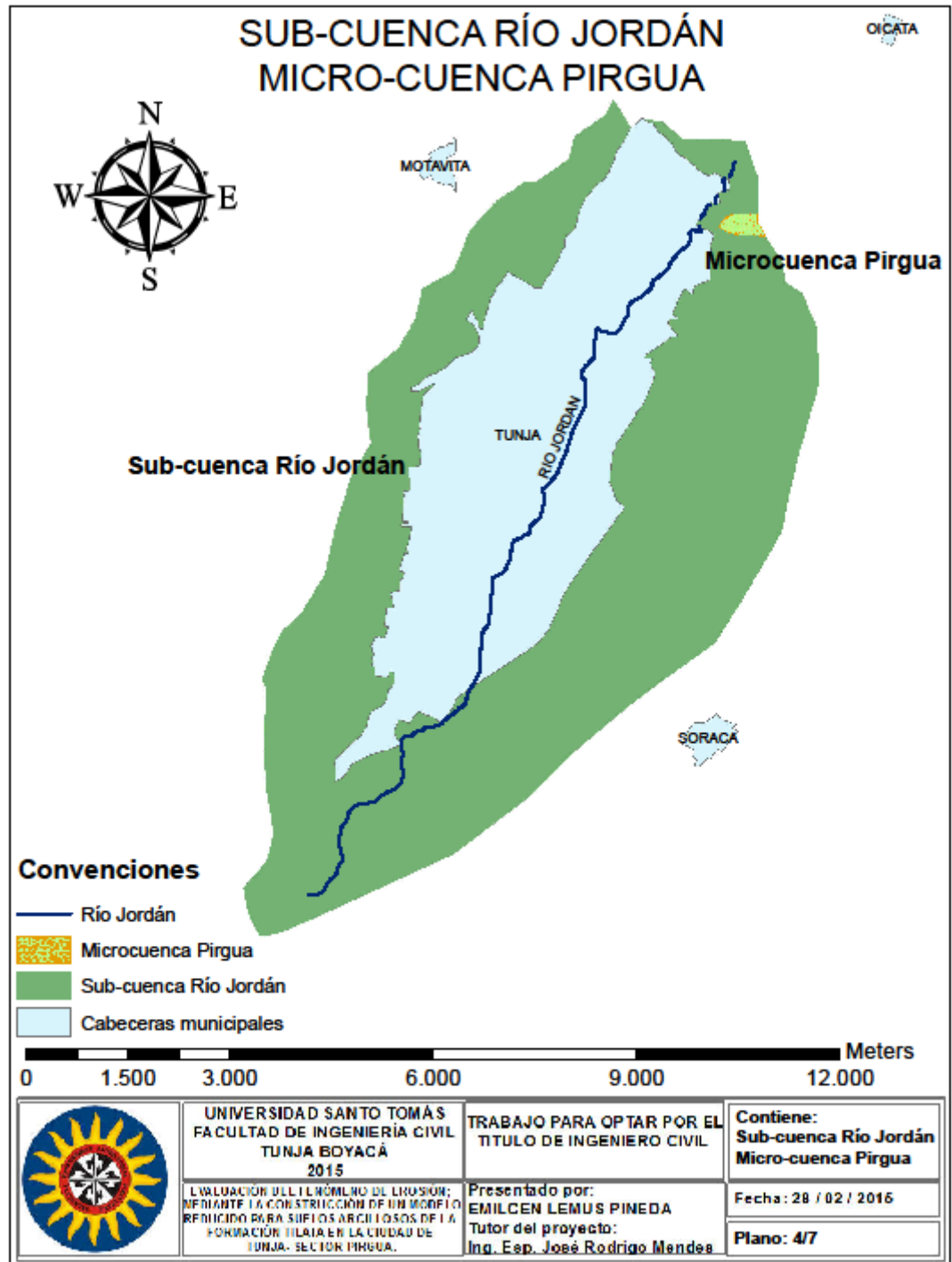
Anexo 2 . Localización zona de estudio



