

Herramienta de Monitoreo y Modelo Sistémico a Deslizamiento Superficial de Suelos para Manizales

Carlos Arturo Peña Rincón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Manizales, Colombia
Noviembre, 2014

Monitoring tool and Systemic Model to Surface Soil Landslide for Manizales

Carlos Arturo Peña Rincón

Tesis de doctorado presentada como requisito parcial para optar al
título de:

Doctor en Ingeniería-Automática

Director:

Gerard Olivar Tost, Ph.D.

Línea de Investigación:

Matemática Aplicada

Grupo de Investigación:

ABC Dynamics

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Manizales, Colombia

Noviembre, 2014

A mi padre(Q.e.p.d),Tio Arturo(Q.e.p.d) y mis bellas Nonas (Q.e.p.d)

A mi Madre, mis hermanos, a mi Tío Lauro,
a la Má y a mi hermoso lunar Diego, mi hijo.

0.1. Agradecimientos

Esta sección, al escribirla me permite recordar los momentos difíciles donde oportunamente llegaron manos a impulsar este trabajo, a brindar entusiasmo, risas, preocupaciones y miradas pérdidas en la misma dirección que la mía, donde me indicaron como continuar creciendo las ideas que se desarrollaron en este trabajo, me siento muy orgulloso de haberlos conocido y expreso mis agradecimientos a todos ellos, en una lista homogénea en importancia: profesor Carlos Eduardo Rodríguez Pineda, que me permitió tomar la clase de Estabilidad de Taludes y me ofreció sus horas de tiempo en la mañana muy temprano, buscando un direccionamiento. Profesor Jorge Julian Vélez Upegui, por las discusiones de la propuesta y la información valiosa que me facilitó, profesor Mariano Marcano Velázquez por la asesoría en el algoritmo del método numérico, Profesor Hermes Martínez por el acompañamiento en muchas tardes de estudio con el programa python para Arcgis, Karem García por sus valiosas asesorías con el programa Arcgis y por último al profesor Homero Cardona en el tema de Geología.

A Gerard Olivar, por la dirección del trabajo de la tesis, el apoyo y la oportunidad de realizar mis estudios en un tema tan interesante, pertinente e importante. De igual manera a Reinaldo Núñez, por el apoyo incondicional en darme los espacios para desarrollar el doctorado y a Jorge Amador por su apoyo y amistad.

0.2. Resumen de la tesis

Esta tesis contiene resultados sobre una propuesta para el monitoreo de deslizamiento de suelos y un estudio desde la dinámica de sistemas para integrar los deslizamientos superficiales y profundos. a continuación se describe el contenido de los capítulos de la tesis.

Así, en el capítulo 1 se presenta los diferentes estudios y herramientas, para abordar el tema de los deslizamientos de suelos según el tipo de movimiento y su factor detonante. En el capítulo 2 se presenta el modelo basado físicamente, utilizando la ecuación diferencial HSB para el modelo hidrológico y se resuelve numéricamente utilizando el lenguaje de python en el entorno de arcgis, se propone una ladera de ancho constante, con un perfil que varia a lo largo de la ladera y se establece un factor de seguridad con diferentes periodos de lluvia. En el capítulo 3 se presenta el moniterio de semáforo actual que se utiliza en Manizales y la propuesta de monitoreo utilizando el modelo basado físicamente junto con la ecuación HSB y la información de precipitación recibida de la estación meteorológica del Emas, se aplicó a una ladera ubicada al norte de Manizales para diferentes periodos de lluvias diarias y se estableció el factor de seguridad para la ladera con dos tipos de espesor del suelo. En el capítulo 4, se estableció un diagrama causal y de flujos para integrar deslizamientos superficiales y profundos. se propuso un modelo sencillo para deslizamientos superficiales.

Finalmente, en el capítulo 5 se relacionan las conclusiones del presente trabajo, referido al estudio realizado de deslizamiento de suelos según lo establecido en el objetivo general, para la ciudad de Manizales.

bigskip

Palabras claves:Deslizamientos de suelos, Sistema de información geográfica, ecuación HSB, dinámica de sistemas, python.

0.3. Abstract

This thesis contains results on a proposal for soil monitoring slip and a study on the dynamics of systems to integrate the superficial and deep landslides. then the content of the chapters of the thesis is described.

Thus, in chapter 1 the various studies and presents tools to address the issue of Landslide depending on the type of movement and trigger factor. In Chapter 2 the physically based model is presented, using the differential equation HSB for the hydrological model and solved numerically using the language of python in the vicinity of arcgis, a slope of constant width is proposed, with a profile that varies along the hillside and a safety factor with different set periods of rain. In Chapter 3 the current light moniterio used in Manizales and monitoring proposal is presented using the physically based with the HSB model equation and precipitation information received from the weather station Emas It was applied to a hillside just north of Manizales for different periods of daily rains and the safety factor for slope with two types of soil thickness was established. In Chapter 4, and a causal flow diagram was established to integrate superficial and deep landslides. A simple model is proposed for shallow landslides.

Finally, in Chapter 5 the conclusions of this study are related, based on the study of soil slip as established in the overall objective for the city of Manizales

Keywords: Shallow Lanslide, Geographic Information System, HSB Equation, System Dynamics, Python.

Índice general

0.1. Agradecimientos	VII
0.2. Resumen de la tesis	IX
0.3. Abstract	X
1. Introducción	1
1.1. Fundamentos de la investigación	1
1.2. Planteamiento del problema	12
1.3. Justificación de la Investigación	12
1.4. Objetivos	13
1.4.1. Objetivos Específicos	13
2. Modelo basados físicamente	15
2.1. Introducción	15
2.2. Factor de Seguridad	16
2.3. Geometría de la Ladera	18
2.4. Modelo hidrológico HSB	19
3. Herramienta de Monitoreo de Deslizamiento de Suelos para Manizales	25
3.1. Introducción	25
3.2. Geología	27
3.3. Geomorfología	29
3.4. Hidrográfica	30
3.5. Suelos	31
3.6. Herramienta para Monitorio de Deslizamientos Superficiales	32
4. Elementos para el Modelado de Dinámica Sistemas	39
4.1. Introducción	39
4.2. Modelado	40
4.2.1. Modelo para Suelos homogeneos no Saturados	40
5. Consideraciones, Conclusiones y Trabajos Futuros	47
5.1. Consideraciones	47
5.2. Conclusiones	48
5.3. Trabajos Futuros	49

Índice de figuras

2.1. Vista tridimensional de una ladera convergente en la parte superior de un perfil de base convexa	18
2.2. Definición esquemática de un acuífero en la ladera.	20
2.3. a) Una vista en tres dimensiones del perfil de la ladera , b) Un esquema unidimensional del perfil de la ladera que presenta dos estratos de suelo, el permeable que recibe la lluvia y el estrato impermeable(capa rocosa) [40]	21
2.4. Respuesta de saturación de una ladera, para dos diferentes T periodos de lluvia consecutivos	22
2.5. La capacidad de saturación de la ladera y una respuesta a la saturación para un periodo T1.	22
2.6. Factor de Seguridad para T periodos de lluvia de diferentes precipitaciones	23
3.1. Sistema de alerta temprana usando la estrategia semáforo	26
3.2. Comuna Ciudadela del Norte de Manizales	27
3.3. Geología de la Zona de estudio, EMAS	29
3.4. Geomorfología de la Zona de estudio, EMAS	30
3.5. Mapa de Hidrográfica la Zona de estudio	31
3.6. Mapa de Suelos de la Zona de estudio	32
3.7. Metodología para monitoreo de deslizamiento superficiales por lluvias .	33
3.8. Precipitación registrada por la estación meteorológica Emas.	33
3.9. Se consideran tres perfiles de la zona estudio	34
3.10. Ladera de estudio	35
3.11. Saturación relativa	35
3.12. Factor de Seguridad	36
3.13. Factor de Seguridad en la zona	37
3.14. Factor de Seguridad	37
3.15. Factor de Seguridad en la zona	38
4.1. Presentación de un modelo de deslizamiento de masa por el factor detonante de lluvia	39
4.2. Los atributos que involucran el deslizamiento superficial(color azul) y deslizamiento profundo(color rojo).	41

4.3.	Identificación de las variables de Estado, flujos y sus variables auxiliares	42
4.4.	Modelo para el estudio de deslizamiento superficiales de suelos	43
4.5.	Diagrama de relaciones causales para deslizamientos superficiales de suelos	44
4.6.	Esquema de compromiso entre los datos disponibles, el modelode complejidad y la capacidad de predicción,[101], [102].	46
1.	Ubicación de la Zona de estudio, EMAS	53
2.	Perfiles del talud de la Zona de estudio, EMAS	54
3.	Conductividad hidráulica saturada del suelo	55
4.	Mapa de Amenaza de deslizamiento y vulnerabilidad de la Zona de estudio	56
5.	Mapa de Pendientes	57

Capítulo 1

Introducción

1.1. Fundamentos de la investigación

Este fenómeno natural es de gran interés de estudio por las pérdidas económicas, ambientales y en vidas humanas que ocasionan en diferentes países como EEUU, China, Gran Bretaña, Italia, Holanda, Japón, España, Brasil, Perú, Colombia y entre otros. Las diferentes comunidades científicas han creado centros de estudio de deslizamientos de suelos y rocas, como: USGS U.S. Geological Survey, NLIC (National Landslide Information Center), IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambiental), (ICL) International Consortium on Landslides, (IPL) International Programme on Landslides, (INC) Instituto Nacional de Cultura, etc. Los fuertes estudios logrados a través de las ciencias, como la geotécnica, geología, ecología, litología, climatología, agrología, ingeniería de sistemas y la ingeniería civil, han construido un pilar de información que comprende desde la clasificación de los tipos de movimiento de masa, la clasificación de los factores causantes y detonantes, metodologías de análisis estáticos y dinámicos de taludes, como también, metodologías de sistemas de alerta temprana con estrategias de prevención de desastres naturales. Pero aún se sigue profundizando en el desarrollo de modelos a través de la matemática y los lenguajes de programación como: slope, 3DSlopeGIS, ilwisi, Shalstab, Mufte, flow3d, Geoflow, zmap, Gslope, TRIGRS, entre otros.

El termino deslizamiento definido por Scheidegger[1], se interpreta como modificaciones del terreno dentro del ciclo geomorfológico continuo, que corresponden a la respuesta normal del sistema debido a complejos parámetros exogénicos (meteóricos) y endogénicos (tectónicos), los procesos de inestabilidad son ocasionados por la geomorfología local, hidrología y condiciones geológicas. La modificación de estas condiciones por procesos geodinámicos, vegetación, usos del suelo y actividades humanas activan los movimientos lentos, generalmente imperceptibles debido a que las propiedades mecánicas del material que decrecen gradualmente. Posteriormente, factores como precipitación y sismicidad detonan dichos movimientos lentos en rápidos movimientos en masa. Dichos factores cambiantes en tiempo e intensidad, son agrupados en: (1) variables cuasi-estáticas, las cuales contribuyen a la susceptibilidad, como geología, pendientes y aspectos

de las laderas; y (2) variables dinámicas como precipitación y sismos, los cuales tienden a detonar los deslizamientos en áreas con determinada susceptibilidad.

Existen diferentes métodos de estudio alrededor de la dinámica de los deslizamientos de suelos, entre ellos está la estática y la cinemática. En estudios estáticos realizados para establecer cuando un terreno pierde o gana estabilidad, se utilizan métodos de equilibrio límite que establece ecuaciones de fuerza y de momento para cada rebanada que representa una partición del terreno en el modelo. Entre estos modelos se encuentran el método de rebanadas de Fellenius 1936, método modificado de Bishop (Bishop 1955), método de equilibrio de fuerzas (e.g. Lowe and Karafiath, 1960), Método de Morgenstern a price (1965), método de Spencer (1967) y el método generalizado de Janbu (Janbu 1968) [2], [3] y el método de elementos de frontera (BEM) que es un método numérico para la solución de problemas en la frontera y su aplicación para el análisis estático y dinámico de estabilidad de taludes [4], [5]. Dentro de lo cinemático se encuentra, el método de elementos finitos [6], [7], [8], que permite modelar el comportamiento no lineal de los materiales y el acoplamiento del esqueleto salido con el agua intersticial, sin embargo el método presenta limitaciones importantes una vez que ha alcanzado el umbral de rotura, no siendo posible el estudio del deslizamiento una vez que este ha comenzado. Para ello, sería necesario disponer de una formulación que incorporara las ecuaciones de Navier-Stokes con superficie libre y contornos móviles, así como una ecuación constitutiva tipo fluido no lineal.

La alternativa a estas anteriores soluciones es emplear el método de los elementos discretos, basado en el análisis de movimiento de cada una de las partículas en que se discretiza el continuo, sometidas a fuerzas interiores y de interacción con las demás partículas. Este método de los elementos discretos fue introducido por P. Cundall en 1971 para analizar los problemas mecánicos de las rocas, después fue aplicado al estudio de los suelos por Cundall y Strack en 1979 [9], [10], [11].

Otros métodos aplicados a los estudios de movimientos de masa buscan identificar zonas susceptibles a deslizamientos como es el caso de las redes neuronales que permiten asignar un índice probabilístico a un mapa de susceptibilidad generado a través de los sistemas de información geográfico [12], [13], [14], el método de montecarlo, permite analizar situaciones de zonas que tienen un mecanismo de falla compuesto y falla traslacional [15].

En Colombia se han desarrollado actividades en búsqueda de la comprensión de este fenómeno natural. El trabajo del profesor Gonzalo Duque [16], explica que la zona tropical Andina se caracteriza por la inestabilidad de los suelos y por un ambiente de gran actividad tectónica, en la zona andina se presentan factores importantes como son los terremotos y volcanes. El investigador Gonzalo en el informe comenta que en Colombia predominan rocas blandas, (materiales intermedios entre suelos y rocas), por ejemplo, las rocas de bajo o medio metamorfismo como esquistos, filitas, algunas serpentinitas y anfibolitas, e incluso algunos gneises y rocas mal consolidadas y mal cementadas, como margas, lodolitas, limolitas y areniscas blandas. Las rocas blandas son susceptibles a los cambios de humedad típicos del ambiente tropical. Para la zona Andina en el oriente de Colombia predominan espesos coluviones y en el occidente

suelos residuales y volcánicos. El occidente está afectado por tectonismo y sismos. Es importante para el ambiente Andino tropical considerar los suelos residuales con sus estructuras relictas o heredadas, que a diferencia de los suelos transportados, donde las discontinuidades son horizontales (predecibles), resultan con orientación aleatoria y buzamiento impredecible. Colombia, en su zona Andina tiene fallas, muchas activas, mostrándose en sus laderas inestables zonas con intenso fracturamiento donde los materiales presentan trituración y brechamiento. El occidente está afectado por las fallas de Romeral y Palestina y el oriente por el sistema de las fallas frontales de los Llanos. Ambas son de alto riesgo sísmico. La falla geológica condiciona el drenaje interno y tras todo ello se presenta una cronoestratigrafía en repetidas ocasiones desfavorable puesto que en los estratos de diferentes edades se presentan contrastes de permeabilidad, zonas débiles, etc.

Los deslizamientos de suelos son frecuentes en nuestras cordilleras Colombianas, dadas las condiciones geológicas, geográficas, geomorfológicas y climáticas que lo constituyen. Los factores detonantes que son importantes en nuestra zona andina, son: la sísmica, la lluvia y la intervención humana, que contribuyen a la ocurrencia de deslizamientos.

La presencia de lluvias y el efecto de la dinámica hidrológica que actúa bajo la superficie del suelo, es conocido como una amenaza natural de primer orden. Se han realizado modelos para comprender esta dinámica como el presentado en Manizales en el trabajo de doctorado de Terlien (1996)[17], quien propuso un modelo hidrológico con aplicación directa en estabilidad de laderas, sustentado en los mecanismos de falla predominantes en la zona y en el uso del suelo existente, con mediciones directas en campo. Este modelo es conocido como HYSWASOR, de características unidimensionales, desarrollado a partir de elementos finitos, que permite predecir las fluctuaciones de las presiones hidrostáticas para un corto período de tiempo y para largos períodos de tiempo. Este modelo fue calibrado con datos reales, obtenidos de piezómetros y tensiómetros instalados en el campo.

En otro trabajo realizado sobre la cuenca del río Chinchiná, por Van Western(1994), desarrollo un modelo hidrológico bidimensional que permite obtener a partir de datos de temperatura, precipitación, evapotranspiración, fluctuaciones del nivel de agua freáticas. Este modelo es llamado SLOHYD y se aplicó en el cálculo de factor de seguridad.

El investigador Iverson [18], en su propuesta de modelo hidrológico consideró la dinámica de la infiltración, la conductividad hidráulica, el ángulo de la pendiente, la profundidad vertical y el flujo de dirección. Vasquez(2008)[19], analizó la respuesta hidrológica de taludes en casos unidimensionales, bidimensional y tridimensional, mediante la solución numérica de la ecuación de Richards que describe el flujo en medios parcialmente saturados.

También hay estudios de la existencia de una relación entre eventos de deslizamientos y lluvias, validando combinaciones de: lluvia diaria, antecedentes de lluvia, que son detonantes para los deslizamientos. [20] [21]. En Colombia, Ruth [22], castellanos [23], Hurtado [24], Narváez [25] han estudiado el régimen anual de lluvias y el aumento de la

frecuencia de los deslizamientos. Por tanto se ha buscado: relacionar la curva bimodal de las precipitaciones con el registro de deslizamientos, buscando umbrales críticos de lluvia y lluvia acumulada, para ello se han apoyado de técnicas estadísticas. Terlien [26], uso una combinación de un modelo hidrológico y uno de talud con un sistema de información geográfica, para realizar pronósticos a corto y largo plazo de los efectos por las lluvias (antecedentes y diarias) en la estabilidad de taludes, en la comuna Dos de la ciudad de Manizales. Arango [27], estudio la comuna Dos de Manizales, en busca de obtener relaciones lluvia deslizamientos, teniendo en cuenta aspectos geotécnicos e hidrológicos de la zona. Cuadros y Siza [28], analizaron varios modelos de relaciones lluvia-deslizamientos para Manizales, sobre una base de datos de 37 años. Algunas conclusiones: (a) Analizar en forma independiente los dos periodos de lluvias típicos de la ciudad. (b) El umbral de amenaza se acerca a los valores de precipitación acumulada media multianual de la ciudad, lo cual es indicativo de su alta vulnerabilidad a la ocurrencia de deslizamientos causados por lluvia. En las zonas de las comunas atardeceres y la Macarena en Manizales, Diego Narvaez realizo un análisis de relación de lluvias con la ocurrencia de deslizamiento de masa usando el método heurístico y la construcción de un mapa de susceptibilidad con ArcGIS.[29]

Estudios sobre los efectos de duración e intensidad de la lluvia y de la conductividad hidráulica del suelo sobre el factor de seguridad en suelos parcialmente saturados, han dado tres observaciones: a) la infiltración debida a la lluvia causa la reducción de la succión matricial y un incremento del contenido de agua y la permeabilidad del suelo de las zonas no saturadas, b) se pueden desarrollar niveles freáticos colgados por encima del nivel freático existente. En ocasiones el nivel freático principal no se eleva y la inestabilidad de los taludes se asocia sólo con la reducción o pérdida de la succión, c) La localización del nivel freático inicial y la lluvia antecedente tiene efectos significativos en la estabilidad del talud, lo cual debilita las metodologías que buscan una intensidad de lluvia crítica que por si sola detone el deslizamiento [30].

Es evidente entonces la importancia de estudiar la influencia de las lluvias diarias y antecedentes en la ocurrencia de los deslizamientos superficiales y profundos, en diferentes lugares del mundo. Van Asch, Buma, Van Beek [31], recopilaron la importancia de los diferentes detonantes en sistemas hidrológicos para flujos de desechos, deslizamientos profundos y superficiales. Donde muestran que lo influyente para el caso de deslizamientos superficiales (1-2m), es dado por la infiltración de la lluvia, el avance del frente húmedo, la percolación, evapotranspiración, ángulo de la pendiente, contenido de humedad y la respuesta rápida de subida de las aguas subterráneas en las tormentas individuales y la clara dependencia de los datos meteorológicos, Kenneth, Jianfeng [32]. En el caso de deslizamientos profundos (5-20m), son dados por cambios en la presión de poros positiva sobre el plano deslizante inducido por los cambios de nivel de las aguas subterráneas.

Se conocen trabajos relacionados con los deslizamientos superficiales, donde se realizan combinación de modelos hidrológicos y de estabilidad de laderas. Jaime Velez [33] utilizó el sistema de información Geográfica HidroSIGV.3, aplicandolo a una cuenca. M. Casadei, Dietrich [34], utilizó el modelo de pendiente infinita y el modelo hidrológico

considerando la evapotranspiración, el caudal vertical y horizontal, el cambio de la conductividad con la profundidad, datos de precipitación, datos de un modelo de elevación digital y la estimación de la profundidad del suelo con el modelo de Dietrich et al [35].

En una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias, los investigadores Aristizabal, Martinez, Vélez, resaltan las siguientes observaciones [36]:

- Los mecanismos presentes en los movimientos en masa detonados por lluvias son: aumento rápido de la presión de poros, infiltración, la succión, intensidad y duración de la lluvia, NAF, la anisotropía de la conductividad hidráulica y el frente húmedo.
- Las Variables involucradas son: propiedades del suelo, topografía, grado de saturación del suelo, cohesión, procesos hidrológicos, la climatología y actividades humanas.
- En Modelos estadísticos para la definición de umbrales críticos de lluvias, se utiliza la lluvia acumulada, lluvia antecedente, duración e intensidad de lluvia.
- En los análisis hidrológicos en métodos físicos de modelos conceptuales están, TOPOG, TOPMODEL, TRIGRS, GREEN-AMPT.
- En los Modelos geotécnicos están: SINMAP, SHALSTAB, LISA.

Estos mismos investigadores proponen futuros lineamientos de investigación:

- Investigar los parámetros para los modelos hidrológicos en suelos no saturados
- Analizar mecanismos de falla diferentes al modelo de Coulomb
- **Incorporar datos de lluvia transitorios, tales como duración y la intensidad en los modelos físicos, presentando deficiencias en la resolución espacial de la lluvia.**
- **El uso de modelos estadísticos y físicos para la predicción de movimientos de masa detonados por lluvias en sistemas de alerta temprana.**

Tehodore, Asch, se enfocan en presentar técnicas en el tema de evaluación de amenaza por deslizamientos de suelos para una escala temporal menor a 100 años. Donde consideraron artículos que describen estudios teóricos o numéricos, en sus tres fases del proceso de deslizamiento, estado de pre-falla, estado de falla y estado de post-falla, estos tres estados proveen un marco útil para comprender los factores causales en el dominio temporal[37]. En este artículo también resalta la dificultad que existe en realizar modelos matemáticos en 4-D (espacio y tiempo) del movimiento de masa, por ende han surgido modelos geométricos, morfo-estructurales, geotécnicos, geomecánicos

y modelos cinemáticos, en este último tenemos los modelos hidrológicos como el de la ecuación de Richard, propuesta en 1931, que combina la ley de darcy con la ecuación de continuidad, bajo el supuesto que hay una relación lineal entre la densidad de flujo de masa y el gradiente hidráulico. Esto permite modelar el flujo de agua en zonas no saturadas. La solución numérica de la ecuación en costos computacionales son altos, los investigadores Fan y Bras, trabajan las mismas ideas de la ecuación de Richard, pero hacen una modificación al proponen una función de capacidad de humedad del suelo, permitiendo disminuir los costos operacionales al bajar una dimensión a la ecuación de Richard y facilitar la aplicación a diferentes perfiles de laderas, mediante una función polinomial de segundo orden, luego emplean el método de características para encontrar la solución analítica [38]. Peter Troch y su equipo extienden el anterior trabajo utilizando funciones de Stefano y de Evans para los perfiles de las laderas, mostrando la función respuesta de drenaje para nueve tipos de laderas[39], utilizando como modelo hidrológico la ecuación hillslope-storage Boussinesq (HSB), que modela el flujo sub-superficial en el que se incluye la inclinación de la ladera para diferentes escenarios de laderas en condiciones iniciales de porosidad, drenaje y de recarga [40]. También trabajaron la ecuación HSB en un caso analítico con una función ancho de ladera exponencial,[41]. Por último la ecuación HSB, ha sido aplicada para determinar el tiempo de viaje del flujo en el subsuelo de cuencas [42].

Estos desarrollos teóricos junto con el uso de herramientas computacionales, nos permiten tener una aproximación a la comprensión de los deslizamientos de suelos como se expone en la literatura científica, proporcionándonos componentes vitales para un sistema de alerta temprana. Son actividades necesarias e importantes dentro de un marco mucho más grande que es la Gestión del Riesgo de Desastres que está claramente expuesta dentro de la normatividad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres ley 1523 de 2012. En ella se contempla las políticas de desarrollo para mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo, permitiendo una mejor planificación del desarrollo seguro en todo el territorio nacional. En ella contempla el decreto 4147 de 2011, que da inicio a la creación de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, dotándolo de unos objetivos y una estructura, dentro de esta estructura se encuentra la Subdirección para el Conocimiento del Riesgo, una de sus funciones es la de promover y fortalecer el desarrollo de instrumentos de monitoreo del riesgo de desastres a través de las diferentes entidades técnicas del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres -SNPAD.

En el Departamento de Caldas y más específicamente en Manizales, existen entidades gubernamentales que pertenecen a la gran red administrativa de la Gestión de Riesgo de Desastres, cuenta con CORPOCALDAS, la oficina Municipal de la Unidad de gestión del Riesgo y con el apoyo del Instituto de Estudios Ambientales-IDEA, de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Actualmente Manizales cuenta con una red de monitoreo hidrometeorológico que opera en tiempo real para la vigilancia de las cuencas urbanas y rurales, estas 16 estaciones meteorológicas cuentan con una unidad de comunicación remota que permite informar el estado del clima a todos los ciudadanos del municipio, a través de la página de IDEA, con esta información y la rela-

ción establecida entre los deslizamientos de suelos y la precipitación acumulada A25, se establece un criterio para el sistema de alerta temprana (SAT), mediante la estrategia del semáforo, permitiendo a las entidades locales de gobierno, centrar la inversión en la gestión integral del riesgo[43].

Según la definición de SAT dada por la OEA, consiste en la transmisión rápida de datos que active mecanismos de alarma en una población previamente organizada y capacitada para reaccionar de manera temprana y oportuna, con el propósito de crear condiciones que permitan tomar decisiones oportunas en el tiempo, para minimizar las pérdidas humanas ante un evento de peligro. El SAT como metodología, se compone de cinco elementos, de acuerdo con la estrategia Internacional para la reducción de desastres(EIRD)[44]

- Conocimiento del riesgo
- Seguimiento de Cerca o monitoreo de la amenaza
- Análisis y pronóstico de las amenazas
- Comunicación o difusión de las alertas y los avisos.
- Capacidades locales para responder frente a la alerta recibida

El interés en este trabajo es fortalecer la componente de análisis y pronóstico de las amenaza de deslizamiento de suelos, para la ciudad de Manizales, a través de modelos híbridos con sistemas de información geográfica que vincule a la red de estaciones meteorológica.

En el marco de la Gestión del riesgo de desastres se consideran conceptos importantes como la Amenaza, vulnerabilidad y el Desastre. Utilizando el enfoque de la Teoría General de Sistemas, nos permite ubicar muy claramente estos elementos que son aportados por la dinámica de interacción que viven dos sistemas bien identificables: 1. La comunidad, con sus atributos socioeconómicos y políticos ofrece la Vulnerabilidad. 2. El Ecosistema de Soporte, con sus atributos geofísicos, geomorfológicos, ecológicos, biológicos y biofísicos, aporta la amenaza. Por último está el Desastre, siendo la materialización del riesgo que se encuentra implícito en un asentamiento humano. Por lo general esto ocurre en comunidades afectadas por factores económicos negativos y en ausencia de políticas administrativas en la región [45].

En la literatura de taludes se viene presentando una evolución de los conceptos pertenecientes a este tema, a través de las contribuciones de investigadores como: Varnes (1984)[46], Gonzalez(1990), Castillo(1998)[47], Mora(1998), Cardona(1999)[48], Gonzalo Duque E.(2000), que ayudan a caracterizarlos desde el punto de vista de los desastres naturales; **la amenaza, vulnerabilidad, riesgo y susceptibilidad**, como conceptos probabilísticos a los que se pueden asociar funciones para facilitar su manejo en términos de pronósticos.

Riesgo: Probabilidad de afectar significativamente las vidas o bienes a causa de un fenómeno dañino dentro de un período de tiempo y con una probabilidad determinada.

Amenaza: Evento o fenómeno perjudicial con un cierto nivel de magnitud y alcance espacial, que tiene una probabilidad de ocurrencia significativa en un período de tiempo dado. La probabilidad será cualitativa si decimos que es alta o baja, o será cuantitativa si le señalamos al evento su frecuencia temporal.

La relación entre amenaza y riesgo se establece por medio de la expresión:

$$Riesgo = Amenaza \cdot Vulnerabilidad \quad (1.1)$$

Siendo la vulnerabilidad el factor de riesgo que considera la resistencia o fragilidad de una comunidad y de los bienes expuestos. Por lo tanto:

$$Vulnerabilidad = \frac{Exposicion}{Resistencia} \quad (1.2)$$

$$Riesgo = \frac{Amenaza \cdot Exposicion}{Resistencia} \quad (1.3)$$

La vulnerabilidad puede ser física, político, cultural y socioeconómica. El riesgo puede ser directo, indirecto o de otros ordenes, según la amenaza sea natural, antropogénica o tecnológica. La amenaza depende del evento detonante y de su grado de susceptibilidad, como de la energía potencial que lo caracteriza, razón por la cual se puede escribir:

$$Amenaza = Detonante \cdot Susceptibilidad \cdot Potencial \quad (1.4)$$

$$Riesgo = Detonante \cdot Susceptibilidad \cdot Potencial \cdot Exposición / Resistencia$$

El riesgo por deslizamientos incide sobre la amenaza, en el riesgo sísmico interviene la vulnerabilidad. En el riesgo volcánico podemos incidir sobre la exposición (evacuación temporal o definitiva) y en el riesgo sísmico normalmente intervenimos la fragilidad (parámetros de sismoresistencia y seguridad).

Ordenes de las Amenazas Naturales

Una amenaza natural puede o no provenir de otra de mayor orden incluso puede ocasionar un evento posterior. Los deslizamientos pueden surgir a causa de un sismo o una lluvia y pueden ocasionar también aludes y avalanchas. De esta secuencia posible surge la necesidad de establecer la siguiente clasificación para las amenazas naturales:

- **Primer orden:** Sismos, huracanes, volcanes y lluvias.
- **Segundo orden:** Deslizamientos, maremotos, inundaciones
- **Tercer orden:** Aludes y avalanchas.

Clases de riesgos. Se hace necesario diferenciar y calificar el riesgo asociado a una amenaza dada, para no generar expectativas ociosas. Donde las consecuencias se pueden anular con obras técnicas y económicamente factibles.

- Riesgo controlable

Cuando el fenómeno amenazante puede predecirse pero sus consecuencias solo pueden atenuarse o mitigarse, pues no se pueden manejar por completo ni técnica ni económicamente.

- Riesgo incontrolable

Aquellos en los cuales la capacidad de predicción y evaluación es incompleta, la ciencia y la tecnología no están capacitadas para prever soluciones .

- Riesgo aceptable.

Surge como consecuencia de la escala anterior , se define como la diferencia entre el mayor nivel de riesgo que se decide o puede controlar(riesgo controlable) y la magnitud máxima. Corresponde al nivel tolerable en términos de daños materiales y de pérdida de vidas humanas .

- Riesgo evitable

Aquellos en los cuales la capacidad de predicción y evaluación es incompleta, la ciencia y la tecnología no están capacitadas para prever soluciones .

Los factores de amenaza en caso de deslizamiento son: Son la susceptibilidad debida a factores internos

- Los eventos detonantes como lluvias, sismos, erosión, sobrecargas.
- El potencial de energía, tanto la destructiva interna como la potencial.

Los factores de riesgo por deslizamiento son:

- El nivel de la amenaza de deslizamiento.
- El grado de exposición de elementos que puedan sufrir daños posibles, como los elementos sobre la ladera o al alcance o por generación de aludes u obstrucción de corrientes.

- La resistencia al fenómeno, no sólo desde el punto de vista físico sino también funcional. Se asume que la resistencia es un concepto opuesto al de la fragilidad. La amenaza se puede representar en un mapa de susceptibilidad al deslizamiento, donde cada color involucra el grado de susceptibilidad del territorio a la ocurrencia de deslizamientos y cuyos niveles en forma decreciente son rojo, naranja y amarillo, o verde para las zonas no susceptibles.

Metodología para el estudio del riesgo en caso de deslizamiento.

- Identificación de la amenaza: recopilar y analizar información, identificación preliminar del riesgo y de las medidas urgentes.
- Evaluación de la susceptibilidad. Estudios cartográficos, hidrológicos, geológicos, agrológicos, de erosión, uso y manejo del suelo, zonificación de susceptibilidad, caracterización geotécnica de materiales, evaluación de estabilidad y susceptibilidad.
- Estudio de eventos detonantes de la amenaza: climatológicos, hidrológicos, sísmológicos, de erosión o sobrecargas naturales, y efectos antrópicos. Se puede dar deslizamiento con lluvia y con sismo, deslizamiento sin ellos o con uno de ellos. La probabilidad final será la suma las probabilidades de cuatro situaciones diferentes.

Los investigadores Edier Aristizabal y Shuichiro Yokotat(2006)[49] entregan una discusión de los conceptos de susceptibilidad y amenaza, así: La susceptibilidad de un terreno a fallar es definida por Brabb (1984) [50], como la tendencia de un deslizamiento a ser generado en el futuro en una área específica. En el mismo sentido, Soeters y Van Westent (1996) definen susceptibilidad como la posibilidad de que un fenómeno ocurra en un área de acuerdo con las condiciones locales del terreno y especifican que factores detonantes tales como precipitación o sismicidad no son considerados. El término amenaza expresa la probabilidad de ocurrencia de un potencial fenómeno destructivo en espacio y tiempo definidos. Finalmente se obtiene que la ocurrencia de deslizamientos corresponde a un proceso comprensivo, donde cada régimen es caracterizado por una jerarquía de eventos distribuidos como una secuencia en tiempo y espacio, entendido como susceptibilidad, este es descrito por la frecuencia y la magnitud, incluyendo la duración y secuencia de los eventos del proceso, entendido como amenaza (Brunsden, 2002)[51]. Los términos amenaza y susceptibilidad han sido erróneamente usados como sinónimos. Los mapas de susceptibilidad zonifican el terreno de acuerdo a la favorabilidad a fallar de una ladera, con el propósito de analizar posteriormente los mecanismos detonantes. En tanto, amenaza es la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en áreas susceptibles y que a diferencia de susceptibilidad involucra frecuencia y magnitud. Esta definición de amenaza considera tiempo y espacio, dos factores que involucran la cuantificación de las causas detonantes. Guzzeti et al, 2005[52], se refiere a estos conceptos diciendo que la Amenaza de deslizamiento es la probabilidad que un deslizamiento de tierra de una magnitud dada se producirá en un plazo determinado y en un área

determinada. Además de predecir "donde" se producirá una falla de la pendiente, los pronósticos de Amenaza de deslizamiento cuando, "cómo" la frecuencia "que se producirá, y "lo grande" que será. Amenaza de deslizamiento es más difícil de obtener que la susceptibilidad a deslizamientos, como la susceptibilidad es un componente (el componente espacial) del peligro. Más en general, susceptibles a deslizamientos consiste en la evaluación de lo que ha sucedido en el pasado, y la evaluación del peligro de deslizamiento consiste en la predicción de lo que sucederá en el futuro.