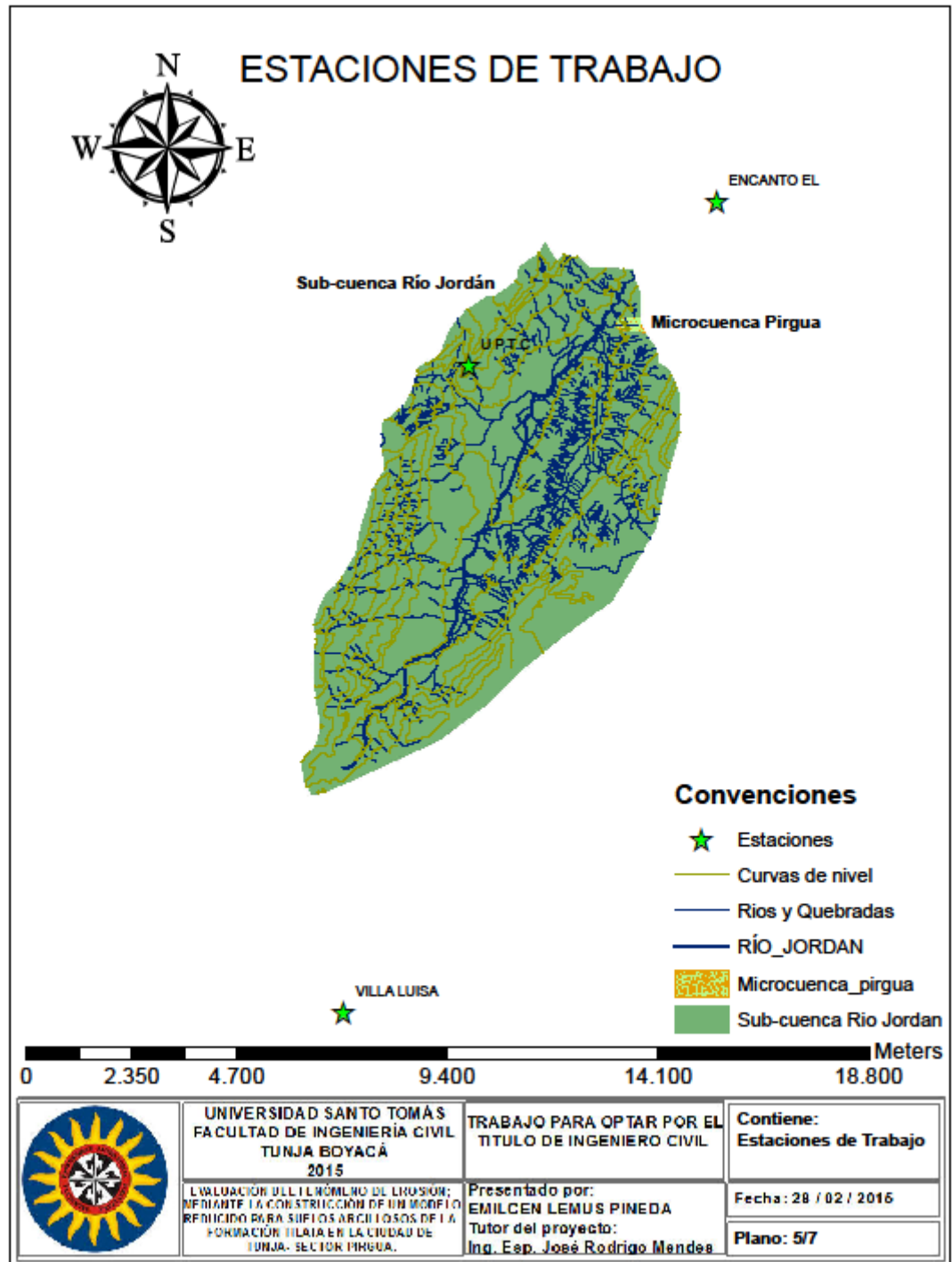
Anexo 3. Localización zona de estudio en cuenca alta del chicamocho.