Una gran variedad de técnicas han sido desarrolladas para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos (Soeters y van Westen, 1996[53]; Barredo y otros, 2000 [54]; Dai y Lee, 2002 [55]; Guzzetti y otros, 1999; y Hutchinson, 1995[56]). En esencia, estas metodologías pueden ser agrupadas en:

1. Metodologías heurísticas basadas en el entendimiento de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno.
2. Metodologías estadísticas basadas en predicciones estadísticas por combinación de variables generadoras de deslizamientos en el pasado.
3. Metodología determinísticas, basadas en modelos de estabilidad. El tipo de metodología es determinado de acuerdo con el alcance del estudio.

Los métodos heurísticos han sido ampliamente utilizados para evaluar susceptibilidad; ***los métodos determinísticos han sido restringidos para evaluar amenaza*** y los métodos estadísticos son utilizados para ambos casos de acuerdo con el desarrollo metodológico. Clerici y otros (2002)[57], en resumen los métodos heurísticos como:

1. Mapeo de los deslizamientos
2. Mapeo de los factores ambientales de los cuales se suponen afectan directamente e indirectamente la inestabilidad de las laderas.
3. Estimación de las relaciones entre los factores y los fenómenos de inestabilidad.
4. Clasificación del terreno en dominios de diferente grado de susceptibilidad de acuerdo con las relaciones detectadas anteriormente.

Otra metodología que se explora en este trabajo para determinar un modelo dinámico al tema de deslizamientos de suelos no saturados y homogéneos, es la dinámica de sistemas. Esta metodología busca relaciones causales presentes en un determinado sistema de estudio. Inicialmente se realiza un diagrama causal para integrar los deslizamientos superficiales y profundos [58],[59],[60],[61],[62].

1.2. Planteamiento del problema

Existen varios movimientos de masa de suelos, enfocamos este trabajo en deslizamientos superficiales con superficie de falla plana. Dentro de la clasificación propuesta por Varnes, lo define como un deslizamiento de traslación, presentando características de descenso masivo y relativamente rápido del terreno, a lo largo de una pendiente y se mueve como una unidad de masa o muchas unidades, sobre un suelo deslizante. Se presenta en zonas montañosas, donde predominan los suelos residuales, que están ubicados en la zona tropical, especialmente en los Andes Colombianos. Estos suelos tienen presencia de ceniza volcánica, hierro, meteorización mecánica y de características no homogéneas, e inestables. En este tipo de movimiento de masa, el suelo presenta un estrato delgado con alta permeabilidad en la capa superior, apoyada sobre un estrato con una permeabilidad más baja, y generalmente son capas de arcilla. El interés de este trabajo es aportar una herramienta desde la hidrología, que permita predecir en terrenos de taludes el fenómeno de deslizamientos, a causa del factor detonante de las lluvias torrenciales. Con este modelo se pretende aplicar a una ladera en particular en la zona rural de Manizales, como los trabajos desarrollados por los investigadores: Juan David Arango G, 2000 [27], Velez Escobar María Isabel, 2004; Juan Londoño, 2006[45]; Ibsen Chivata Cardenas, 2006; Jaime Alberto Llano, 2000[63], trabajo de doctorado Terlien, 1996[64], entre otros.

1.3. Justificación de la Investigación

En la ciudad de Manizales es importante mejorar el sistema de alerta temprana de deslizamientos de suelos para la prevención de desastres, causados por la intensidad y la duración de la lluvia. Mediante el monitoreo de las amenazas por deslizamientos de suelos, utilizando la información de precipitación de las estaciones meteorológicas que tiene la ciudad, para proteger la vida humana, las infraestructuras de la urbe, la malla vial y las cuencas hidrográficas. Esto permite ajustar y cambiar el enfoque de las políticas en la Gestión del Riesgo de Desastres para el municipio, también es de interés proponer un modelo particular, donde estén presentes los atributos más importantes en la dinámica de deslizamientos de suelos para la ciudad. Este trabajo brinda toda una apertura en el campo de investigación, para caracterizar los suelos urbanos y rurales, que permita conocer los procesos de infiltración que ayudarían a entender la red de drenaje hídrica, para mejorar los modelos de evaluación de amenazas naturales y antrópicas.

1.4. Objetivos

Proponer un modelo sobre la estabilidad de taludes aplicado a una zona de Manizales, teniendo en cuenta factores geotécnicos e hidrológicos. También fortalecer el Sistema de Alerta Temprana para deslizamientos, a través de una herramienta de monitoreo y control sobre las zonas identificadas como de amenaza de deslizamientos superficiales por el factor detonante de lluvia.

1.4.1. Objetivos Específicos

- Recopilar datos e información básica de diferentes zonas de Manizales , como son: localización, clima, geología, geomorfología, uso de suelo, urbanismo, aspectos socio-económicos, periodicidad e intensidad de la lluvia y datos hidrometeorológicos.
- Establecer posibles relaciones entre las variables y sus parámetros que identifiquen el estado de equilibrio del talud y pronostiquen su inestabilidad. Esto permitiría la construcción de un modelo dinámico no lineal. Establecer posibles relaciones entre las variables y sus parámetros que identifiquen el estado de equilibrio del talud y pronostiquen su inestabilidad.
- Proponer una mejora en el análisis y pronóstico de las amenazas de deslizamientos de suelos por causa de las precipitaciones, fortaleciendo el Sistema de Alerta Temprana para Manizales.

Capítulo 2

Modelo basados físicamente

2.1. Introducción

También conocidos como modelos determinísticos o modelos de caja blanca, estos son basados sobre leyes de mecanismos físicos de conservación de masa, energía y fuerzas de momento y de equilibrio. Los parámetros usados en estos modelos son parámetros físicos que pueden ser determinados en el campo o en el laboratorio. Estos modelos permiten incluir explícitamente factores dinámicos que controlan la detonación de los deslizamientos, por esta razón, ellos permiten pronosticar distribuciones temporales y espaciales en los deslizamientos superficiales. Los métodos basados físicamente para deslizamientos superficiales son conformados con un análisis de estabilidad de pendiente infinita y un modelo hidrológico, estos modelos permiten incluir información dinámica tal como el grado de saturación, procesos hidrológicos, la cohesión, clima y actividad humana [65]. En la propuesta de Montgomery y Dietrich considera como la detonación de los deslizamientos depende de las variables dinámicas como condiciones hidrológicas y el cambio de uso del suelo, este modelo acopla análisis de estabilidad de pendiente infinita con modelos hidrológicos capaz de modular la altura del nivel freático en condiciones estable y casi-estable con un flujo de agua en el subsuelo paralela a la pendiente [66].

Por lo general estos modelos para regiones más grandes, son utilizados en modelos distribuidos para dar información de la estabilidad de las pendientes. Además, con la ayuda del mapa ráster de la zona de interés con la tecnología SIG, incluyendo el álgebra de mapas, para poner en práctica los modelos en unidades y elementos de tubo de corriente, que son representaciones basadas en vectores hidrológicas del terreno y con el factor de seguridad que permite analizar el efecto de factores detonantes como la lluvia, la sismicidad y el cambio de uso de la tierra, puede a través de la razón entre las condiciones reales en que se encuentra el talud y las condiciones que le llevan al deslizamiento, permitir dar una cuantificación en ocurrencia del deslizamiento. Algunos de los modelos distribuidos más avanzadas para la estabilidad de las laderas y la previsión de deslizamientos superficiales toma como entrada la superficie y la información del subsuelo en condiciones litológicas, hidrológicas y geo-mecánico de la profundidad de la cizalladura y la superficie de la tabla de agua al comienzo de la simulación, y una

medida del régimen de lluvias (en el espacio y el tiempo)[67],[68].

En este trabajo utilizamos la ecuación del modelo Hillslope storage Boussinesq (HSB).

2.2. Factor de Seguridad

En Ingeniería civil el uso del cálculo del factor de seguridad permite establecer un criterio de estabilidad a los taludes naturales, taludes de excavaciones y terraplenes compactados. Esta comprobación implica la determinación de la tensión de cizallamiento desarrollado a lo largo de la superficie de ruptura más probable y comparándolo con la resistencia a la cizalladura del suelo. Esto se conoce como análisis de estabilidad de taludes. La ruptura más probable es que la superficie crítica que tiene el factor de seguridad mínimo. Generalmente, el factor de seguridad se define como:

$$\text{Factor de Seguridad}(\mathbf{FS}) = \frac{\text{Fuerzas de Resistencia}}{\text{Fuerza de gravedad paralela a la pendiente}} \quad (2.1)$$

Para un valor de $\mathbf{FS} > 1$ indica estabilidad, mientras $\mathbf{FS} < 1$ indica inestabilidad. Para el caso de la estabilidad de una pendiente infinita sin presencia de agua se tiene que el FS es dado por:

$$\mathbf{FS} = \frac{C}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (2.2)$$

Siendo C la cohesión, γ la densidad específica, H la profundidad donde se encuentra la superficie de falla, β la inclinación del terreno y ϕ' ángulo interno. En la situación de presencia de agua por infiltración, aparece la presión de poros positiva que va modificar el FS de la siguiente forma:

$$\mathbf{FS} = \frac{c'}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad (2.3)$$

Siendo $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ y conocida como el peso unitario efectivo del suelo [69], [70]. Otros factores de seguridad han involucrado la dinámica de la vegetación.

$$\mathbf{FS} = \frac{C + \Delta C + [(Z - h)\gamma_m + h\gamma_{sat} - h\gamma_w] \cos^2 \beta + W \cos \beta \tan \phi}{[(Z - h)\gamma_m + h\gamma_{sat}] \sin \beta \cos \beta + W \sin \beta} \quad (2.4)$$

Siendo C la cohesión efectiva del suelo, ϕ el ángulo de fricción interna, ΔC es atribuido a la cohesión de las raíces, W es el peso de la vegetación, γ_m y γ_{sat} son el peso unitario del contenido de humedad y de saturación, respectivamente, Z es el espesor

vertical del suelo, h es la altura del nivel freático, β es el ángulo de la pendiente y γ_w es el peso unitario de agua [71], [72].

Dietrich propone que el factor de seguridad depende explícitamente de la profundidad del suelo, de acuerdo a una relación explícita de la curvatura topográfica para estimar la profundidad del suelo D [73].

$$\mathbf{FS} = \frac{C' + D\rho_s - h_w\rho_w g \cos^2\beta \tan\phi'}{\rho_s g D \sin\beta \cos\beta} \quad (2.5)$$

Siendo D la estimación de profundidad del suelo como resultado de obtener la solución para la ecuación propuesta en el modelo[74], que se refiere explícitamente a la curvatura topográfica.

$$\rho_s \frac{\partial D}{\partial t} = -\rho_r \frac{\partial e}{\partial t} - \nabla \cdot \rho_s q_s \quad (2.6)$$

Donde ρ_s, ρ_r son densidades de coluvión y roca de fondo respectivamente. $\frac{\partial e}{\partial t}$, es la tasa de producción de suelo, la ley de transporte más simple para el transporte de sedimentos de laderas es q_s y se asume un flujo que varía linealmente con la pendiente local ∇z .

$$q_s = -K_t \nabla z \quad (2.7)$$

Donde K_t es un coeficiente de transporte de suelo. La producción del suelo se aproxima como que disminuye exponencialmente con la profundidad.

$$-\frac{\partial e}{\partial t} = P_o e^{-\alpha D} \quad (2.8)$$

Donde P_o es la máxima producción del suelo.

El estudio del efecto de la topografía sobre el deslizamiento superficial inducido por lluvias en las laderas, considera la curvatura en la dirección del gradiente(perfil de la curvatura) y la dirección perpendicular para el gradiente(contorno). El perfil de la curvatura es importante porque este controla los cambios de velocidad del flujo de masa hacia abajo de la pendiente y el contorno o plano de curvatura define la convergencia topográfica, el cuál es un control importante sobre la concentración del flujo en el subsuelo [39]. En el modelo de pendiente infinita impone la condición que el flujo de agua subterránea es paralelo a la superficie. Bajo estas hipótesis se expresa el factor de seguridad[75],[76].

$$\mathbf{FS}(\mathbf{x}) = \frac{C' + [(D - h(x))\gamma_m + h(x)\gamma_b] \cos^2\beta \tan\phi'}{[(D - h(x))\gamma_m + h(x)\gamma_s] \sin\beta \cos\beta} \quad (2.9)$$

Donde C' es la cohesión total del suelo, ϕ' es el ángulo de fricción interna, D es la profundidad a el plano de cortante, β es el ángulo local de la pendiente, h es el nivel de altura desde este plano, y γ_m , γ_s y γ_b son respectivamente el peso específico de humedad, saturación y boyante.

2.3. Geometría de la Ladera

Es conocido la importancia de la geometría de la ladera, para ello se han creado funciones que permiten modelar la forma de la ladera, tal es el caso de la función propuesta por Evans[77].

$$z(x, y) = E + H\left(1 - \frac{x}{L}\right)^n + w y^2 \quad (2.10)$$

Donde z es la elevación, x es la distancia horizontal en la dirección longitudinal aguas abajo de la superficie y es la distancia horizontal desde el centro de la pendiente en la dirección perpendicular a la dirección de la longitud, E es la elevación mínima de la superficie por encima de un punto arbitrario, H se define la diferencia de elevación máxima, L es la longitud total de la superficie, n es un parámetro del perfil de la curvatura y W es un parámetro de la forma del plano.

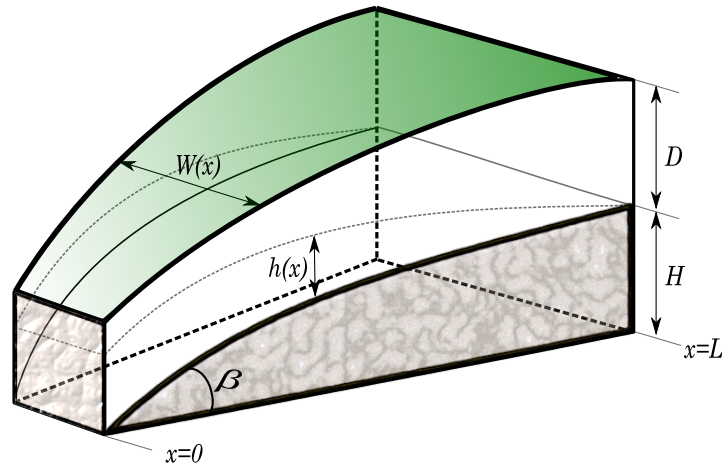


Figura 2.1: Vista tridimensional de una ladera convergente en la parte superior de un perfil de base convexa

Una segunda propuesta para el perfil de curvatura es presentado por Stefano[78]

$$z(x) = E + H\left(1 - \frac{x}{L}\right)^n \quad (2.11)$$

Donde H es la diferencia de elevación de la capa rocosa a lo largo de la ladera, L es la correspondiente longitud de la pendiente y el exponente n define el perfil de la

curvatura. El parámetro E define la referencia datum para la elevación. Note que cuando $E=0$ esta ecuación asume que el datum de referencia coincide con el afloramiento de la roca de fondo cerca al canal. Los valores de $n > 1$ define el perfil cóncavo, $n < 1$ define el perfil convexo y para $n = 1$ el perfil es lineal.

Una tercera propuesta es la presentada en el trabajo de Fan y Bras[38], donde utilizan una función polinomial de segundo orden para describir los diferentes perfiles de la ladera.

$$z(x) = \alpha + \beta x + \gamma x^2 \quad (2.12)$$

El parámetro γ de este polinomio tienen asignado una responsabilidad, la de medir la curvatura de la pendiente. Por tanto si $\gamma = 0$, significa que la pendiente es constante y si $\gamma > 0$, la pendiente es cóncava hacia arriba. Adicionalmente introducen una variable capacidad de almacenamiento en el subsuelo $S_c(x, t)$, que permite bajar la dimensionalidad de la ecuación diferencial parcial de Richard, el cual es difícil de resolver numéricamente. Siendo $S_c(x, t) = fw(x)D(x)$ donde $w(x)$ es la función ancho de la ladera, $D(x)$ es un promedio de la profundidad del suelo. Un método para calcular el factor de seguridad en una pendiente infinita con una zona no saturada es propuesto por Talebi, Uijlenhoet y Troch [79],[80], se asume que el nivel freático, el peso específico de humedad y la cohesión del suelo dependen de la coordenadas x . La profundidad del suelo y el ángulo son constantes, considerando la ecuación 2.9, obtenemos:

$$\mathbf{FS}(\mathbf{x}) = \frac{C'(x) + [(1 - \sigma(x))\gamma_m + \sigma(x)\gamma_b] D(x) \cos^2\beta \tan\phi'}{[(1 - \sigma(x))\gamma_m + \sigma(x)\gamma_s] D(x) \sin\beta \cos\beta} \quad (2.13)$$

2.4. Modelo hidrológico HSB

El modelo HSB proviene de colapsar la ecuación de Richard de tres a dos dimensiones, al introducir la variable capacidad de humedad del suelo en la dimensión vertical de la ladera. Esta define el espesor del espacio de poros a lo largo de la ladera. La ecuación HSB, expresa la dinámica de la saturación del perfil de la capacidad de almacenamiento de agua en el subsuelo a lo largo de una ladera de poca profundidad y permite incluir información del perfil de la ladera y la influencia del factor externo de la lluvia(N).