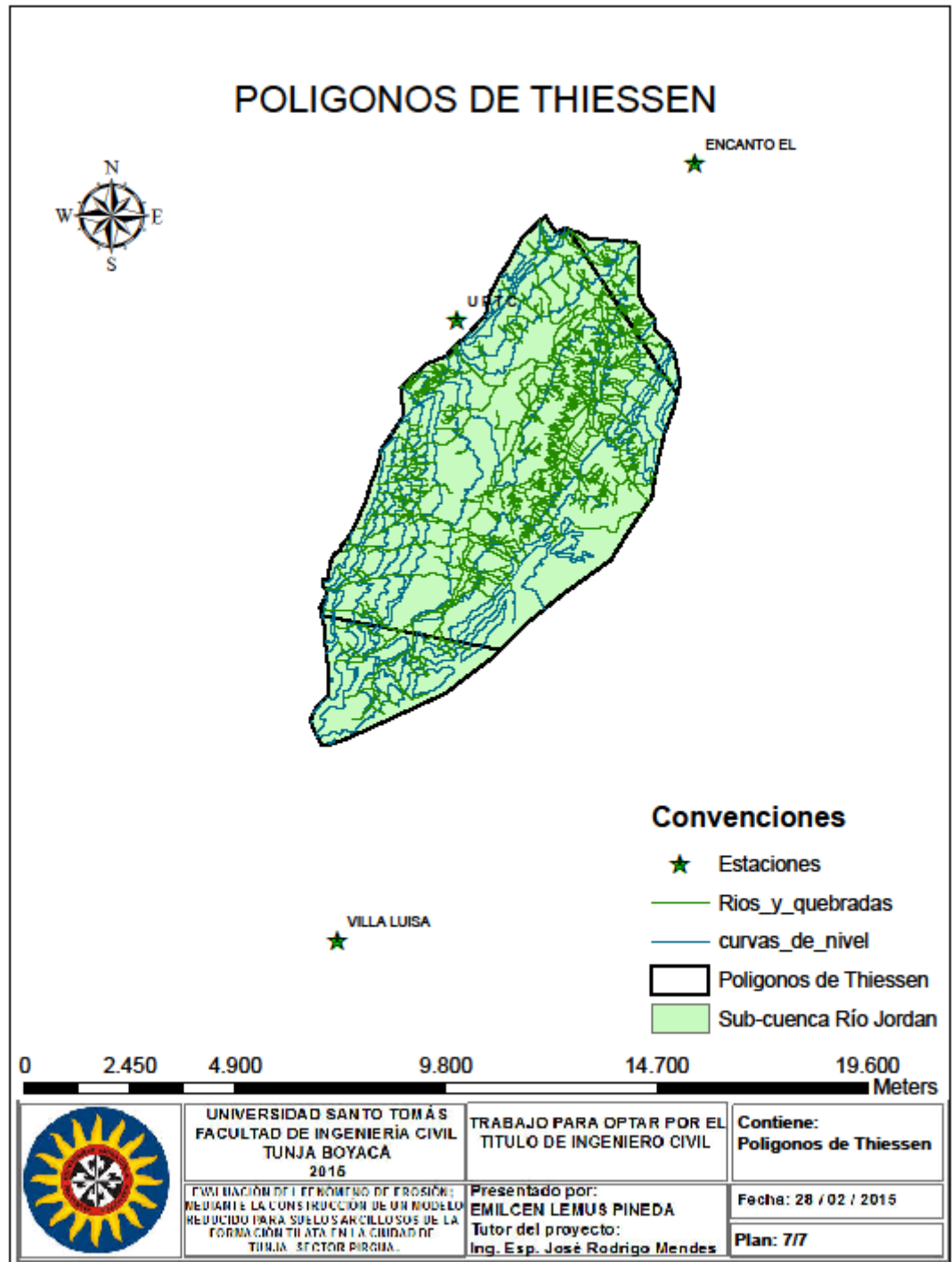
Anexo 4.sub cuenca rio Jordán



Anexo 5. estaciones de precipitación.



Anexo 7. Polígonos de Thiesen



12. Bibliografía

CAMPO, I. A. (2006). ORIGEN, FORMACIÓN, ESTRUCTURA Y COMPORTAMIENTO DE LA ARCILLA DE BOGOTA. BOGOTA, COLOMBIA.

DIAZ, J. S. (2001). *CONTROL DE EROSION EN ZONAS TROPICALES*. BUCARAMANGA: DIVISION EDITORIAL Y DE PUBLICACIONES UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

J. ALMOROX ALONSO, F. L. (2010). *LA DEGRADACION DE LOS SUELOS POR EROSION HIDRICA METODOS DE ESTIMACION*. ESPANA: EDITUM.

JOSE LUIS HERNANDEZ TOVAR, J. A. (2012). ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS DISPERSOS. BUCARAMANGA, COLOMBIA.

Juan José Ibáñez el, J. (15 de Agosto de 2008). Recuperado el 20 de enero de 2015, de <http://www.madrimasd.org/>: www.madrimasd.org/

POT. (2013 PRIMERA REVISION). *PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL*. TUNJA.

Sotelo, R. R. (s.f.). *Identificación de Arcillas Erodibles Dispersivas*. ARGENTINA: Centro de Geociencias Aplicadas - Facultad de Ingeniería - U.N.N.E.