Con la ecuación de Darcy a lo largo de la ladera de ancho la unidad, en un sustrato de roca, es dada por:

$$q = -kh\left(\frac{\partial h}{\partial x}\cos\beta + \sin\beta\right) \quad (2.14)$$

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

$$f\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} + N \quad (2.15)$$

Siendo f la porosidad de drenaje, β es el ángulo de inclinación de la ladera, k la conductividad hidráulica.

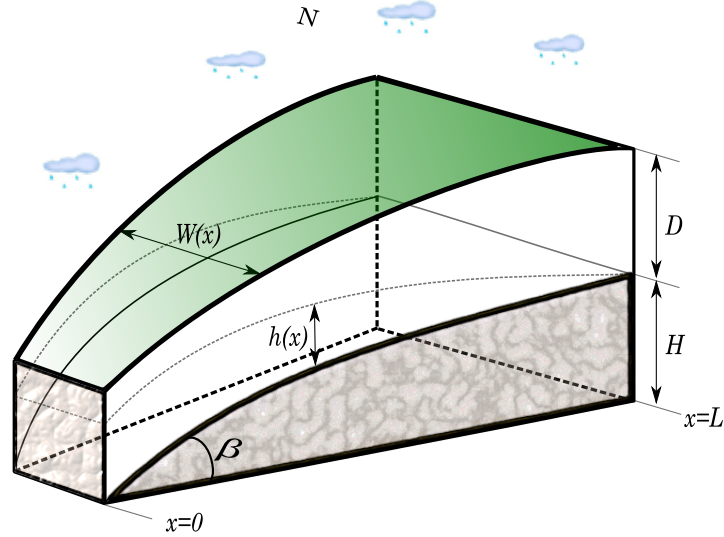


Figura 2.2: Definición esquemática de un acuífero en la ladera.

Siendo $h(x, t)$ la representación de la elevación del nivel freático medido desde la capa impermeable subyacente, x se mide paralelamente a la capa impermeable y t es el tiempo.

Ahora combinamos la ecuación de Darcy junto con la ecuación de continuidad para obtener la Ecuación de Boussinesq [81].

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{f} [\cos \beta \frac{\partial}{\partial x} (h \frac{\partial h}{\partial x}) + \sin \beta \frac{\partial h}{\partial x}] \quad (2.16)$$

Ahora introducimos la función de almacenamiento de humedad, definido como $S(x, t) = fw(x)h(x, t)$ donde $w(x)$ es la función ancho de la ladera. El flujo de descarga volumétrica $Q(x, t) = w(x)q$, el almacenamiento de humedad $S(x, t)$ y la conservación de masa:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} + Nw \quad (2.17)$$

A partir de la ecuación de Darcy 2.14 y utilizando la expresión de la saturación en términos de $h(x)$, junto con la ecuación de la continuidad 2.17 obtenemos la ecuación hillslope-storage Boussinesq (HSB).

$$f \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{k \cos \beta}{f} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{S}{w} \left(\frac{\partial S}{\partial x} - \frac{S}{w} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + k \sin \beta \frac{\partial S}{\partial x} + f N w \quad (2.18)$$

La ecuación diferencial parcial 2.18, representa la dinámica de la saturación en la capa permeable, si la $S(x, t) > S_c(x, t)$ entonces representa una saturación del suelo, ver Figura 2.3.

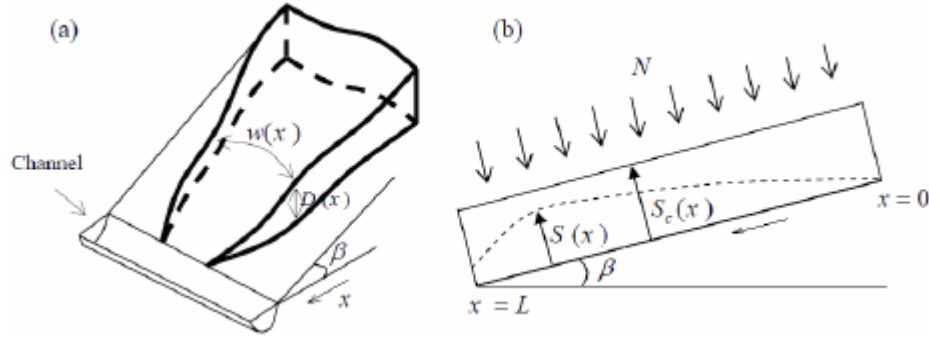


Figura 2.3: **a)** Una vista en tres dimensiones del perfil de la ladera , **b)** Un esquema unidimensional del perfil de la ladera que presenta dos estratos de suelo, el permeable que recibe la lluvia y el estrato impermeable(capa rocosa) [40]

Para la solución de esta ecuación diferencial parcial 2.18, se aplicó diferencias finitas con el método de runge kuta de orden dos, el lenguaje que se utilizó fue python en el ambiente de ArcGIS, esto permite tomar información de la base de datos de cada uno de los mapas temáticos de los parámetros de la zona de estudio. Sin embargo para mejorar la solución numérica, existen métodos como el de dirección alterna implícita, ADI[82], propuesto por Paeceman y Rachford en 1955, su ventaja es que las ecuaciones que tienen que resolverse en cada paso tienen una estructura simple y puede resolverse con un algoritmo de matriz tridiagonal, una mejora a este método, es el ADI compact de alto orden(HOC)[83], ofreciendo una mayor exactitud. Este último método será apropiado e idóneo al mejorar la calidad de la información primaria de los parámetros geotécnicos de la ladera.

Un primer escenario teórico que se consideró fue una ladera plana, con un ancho constante de 50 m, con una inclinación del 26° , un ángulo intrínseco de 52° , una cohesión efectiva de 7 KNm^{-3} una porosidad de 0.3, conductividad hidráulica de 24 m/h, la precipitación fue tomada del día 24 de enero del 2011, de la estación meteorológica del Emacs de la ciudad de Manizales, la estación envía datos de temperatura del aire, velocidad del viento, dirección del viento, humedad relativa, evapotranspiración y precipitación cada 5 minutos. La precipitación se tomó cada 6 datos y se sumó para definir un periodo $T = 30 \text{ minutos}$, luego se resuelve la ecuación diferencial parcial 2.18 con una condición inicial del 10 % de $S_c(x)$, una condición de frontera de $S(x = 0, t) = 0$ y en $x = L$, $K \frac{\partial S}{\partial x} + US = 0$, siendo $K = \frac{k p D \cos i}{f}$ y $U = \frac{k \sin i}{f}$.

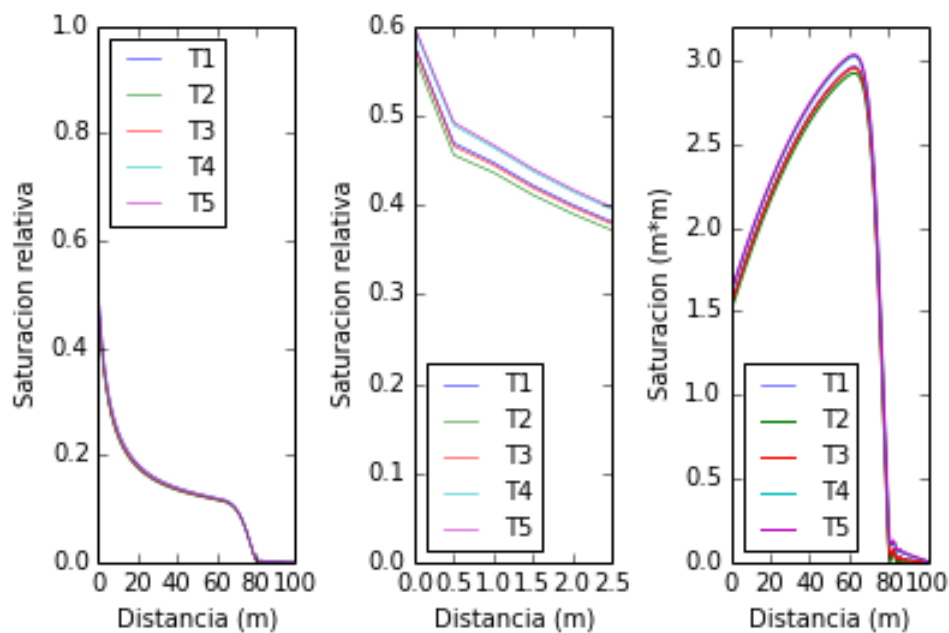


Figura 2.4: Respuesta de saturación de una ladera, para dos diferentes T periodos de lluvia consecutivos

En la figura 2.4, la información de precipitación se tomó del archivo técnico que envía la estación meteorológica, el programa principal lee los datos de precipitación y calcula el periodo $T1 = 0,6mm$, $T2 = 0,1mm$, $T3 = 0,4mm$, $T4 = 0,5mm$, $T5 = 0,7mm$. Luego procede a calcular numéricamente la saturación de la ladera.

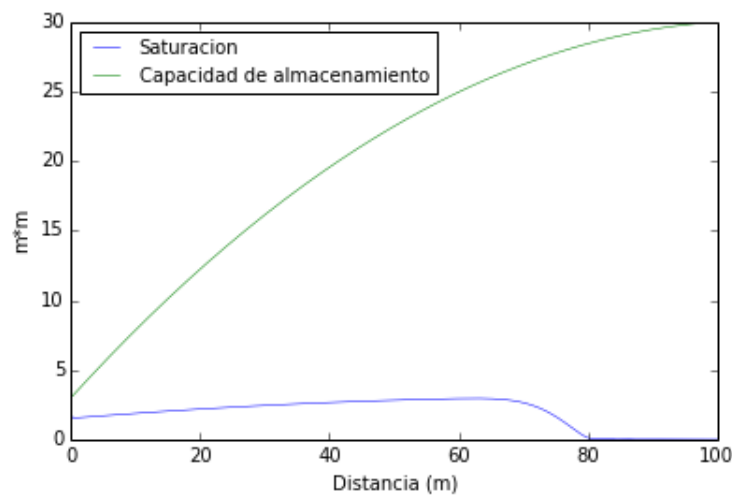


Figura 2.5: La capacidad de saturación de la ladera y una respuesta a la saturación para un periodo $T1$.

En la figura 2.5, se gráfica la capacidad de saturación $S_c(x)$ de la ladera, con un profundidad D que varia de 0.2 en la parte baja de la ladera y 2m en la parte más alta de la ladera. y con un valor de $L=100m$

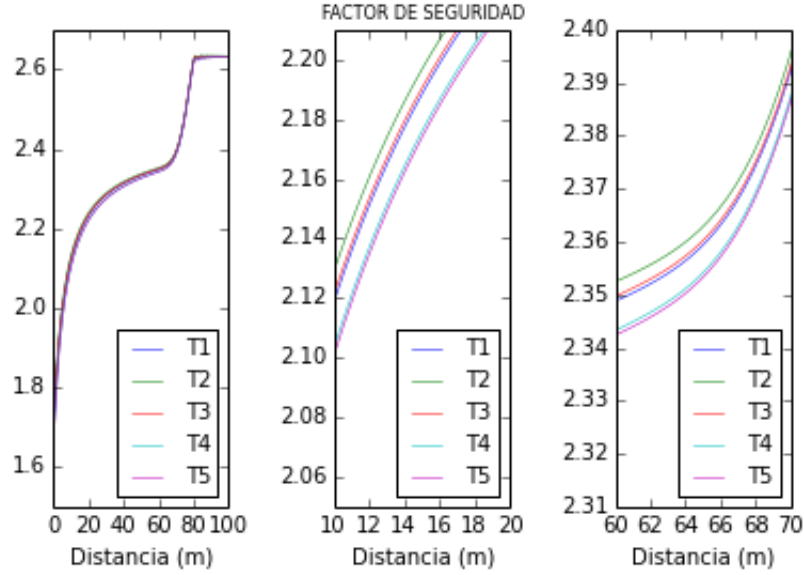


Figura 2.6: Factor de Seguridad para T periodos de lluvia de diferentes precipitaciones

Utilizando la ecuación de factor de seguridad 2.13, donde contribuye la respuesta de la saturación de la ladera para cada una de los T. Se considero $\gamma_m = 1000 \text{KNm}^{-3}$, $\gamma_s = 1600 \text{KNm}^{-3}$ y $\gamma_b = 600 \text{KNm}^{-3}$ son respectivamente el peso específico de humedad, saturación y boyante.

Capítulo 3

Herramienta de Monitoreo de Deslizamiento de Suelos para Manizales

3.1. Introducción

La ley 1523 de 2012, adoptó una política Nacional del Riesgo de Desastres y estableció el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Con la creación del decreto 4147 de 2011, se da inicio a la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres(UNGRD), en su estructura interna, la UNGRD contiene tres subdirecciones con diferentes objetivos: el Conocimiento del Riesgo, Reducción del Riesgo y Manejo de Desastres. Este trabajo esta en coherencia con los intereses de las buenas prácticas que persigue la **subdirección para el Conocimiento del Riesgo**, entre sus funciones esta la de promover y fortalecer el desarrollo de instrumentos de monitoreo del riesgo de desastres a través de las diferentes entidades técnicas del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres- SNPD.

En el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres para el periodo del 2013-2025, denominado **Una Estrategia de Desarrollo**, se consigna la siguiente motivación que nos muestra que estamos en sintonía con las necesidades que son requeridas en nuestro país. *"Se deben fortalecer los servicios de vigilancia y alerta que permiten monitorear el comportamiento de fenómenos sísmicos, volcánicos e hidrometeorológicos, así como mejorar la instrumentación y los procesos de investigación aplicada. El Servicio Geológico Colombiano, el IDEAM y la DIMAR, deben tomar las medidas necesarias para la ampliación y consolidación de las redes de monitoreo existentes, así como determinar las necesidades de adecuación tecnológica. Se deberá fomentar el trabajo coordinado con universidades y centros de investigación de carácter regional."*

En Manizales los suelos susceptibles a deslizamientos superficiales, son en su mayoría detonados por los periodos de lluvias influenciada por la zona de convergencia intertropical(ZCIT),el ENSO, corrientes de chorro, etc. Estos suelos son monitoreados con la *estrategia semáforo*, que esta basada en relaciones de lluvia-deslizamientos regis-

tradas en la región de los Andes, actualmente se cuenta con una red meteorológicas de 16 estaciones que en tiempo real envía los datos de precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento, esto fue iniciativa de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, que encontró eco en la oficina municipal de prevención y Atención de Desastres(OMPAD), actualmente se llama la Unidad de Gestión del Riesgo(UGR) y desde el 2003 desarrolla esta propuesta, en la actualidad se está ampliando el número de estaciones meteorológicas para la ciudad y para el departamento.

La red de monitoreo hidrometeorológico para la vigilancia de las cuencas urbanas y rurales, tiene un centro de comando donde se registra la transmisión telemétrica-mente en tiempo real de datos de las variables climáticas asociadas a la prevención de desastres, se procesa y se analiza la información proveniente de las diferentes estaciones meteorológicas, para luego el comité local de emergencias entregar una alerta de alarma a la comunidad, frente al posible deslizamiento de suelos a través de la página de internet del Instituto de Asuntos Ambientales, figura 3.1. Esto ha permitido conocer el entorno urbano ambiental, beneficiar el bienestar de la comunidad y centrar la inversión en la gestión integral del riesgo, mediante estrategias de tipo estructural y no estructural en las zonas más vulnerables,[84].

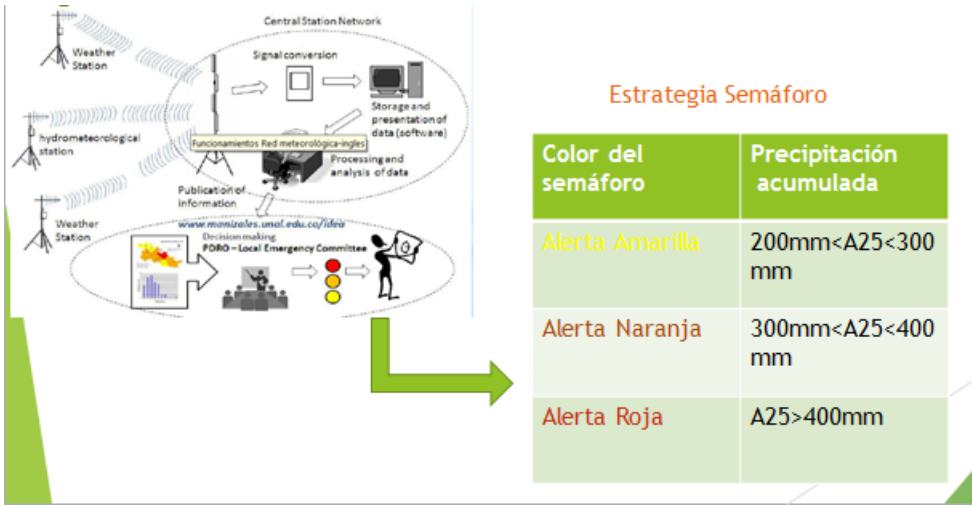


Figura 3.1: Sistema de alerta temprana usando la estrategia semáforo

Como parte importante del conocimiento del riesgo es la utilización de los sistema de alerta temprano, la Unesco, estableció que el éxito de un sistema de alerta temprano(SAT), requiere de condiciones que permitan tomar decisiones oportunas en el tiempo, para minimizar las pérdidas humanas ante un evento de peligro. El SAT como metodología, se compone de cinco elementos, siendo de nuestro interés el de fortalecer la componente de análisis y pronóstico de las amenazas, a través de un modelo hídrológico HSB con la participación de la red de estaciones meteorológicas. Diferentes tipos de modelos hidrológicos se citaron en la introducción, pero en cuanto

a la forma como se maneja la distribución espacial se puede diferenciar entre modelos distribuidos y agregados. Los primeros dividen la cuenca en una rejilla (o mapa raster en la terminología de SIG) y se dan características diferentes a cada celda de la rejilla. Mientras que los modelos agregados dividen la cuenca en varias sub-cuencas (delimitadas por polígonos en la terminología SIG). A cada sub-cuenca se le asigna características diferentes. La resolución espacial o nivel de detalle, aumenta a medida que las celdas (en el caso distribuido) o las sub-cuencas (en el caso agregado) sean más pequeñas. Así pues, el área de cada sub-cuenca es una variable muy importante para los modelos agregados [85],[86]. Estos dos enfoques permiten vincular ecuaciones diferenciales que para este trabajo usaremos la segunda opción.

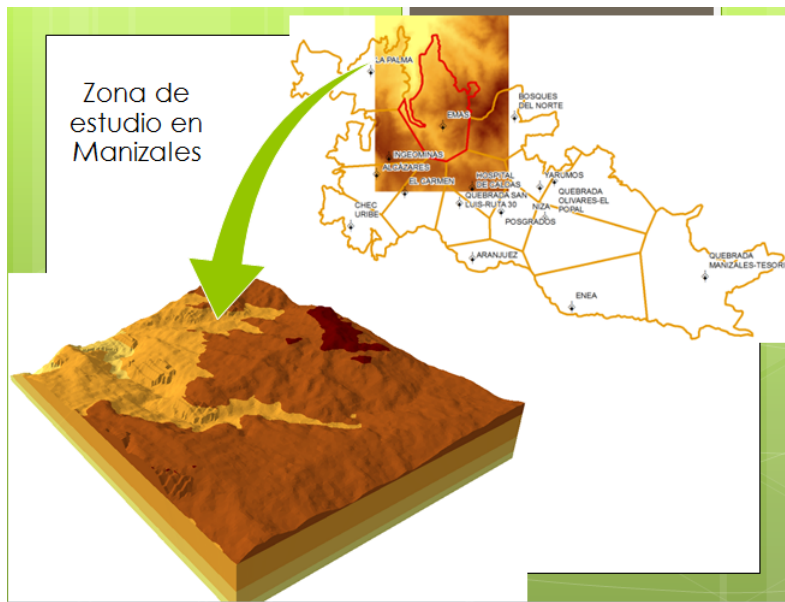


Figura 3.2: Comuna Ciudadela del Norte de Manizales

En la ciudad de Manizales, se selecciono un área aproximada de 367 km^2 ubicada en la comuna Ciudadela del Norte, sus coordenadas geográficas están entre latitud $5^{\circ}4'49,42''\text{ N}$ y longitud $75^{\circ}30'32,19''\text{ W}$. con un promedio de temperatura 26°C y humedad relativa de 82 %. En esta zona se tomo una ladera piloto ubicada en la zona conocida como Balastrera, donde hay asentamiento y se encuentra dentro de la zona identificada como de alta amenaza de deslizamiento, esta zona esta dentro de la cuenca hidrográfica de la Quebrada Olivares, que se encuentra paralela a la malla vial antigua hacia Medellín y con una zona rural en constante crecimiento.

3.2. Geología

La Geología de la zona de estudio pertenece al complejo Quebradagrande (figura 3.3), comprende un miembro volcánico(Ksv) y un miembro metasedimentario(Ksc). La

formación Quebradagrande(Kgd), constituida por intercalación de estratos areniscas, areniscas conglomeráticas, lodolitas silíceas y chert, la apariencia es masiva presentando un alto grado de fracturamiento, diaclasamiento, plegamiento, aplastamiento y orientación de los clastos por encontrarse en el área de influencia del Sistemas de Fallas de Romeral. Aflora principalmente al Noreste de la ciudad, en las comunas 5 y 6. Los Gabros (Kgb), corresponde al Norte de la ciudad de Manizales sobre el Río Olivares, en el sector del barrio Galán. El rasgo más característico de estos cuerpos gabroicos es la coloración verde que ellos presentan por la presencia de olivinos. Los afloramientos más frescos se encuentran en el cauce del Río Olivares, aunque también se observan afloramientos muy meteorizados en un sector de la carretera Manizales - Neira. Formación Manizales (Tsmz). Consiste de depósitos fluviovolcánicos de alta compactación, constituidos por conglomerados clastosoportados embebidos en una matriz arenosa grisácea con algunas coloraciones rojizas por oxidación; los clastos van de subangulares a subredondeados y son principalmente de chert, diabasa y fragmentos conglomeráticos. En Manizales se ubica al Oeste sobre las comunas 1, 3 y 11, principalmente. Depósitos de Caída Piroclástica (Qcp). Son materiales recientes que forman una secuencia estratigráfica inconsolidada, constituida por cenizas, arenas volcánicas y pómez tamaño lapilli provenientes de la actividad explosiva del complejo volcánico Ruiz-Tolima. El color varía desde gris hasta café oscuro. Presenta horizontes de materia orgánica y generalmente se encuentra alterada a arcillas, ocasionalmente arenosas y por lo general muy plásticas.[87]

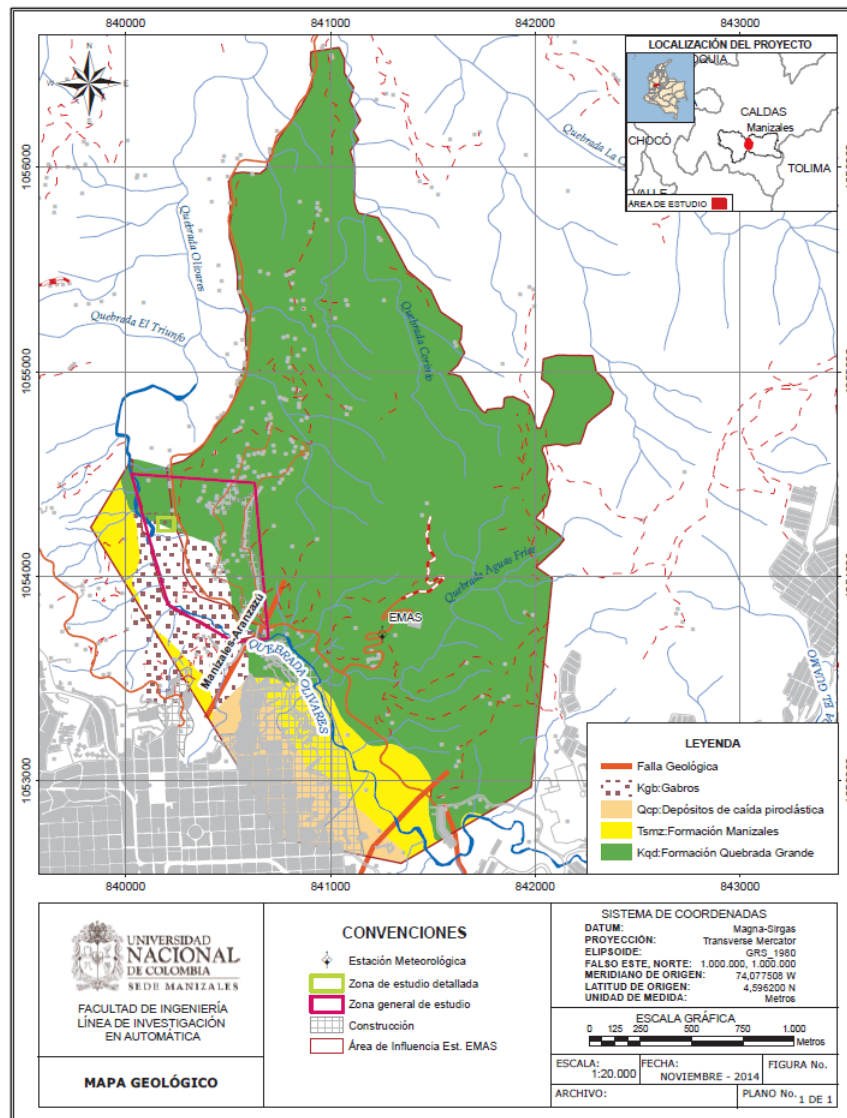


Figura 3.3: Geología de la Zona de estudio, EMAS

3.3. Geomorfología

Manizales esta formada por unidades geomorfológicas que se componen por características litogénica, características físicas, comportamiento mecánico y de la influencia de la dinámica social y estructural de las formaciones superficiales.

Unidades Erosionales (E). Son zonas fácilmente erosionables dadas sus características geológicas y que se ven grandemente afectadas por la actividad antrópica. Están relacionadas directamente con procesos erosivos gravitacionales; se evidencia por la presencia de pendientes abruptas, colinas erosionales y coluviones. Unidades Aluviales (Al). Ubicadas en los bajos topográficos y valles aluviales de la ciudad, restringidas a

los cauces y afluentes de las dos principales vertientes que la cruzan, al Norte la quebrada Olivares y al Sur el Río Chinchiná, donde se observa la mayor extensión de esta unidad. Unidades Antrópicas (An). Son zonas relacionadas directamente con la modificación que el hombre hace del suelo para urbanizar, mediante la realización de cortes y rellenos y que corresponden a la parte construida de la ciudad.

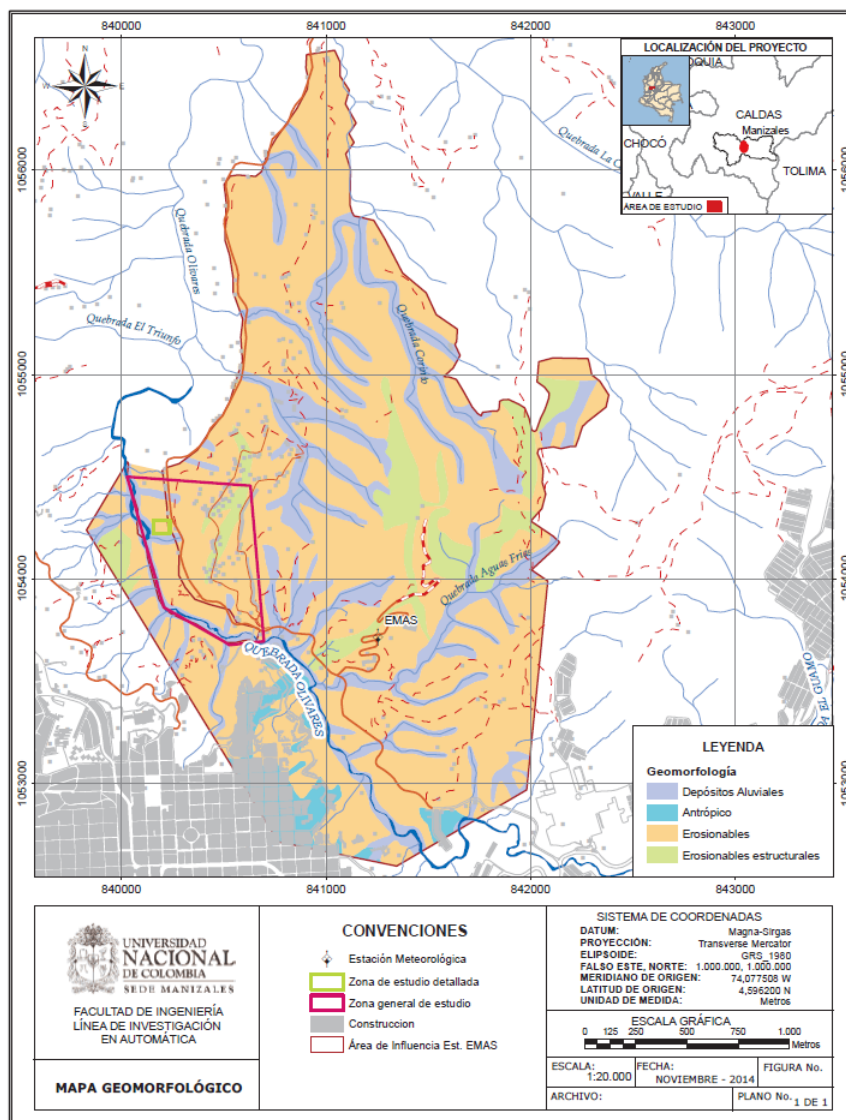


Figura 3.4: Geomorfología de la Zona de estudio, EMAS

3.4. Hidrográfica

La quebrada Olivares (también denominada Minitas) nace a 2700 m.s.n.m., en inmediaciones del Alto del Zancudo y el Alto de La Coca; recibe antes de entrar a la

cabecera municipal, un sinnúmero de caños y quebradas. Corre al norte de la ciudad y se encuentra con el río Guacaica a los 1350 m.s.n.m. La Avenida Santander sirve de divisoria de aguas de la microcuenca con el río Chinchiná, al cual llegan cauces que atraviesan barrios y comunas de la zona sur de la ciudad. Tanto la quebrada Olivares como la Manizales presentan problemas de contaminación; la primera por recibir aguas residuales domésticas de descoles localizados en sus orillas, y la segunda por recibir vertimientos del núcleo industrial localizado en el sector de Maltería y por el desarrollo de actividades mineras en la zona.

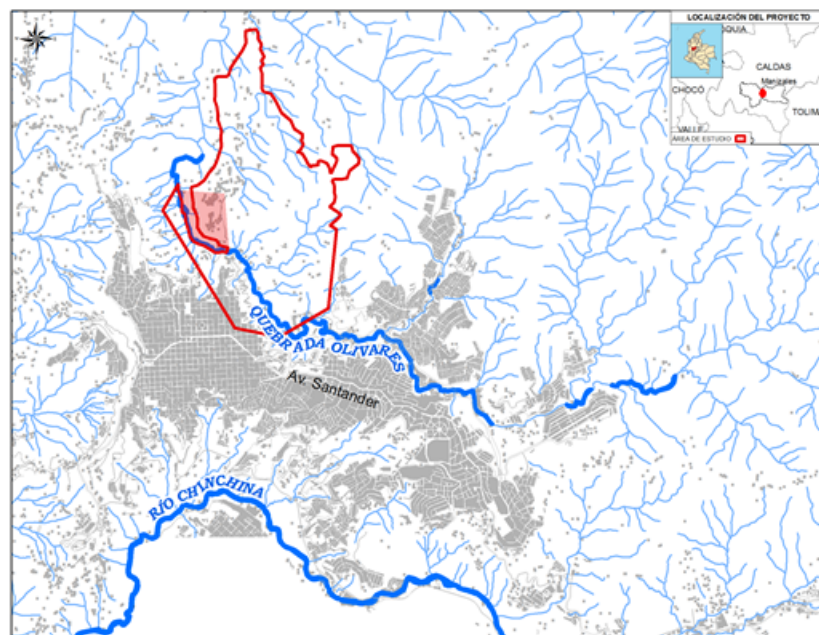


Figura 3.5: Mapa de Hidrográfica la Zona de estudio

3.5. Suelos

Los suelos de clase VII, se caracterizan por presentar un relieve quebradizo y escarpado, susceptible a la erosión de moderada alta y baja productividad. Los suelos clase VI se encuentran en sectores del occidente.

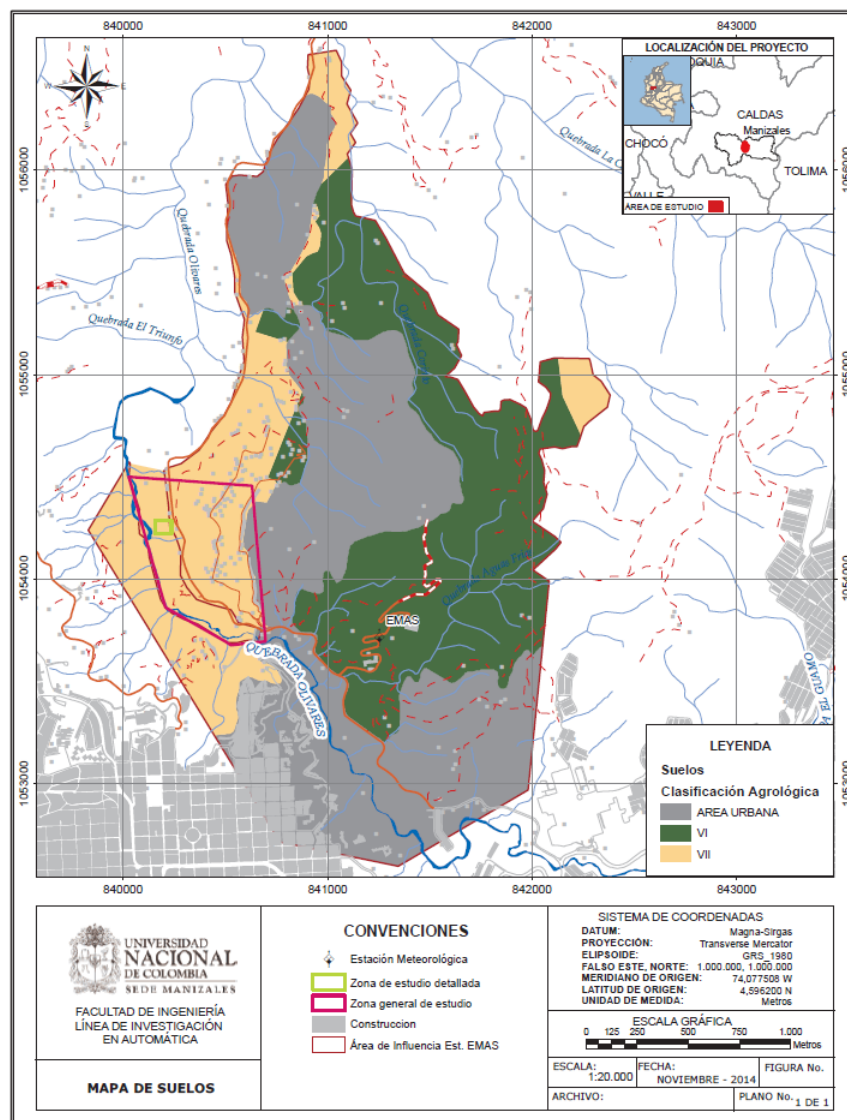


Figura 3.6: Mapa de Suelos de la Zona de estudio

3.6. Herramienta para Monitorio de Deslizamientos Superficiales

Esta es una propuesta que quiere sumar a los intereses del proyecto de Gestión de Riesgos en Manizales, para fortalecer el sistema de alerta temprana en la zona rural de Manizales, que pretende mejorar el conocimiento del riesgo de desastres, mediante el monitoreo del talud a posibles deslizamientos de suelos superficiales por el detonante de precipitación, se vinculó la información de la estación meteorológica del Emas, brindando información en tiempo real de las variables termodinámicas, entre ellas la precipitación, que para este trabajo actúa como un parámetro junto a la porosidad,

conductividad, ángulo de la pendiente y el perfil de profundidad del suelo. Con esta información disponible podemos predecir una saturación del suelo mediante la ecuación HSB y con ayuda del factor de seguridad inferimos un estado de alerta sobre la ladera que se esta aplicando el monitoreo (Fig 3.7).

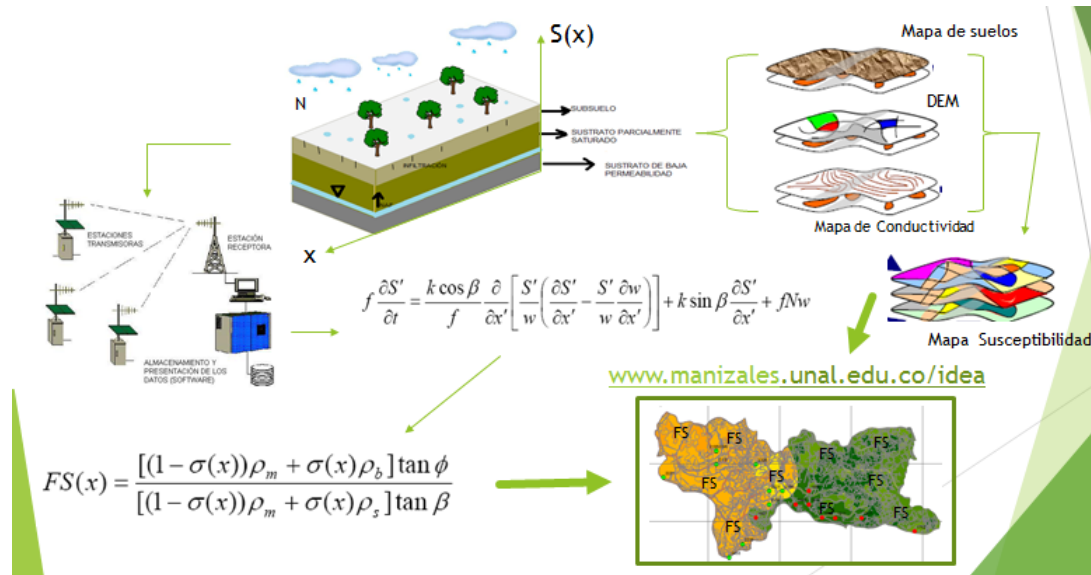


Figura 3.7: Metodología para monitoreo de deslizamiento superficiales por lluvias

En una prueba para esta metodología, se tomo información correspondiente al mes de noviembre de precipitación del año 2012, se sumo la precipitación para cada día, se presenta la información correspondiente al mes de noviembre Fig 3.8.

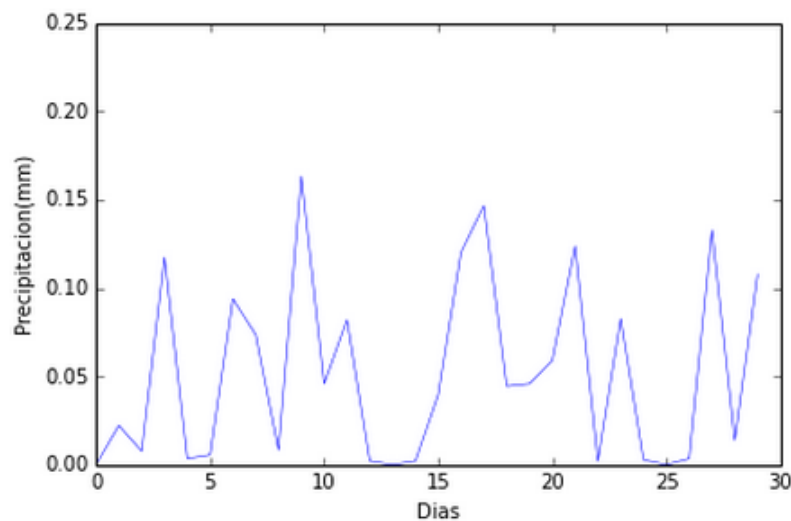


Figura 3.8: Precipitación registrada por la estación meteorológica Emas.

Ahora señalamos la zona de donde tomamos ladera para realizar el análisis de la estabilidad por causa del factor detonante de precipitación, Fig 3.9. Esta zona esta calificada como de alto riesgo de deslizamientos por el plan de ordenamiento territorial del municipio de Manizales y se digitalizó el mapa de amenaza de deslizamientos de suelos para la zona de interés.

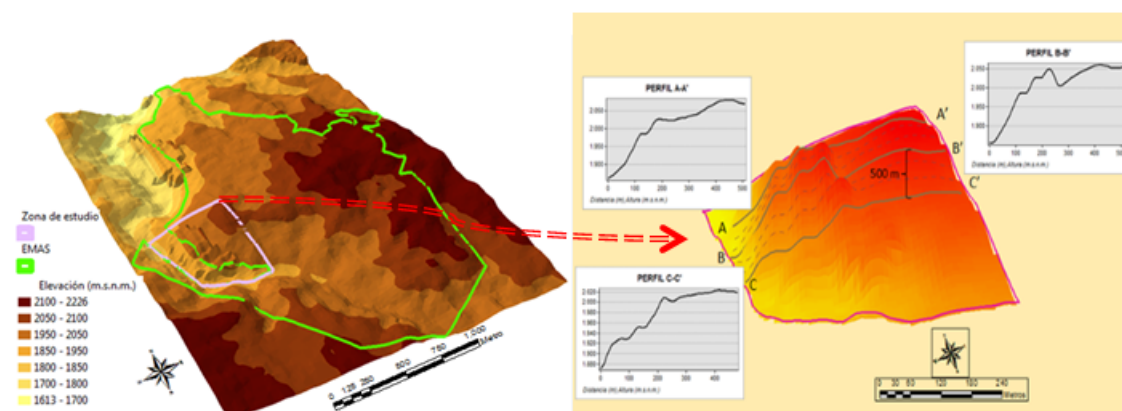


Figura 3.9: Se consideran tres perfiles de la zona estudio

La ladera de estudio se caracterizó con un mapa de pendientes(Fíg 5 del Apéndice), mapa de conductividad hidráulica que se obtuvo a partir del programa Soil Water Atmosphere Plant(Fíg 3 del Apéndice), los otros parámetros de porosidad, ángulo de fracción interna y el espesor son valores teóricos propuestos,[79],[80].

Para dar inicio al proceso de evaluación de estabilidad de la ladera, el script principal en python, carga la información del mapa de pendientes y se cálculo un promedio, carga la información del mapa de conductividad hidráulica, se propone valores teóricos de los otros parámetros que caracterizan el suelo como la porosidad,el ángulo de fricción interna y por último se cargo el archivo de datos meteorológicos que entrega la estación del Emas, se utilizó la columna de precipitación y se promedio para cada día.

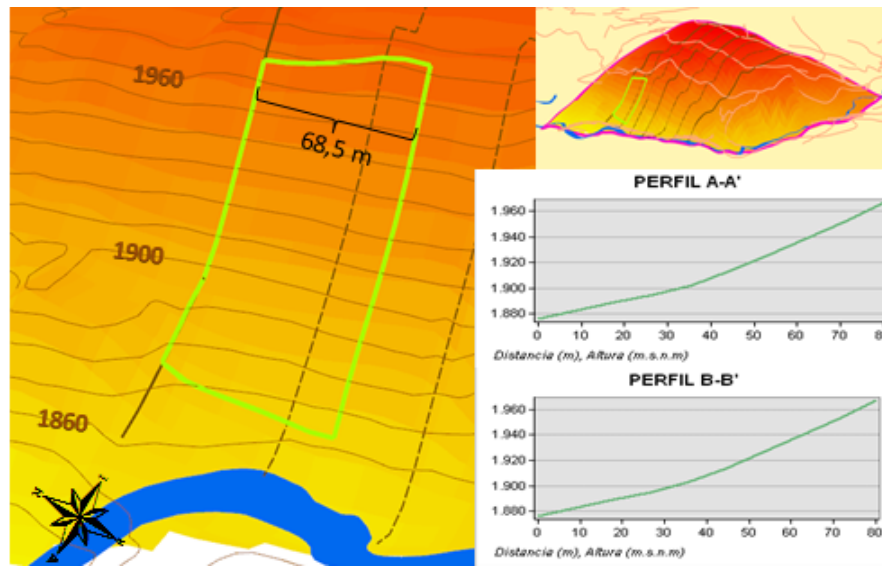


Figura 3.10: Ladera de estudio

Finalmente el script principal invoca el método numérico que resuelve la ecuación diferencial parcial HSB 2.18, con una condición inicial del 10 % de $S_c(x)$, una condición de frontera de $S(x = 0, t) = 0$ y en $x = L$, $K \frac{\partial S}{\partial x} + US = 0$, siendo $K = \frac{k p D \cos i}{f}$ y $U = \frac{k \sin i}{f}$. Con un espesor de 2m en la cabecera, 1.5 m en la mitad de la ladera y 0.2m en el pie de la ladera, Fig 3.11.

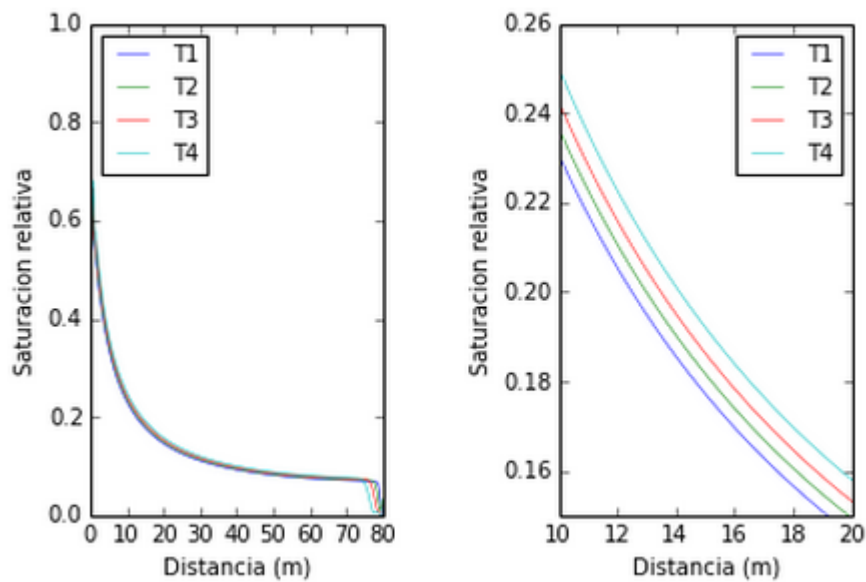


Figura 3.11: Saturación relativa

El T1 es el día 5, T2 el día 10, T3 el día 17, T4 el día 27. Utilizando la ecuación de factor de seguridad 2.13 , donde contribuye la respuesta de la saturación de la ladera para cada una de los T. Se considero $\gamma_m = 1000KNm^{-3}$, $\gamma_s = 1600KNm^{-3}$ y $\gamma_b = 600KNm^{-3}$ son respectivamente el peso específico de humedad, saturación y boyante.

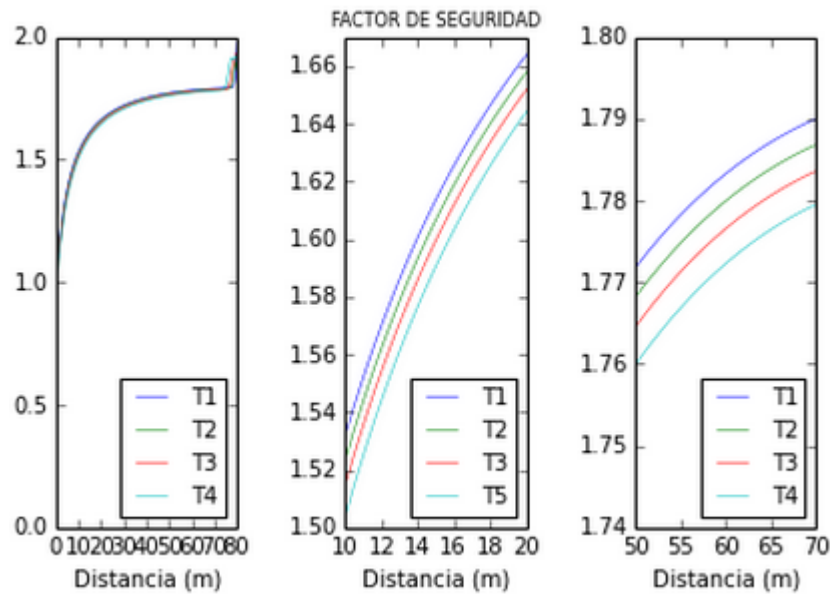


Figura 3.12: Factor de Seguridad

La zona de estudio esta localizada en la parte rural de Manizales, conocida como Balastreira, en ella, se demarca la ladera que se monitorea y utilizando la estrategia de los colores de semáforo, se informa sobre su estabilidad. El color rojo para alta amenaza de deslizamiento y el color naranja para amenaza media.

3.6. HERRAMIENTA PARA MONITORIO DE DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES³⁷



Figura 3.13: Factor de Seguridad en la zona

Para la misma zona, pero con una profundidad constante de 1m, se evaluó la estabilidad de la ladera con el factor de seguridad 2.13

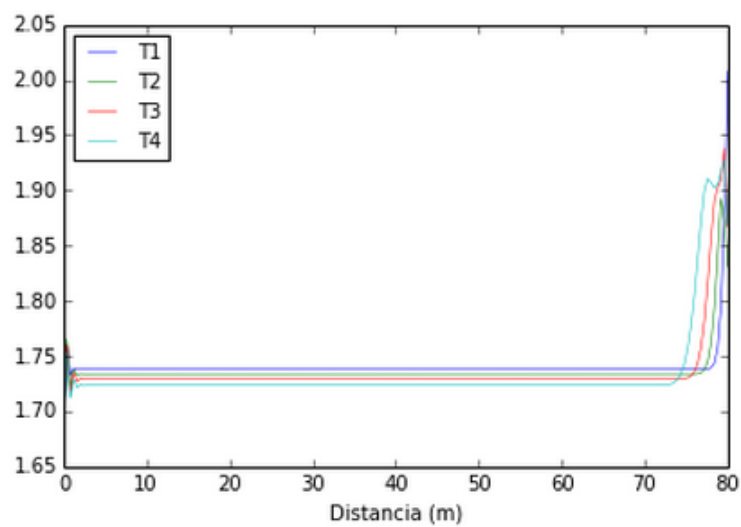


Figura 3.14: Factor de Seguridad

Cambiando el espesor de la capa permeable a 1m, se estableció una alerta de amenaza naranja, Figura 3.15.



Figura 3.15: Factor de Seguridad en la zona

Capítulo 4

Elementos para el Modelado de Dinámica Sistemas

4.1. Introducción

En la construcción del modelo de movimiento de masa, se considera tres estratos Fig(1). El primer estrato ubicado cerca a la superficie del suelo es posible encontrarlo con cobertura vegetal, al caer la lluvia, el agua se dispersa en la superficie del suelo ocurriendo los siguientes procesos: la infiltración, el avance del frente húmedo y el contenido de agua. En el segundo estrato se presenta la acumulación de agua y se deposita como nivel de agua freático, luego ocurre la transición del caudal vertical y horizontal, el tercer estrato es la roca de fondo de características poco permeables.

ESQUEMA DE DESLIZAMIENTO DE MASA

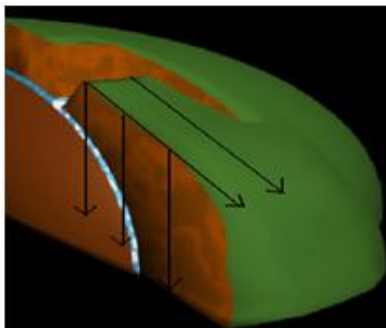


Figura 4.1: Presentación de un modelo de deslizamiento de masa por el factor detonante de lluvia

En este modelo se considera como factor detonante exógeno la lluvia, la razón es dada por nuestras condiciones topográficas y climáticas que rodean a Colombia, es bien

conocido que estamos afectados por la zona de confluencia intertropical (ZCIT), entre otras, que son responsables de las precipitaciones en Colombia. Sin embargo, la ZCIT inicia su recorrido de sur a norte entre enero-febrero y de norte a sur entre julio-agosto. En su recorrido produce dos temporadas lluviosa en gran parte de la Región Andina. En Colombia los meses de abril, mayo y octubre noviembre son los periodos de lluvias anuales, según estudios realizados es donde se presentan un incremento de deslizamientos de suelos generando daños a en las carreteras y en las poblaciones, obligando a los gobiernos de turno a invertir en grandes recursos financieros para recuperar las zonas afectadas.

4.2. Modelado

La lluvia actúa sobre la estabilidad del suelo de dos maneras: por su **intensidad**, disminuyendo la cohesión aparente, a su vez disminuye la resistencia al corte y el factor de seguridad, produciendo movimientos de masa superficial(hasta 2m) [88], [89]. Por su **duración**, causa un aumento en el nivel freático incrementando la presión de poros sobre la superficie de falla potencial produciendo movimiento de masa profundos, [90]. Los reportes científicos señalan que existe una correlación entre el nivel freático y las precipitaciones,[23],[27], [91], [22].

Por consiguiente se presentan trabajos estadísticos que buscan encontrar el umbral crítico de lluvia como detonante de movimientos de masa, buscar este umbral tiene diferentes consideraciones entre ellas tenemos: *lluvia antecedente*, *intensidad de la lluvia*, *relación duración intensidad*, *relación lluvia entecedente y lluvia diaria*, *relación del evento y la lluvia anual promedio*, entre otras [92], [93].

4.2.1. Modelo para Suelos homogneos no Saturados

Se sabe que las precipitaciones, la vegetación, el sol y el suelo constituyen la dinámica del ciclo hidrológico, manifestandose en diferentes procesos como: la infiltración, la escorrentia, la percolación, los acuíferos y la evapotranspiración. Causando cambios en los parámetros que caracterizan el suelo, entre ellos estan: la succión, la cohesión, la porosidad, la granulometría y la conductividad hidráulica. Cada uno de los procesos y parámetros citados tienen asociado un bagaje de teoría que permite enriquecer el modelo de deslizamiento de suelos. Utilizando la metodología de *la dinámica de sistemas* se identificó los atributos que caracterizan al deslizamiento de suelos y la relación entre ellos.

A continuación se presenta el diagrama de influencias de los atributos que contibuyen a la dinámica de la estabilidad del talud.

En el modelo, se resaltan los atributos más importantes (en amarillo), que acumulan la responsabilidad de la inestabilidad del terreno. A continuación se presentan las relaciones entre los atributos del sistema:

Relaciones Causales

- La **Intensidad de lluvia** al *aumentar*, realiza una *disminución* en la **cohesión aparente**, que a su vez, *disminuye* la **resistencia al cortante**, debilitando el factor de seguridad y llegando a producir **deslizamientos superficiales**. [89], [90].
- Las **lluvias de larga Duración** *aumentan* el **nivel de agua freática**, e inmediatamente la **presión de poros** *aumenta*, llegando a producir **deslizamientos de profundos** [88].
- En suelos homogéneos cuando la **conductividad cerca a la superficie** es alta, permite una mayor **infiltración**, *aumentando* rápidamente el **Nivel de agua Freática** [89].
- Durante la lluvia, la **capacidad de infiltración** es controlada por la **permeabilidad**, el **contenido de agua** y la **topografía de la pendiente** [94]..
- la **permeabilidad** varia con la **cohesión**, con la **profundidad**, con el **contenido de agua volumetrica**, con la **porosidad** y depende de la dirección [95].
- La **cohesión** en suelo residuales no saturados se puede dar como una función del **contenido de agua volumétrica** [96].

Diagrama General de Relaciones Causales
en Deslizamientos de Suelos no Saturados y Homogéneos

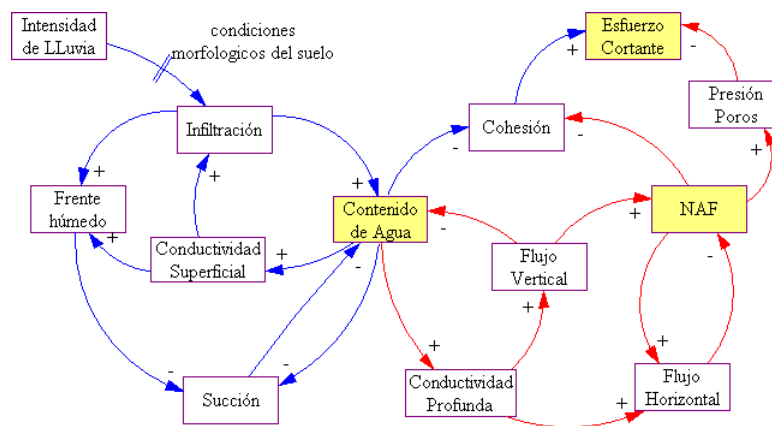


Figura 4.2: Los atributos que involucran el deslizamiento superficial(color azul) y deslizamiento profundo(color rojo).

Existen diferentes modelos para cada atributo presente en el modelo, en el caso de la infiltración se tiene el modelo de Horton, el modelo de Green y el modelo de infiltración de Moore, este último incluye cuando el agua que se mueve desde el perfil hacia arriba por la formación de un nivel freático colgado[97].

El factor de seguridad da información de la estabilidad del suelo, se define como el cociente entre las fuerzas resistivas y las fuerzas cortantes, pero Iverson[18] lo define como una función en el tiempo, a través de la presión de poros o también se ha definido en términos de la Succión.

Siguiendo la metodología de la Dinámica de Sistemas [58], es necesario construir el respectivo diagrama de niveles y flujos, que identifica las variables de estado, los niveles de flujos, y sus parámetros, con sus relaciones. Lo anterior nos lleva a la siguiente fase de construir el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias del sistema de deslizamiento de masa. Quedando pendiente por definir quienes son las funciones auxiliares.

Diagrama de Niveles y Flujos

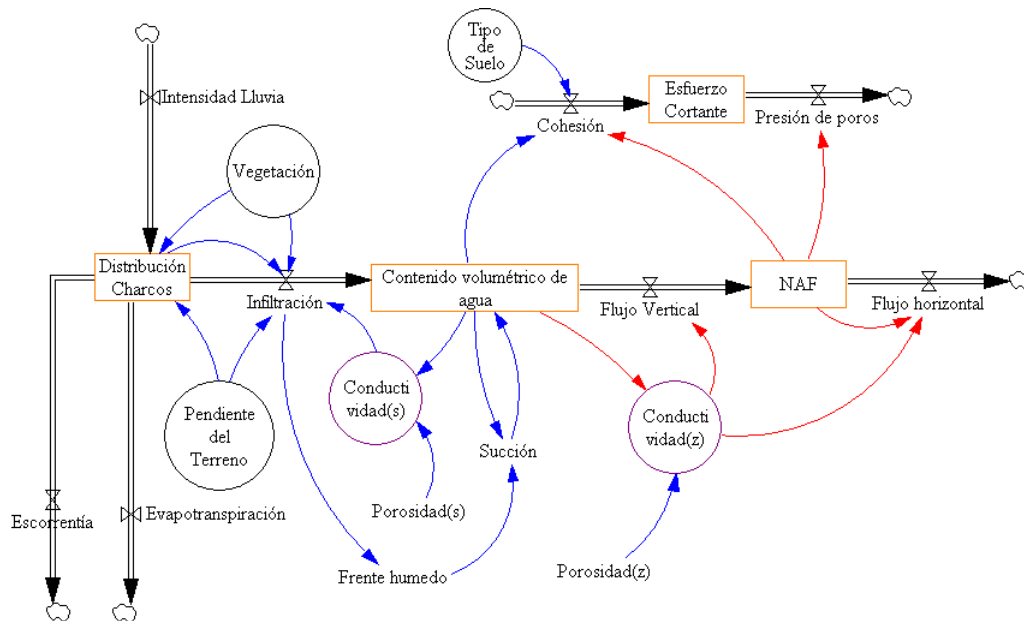


Figura 4.3: Identificación de las variables de Estado, flujos y sus variables auxiliares

Los atributos de **Nivel de agua freática**, **contenido volumétrico de agua**, **Distribución de charcos** y **esfuerzo cortante**, representan las variables de estado del sistema de deslizamiento de masas. Estas variables ofrecen la dinámica de la estabilidad del terreno, los flujos se encargan de realizar modificaciones a las variables de estado, estas son: *la cohesión*, *presión de poros*, *intensidad de alluvial*, *infiltración*, *el caudal horizontal* y *el caudal vertical*.

El sistema de ecuaciones diferenciales, para este modelo deslizamiento que considera las dos posibilidades superficiales y profundos, se expresa en forma genérica el campo vectorial de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \frac{dE}{dt} &= \text{Cohesion (Suelo, Naf, contenido de agua) - PP(Naf)} \\
 \frac{dDch}{dt} &= \text{Intensidad de lluvia - Infiltracion - evapotranspiracion - Escorrentia} \\
 \frac{dNaf}{dt} &= \text{Caudal vertical(Conductividad)-Caudal horizontal(Conductividad)} \\
 \frac{d\Theta}{dt} &= \text{Infiltración-Caudal vertical(conductividad(porosidad))} \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

A partir de este momento la dificultad se concentra en caracterizar las funciones Auxiliares que están presentes en el campo vectorial. Para escribir explícitamente las funciones auxiliares se debe establecer una zona de estudio y caracterizar los suelos, la evapotranspiración, la infiltración y la precipitación.

Para continuar con la siguiente fase de modelamiento, debemos establecer una situación hipotética de zona de estudio de dos estratos con las siguientes consideraciones:

- La conductividad hidráulica es no saturada y no presenta hystéresis
- La infiltración ocurre en la superficie del suelo y esta gobernado por la razón entre la intensidad de la lluvia y la conductividad hidráulica.
- La escorrentía o exceso de precipitación es instantánea permitiendo la no presencia de charcos en la superficie.
- El tipo de suelo es no saturado y residual.

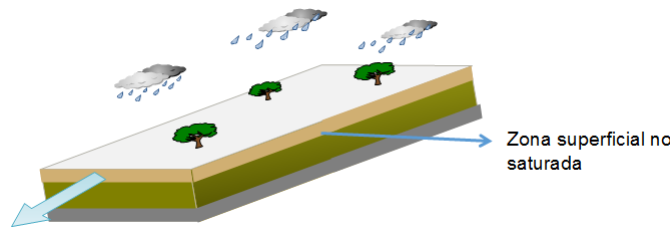


Figura 4.4: Modelo para el estudio de deslizamiento superficiales de suelos

Además consideraremos un análisis de estabilidad temporal del equilibrio de la ladera, por lo tanto no hay ningún efecto espacial local explícito asociado con la estabilidad o inestabilidad. Más bien, la estabilidad se refiere al equilibrio de la humedad que persisten debido al mantenimiento de un equilibrio estático de flujos de humedad de vertiente.

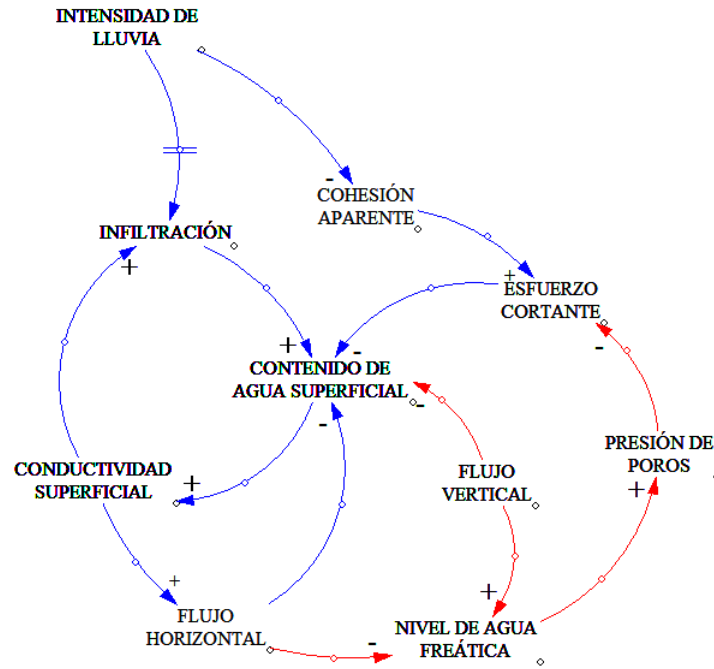


Figura 4.5: Diagrama de relaciones causales para deslizamientos superficiales de suelos

En el diagrama de relaciones causales consideramos los atributos para este sistema de dos estratos, que permiten construir el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales.

$$\begin{aligned}
 \frac{dE}{dt} &= \text{Cohesion (Suelo, Naf, contenido de agua)} - PP(Naf) \\
 \frac{dNaf}{dt} &= \text{Caudal vertical(Conductividad)} - \text{Caudal horizontal(Conductividad)} \\
 \frac{d\Theta}{dt} &= \text{Infiltración} - \text{Caudal vertical(conductividad(porosidad))} \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

FUNCIONES AUXILIARES

Las funciones Auxiliares es la tarea más difícil dentro de la construcción del modelo, implica conocer los procesos del sistema en estudio a través de la experiencia o modelos teóricos que han ganado validez, mostrando diferentes comportamientos. Al definir cada una de las funciones auxiliares que demanda el sistema de deslizamiento de suelos, implícitamente coloca las fronteras al modelo en su alcance por realizar la comprensión de los sistemas de deslizamientos. En nuestro caso tenemos las siguientes funciones auxiliares:

COHESIÓN

Como se sabe hay dos tendencias de estudio en la mecánica de suelos, están los suelos saturados y los suelos no saturados, en este trabajo estamos en el marco de la

mecánica no saturada. Desde la ingeniería es mucho mas práctico tener una relación de la cohesión en terminos del contenido de agua volumétrica, que en términos de la succión, Matsukura obtuvo una relación en el laboratorio para suelos arcillosos de la siguiente forma

$$C = C_o \exp^{-v\Theta} \quad (4.3)$$

Siendo C_o la cohesión inicial, Θ el contenido de agua y v es el coeficiente relacionado a la susceptibilidad de la reducción de la fuerza resistiva.[96].

INTENSIDAD DE LLUVIA

Existen funciones que relacionan la Intensidad(I) con la Duración(D), para tiempos menores a 24 horas o mayores a este tiempo, esta función tiene la siguiente forma $I = \alpha D^\beta$, siendo α y β parámetros para ajustar, siendo D expresado en horas y la I en milímetros por hora [98].

EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración es el proceso que remueve el agua desde la tierra y la libera a la atmósfera, pero si hay presencia de vegetación esta también ayuda a través de las estomas. La porción de tierra que es cubierta por vegetación puede ser aproximada por el índice de área de hoja. L_r . El total de la cantidad de evapotranspiración es entonces.

$$H_T = L_r TR + (1 - \min(1, L_r))E \quad (4.4)$$

Donde $E = C_e H_E U_r$ es la evaporación desde la tierra, C_e es la tasa de la evaporación de la tierra, H_E es la evaporación para cuerpos de agua y U_r es la proporción de humedad relativa. Cuando el índice del área de la hoja es mayor que 1, entonces el TR predomina en la transpiración y se subdivide en en las capas no saturadas TR_u y saturada TR_s .

$$TR = TR_u + TR_s = \theta_v TR + (1 - \theta_v)TR \quad (4.5)$$

Donde θ_v es la proporción de la transpiración de la capa no saturada[99].

INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA

Existen tres modelos muy utilizados estos son el de Green-Ampt(1911), Mein - Larson(1973) y el Horton(2004). Sin embargo describe el modelo de Mein-Larson, porque considera diferentes situaciones entre la tasa de la intensidad de la lluvia(R_i) y la permeabilidad saturada del suelo(K_s). Por ejemplo sí ($R_i < K_s$, entonces no hay escorrentía, lo contrario sí hay escorrentía. La razón de $\frac{R_i}{K_s}$, recibe el nombre de *intensidad de lluvia relativa*.

Con el modelo de Horton se tiene una expresión donde se considera la participación de R_i y considera la capacidad máxima de almacenamiento de la capa del suelo S_m ,

$$i = i_o - R_i \left(\frac{i_o}{i_f} - 1 \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{i_f t}{S_m} \right) \right] \quad (4.6)$$

Siendo i_o la capacidad de infiltración inicial en el tiempo inicial, i_f la capacidad de infiltración final.

Sin embargo una propuesta reciente, define la capacidad de infiltración de la siguiente forma[100]

$$i = i_f + (i_o - i_f) \exp \left(-\frac{R_i}{i_f} \left(\frac{k_s}{i_f} \right)^{0,5} t \right) \quad (4.7)$$

Estos son algunas de las funciones auxiliares que se pueden aplicar para construir un modelo y permita estudiar los deslizamientos de suelos según sus propiedades físicas y químicas. La complejidad del modelo esta en la cantidad de atributos a considerar y sus relaciones de retroalimentación que existan, a su vez, se debe tener presente los datos disponibles y requeridos, que comprometen la capacidad de predicción. los investigadores Grayson y Blöschl, proponen una superficie de predicción donde se encuentran modelos complejos óptimos.

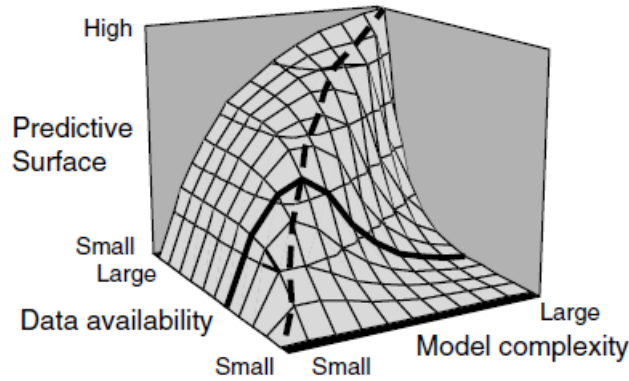


Figura 4.6: Esquema de compromiso entre los datos disponibles, el modelode complejidad y la capacidad de predicción,[101], [102].

La linea a trazos indica la curva donde esta ubicado los diferentes modelos de complejidad óptimos, de acuerdo a los datos disponibles. Finalmente la ILC promueve la participación a lo que denomino la Ciencia de los deslizamientos, a todas las ciencias del agua, de la tierra, de ingeniería, sociales, culturales y ambientales.

Capítulo 5

Consideraciones, Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1. Consideraciones

En este trabajo, se presentó en la introducción diferentes enfoques de interés en la investigación de deslizamientos de suelos, con esto se estableció un estado de arte de metodologías en el estudio estático y dinámico de los deslizamientos de suelos, a su vez se presentó estrategias actuales para identificar las zonas susceptibles y de amenazas, finalmente se hizo una revisión de la evolución de los conceptos de susceptibilidad amenaza, vulnerabilidad y Riesgo.

Al Seguir los objetivos específicos establecidos, hicimos una inmersión en el ámbito de la gestión de riesgo de desastres, que en Colombia la entidad responsable es la UNGRD, que fue creada a partir de la ley 1523 del 2012, en donde además se estableció unas prioridades políticas en el conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo del riesgo. Fue entonces cuando nuestro interés en este trabajo, se centro en el monitoreo de acumulación de precipitación y la estrategia semáforo para los deslizamiento de suelos para Manizales y se propuso una metodología que aportara a este monitoreo, utilizando la información de la precipitación que mide y registra cada una de las 16 estaciones meteorológicas que se encuentran en Manizales.

Para ello, se necesitó la ecuación diferencial parcial HSB, mapas temáticos de las propiedades del suelo de la zona piloto de estudio y con el factor de seguridad que involucra la saturación del suelo, se estableció el estado de estabilidad conforme la precipitación se presenta en el talud.

Finalmente se trabajo con la metodología de dinámica de sistemas en un modelo para deslizamiento de suelos superficiales y profundos para Manizales, estableciendo un esquema general sobre las funciones auxiliares requeridas y mostrando que para establecer estas funciones se necesitan pruebas de laboratorio de los suelos a monitoriar. Sin embargo se simplifico el modelo, para proponer una estabilidad de una zona en el dominio temporal y algunas funciones auxiliares posibles que darían una importante pauta caracterizar el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias.

5.2. Conclusiones

Se estableció una metodología de monitoreo, sobre un talud ubicado en la zona rural conocido como Balastreira, esta zona esta declarada por el POT de Manizales de prioridad de amenaza alta por deslizamiento de suelos, ver Figura 4 del apéndice. Con el propósito dar una herramienta que pueda contribuir a fortalecer el sistema de alerta temprana sobre posibles deslizamientos superficiales en la zona, por causas del factor detonante de la precipitación, se incluyo la participación de la estación meteorológica del Emas, que se encuentra a una distancia de 1000 metros y brinda información de una de las variables meteorológicas importantes en esta metodología como la precipitación que entrega cada 5 minutos al centro de comando ubicado en el Instituto de Estudios Ambientales, luego con información del ángulo de la ladera y la información teórica de las propiedades de porosidad, conductividad hidráulica, espesor del suelo y el ángulo interno, se proceso el cálculo de la estabilidad de la zona a partir de un periodo T que se consideré prudente, para informar a los habitantes que están en el perímetro, mediante el sistema de semáforo que se utiliza actualmente con la metodología de acumulación de lluvia.

Con esta metodología nos permite dar otra funcionalidad a las estaciones meteorológicas que tenemos en Manizales y mejorar la prevención de desastres, pero que demanda la participación de las Universidades para que se generen proyectos que a punten a la caracterización de las propiedades del suelo de las laderas que se han considerado de alto riesgo y se ubican cerca a las poblaciones, a su vez la adquisición de instrumentación. Sin embargo una de las debilidades de esta propuesta, es la fuerte dependencia de los datos disponibles para calibrar el modelo en cada temporada de lluvia.

En el modelo sistémico desarrollado en el capítulo 4, inicialmente se considero en forma general los deslizamientos superficiales y profundos, en donde sus relaciones entre los atributos del sistema están argumentadas por trabajos científicos para un tipo de suelo como es el de los residuales que se encuentran por lo general en las montañas. Este modelo solo consideró el evento del deslizamiento de suelos en el dominio temporal, a su vez se propone algunas posibles funciones auxiliares que teóricamente podemos incluir en el modelo. No, sin olvidar que se debe encontrar un modelo complejo óptimo de acuerdo a los datos disponibles.

5.3. Trabajos Futuros

Los proyecto de investigación futuros que pueden fortalecer estas propuestas, para mejorar la metodología de monitoreo y construir un modelo a una ladera en particular son las siguientes:

1. Mapas temáticos por cada una de las siguientes propiedades, conductividad hidráulica, porosidad, profundidad del suelo, ángulo de fricción interno.
2. Para el pronóstico de la profundidad del suelo, se puede utilizar el índice de wetness junto con métodos de Kriging.
3. De acuerdo a lo anterior se justifica mejorar el método numérico empleado en esta ocasión.
4. Un proyecto de investigación para encontrar la mejor forma de canalizar la información técnica hacia la información transparente clara y oportuna a los habitante de la zona declarada en alerta por deslizamientos de suelos.
5. Automatizar esta metodología para que se pueda utilizar desde el centro de comando ubicado en el IDEA.
6. En cuanto al modelo sistémico, se necesita calibrar las funciones auxiliares para los suelos de Manizales, apartir de los experimentos de suelos pertinentes.
7. Desarrollar un modelo sistémico pero integrando el dominio espacial.

Apéndices

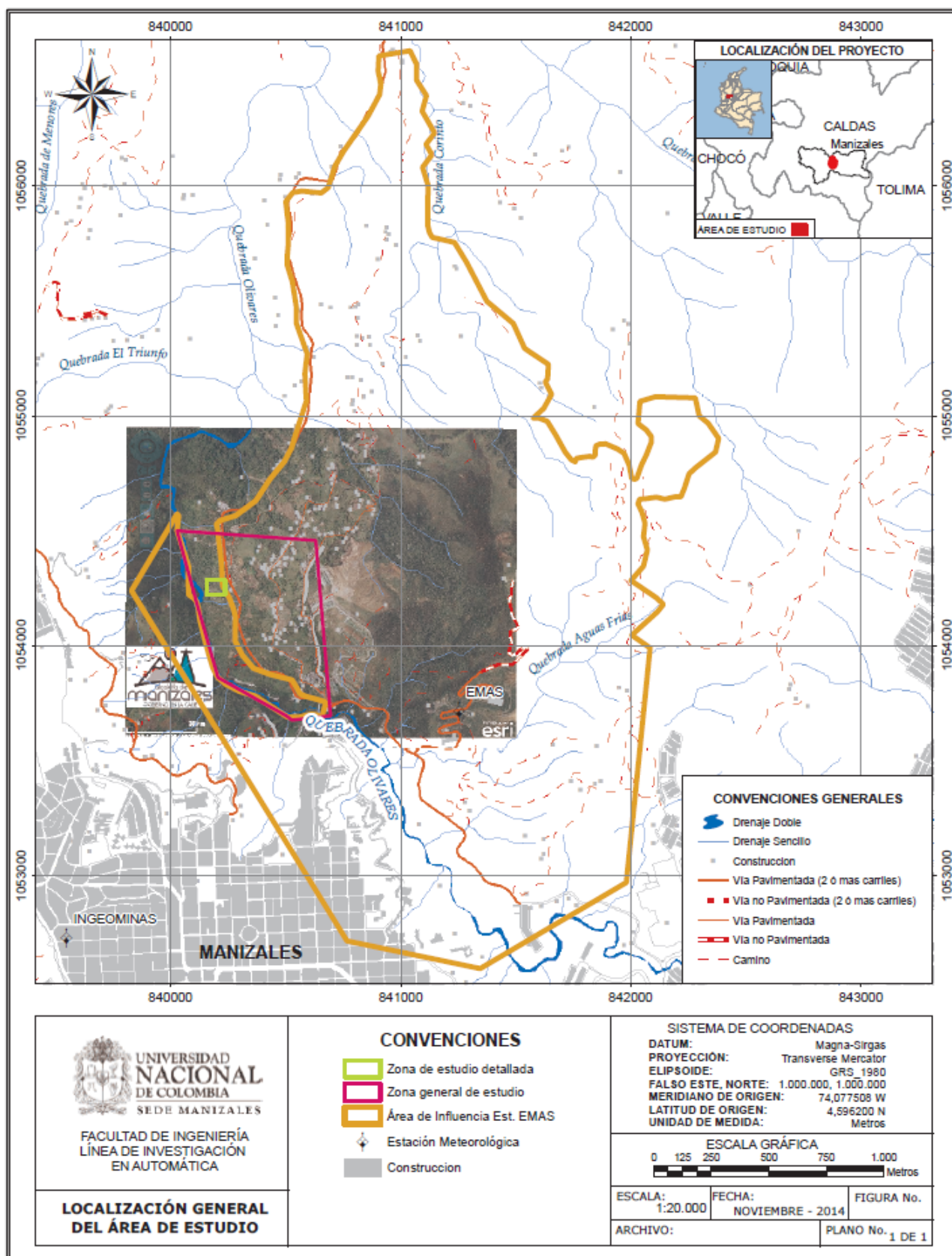


Figura 1: Ubicación de la Zona de estudio, EMAS

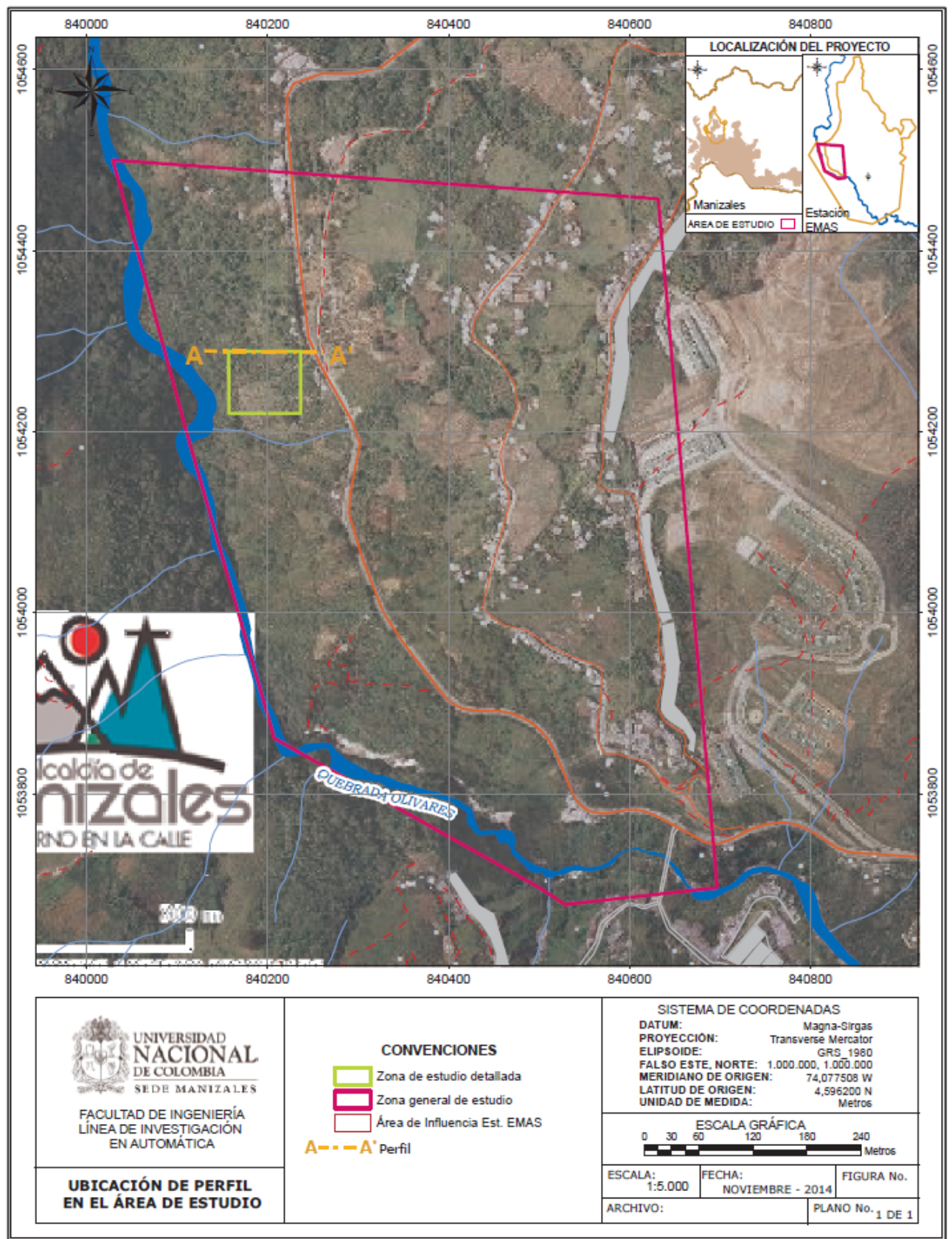


Figura 2: Perfiles del talud de la Zona de estudio, EMAS

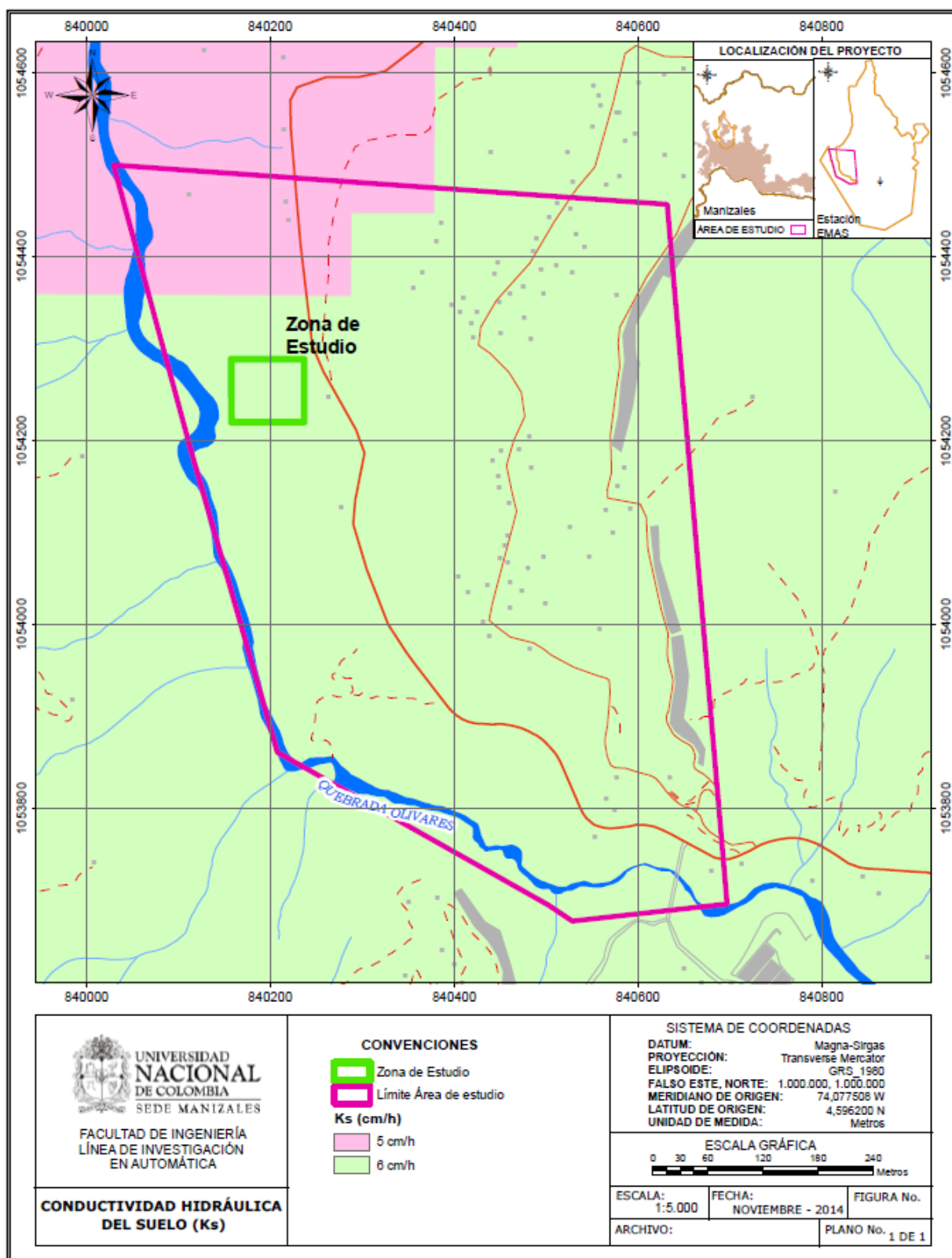


Figura 3: Conductividad hidráulica saturada del suelo

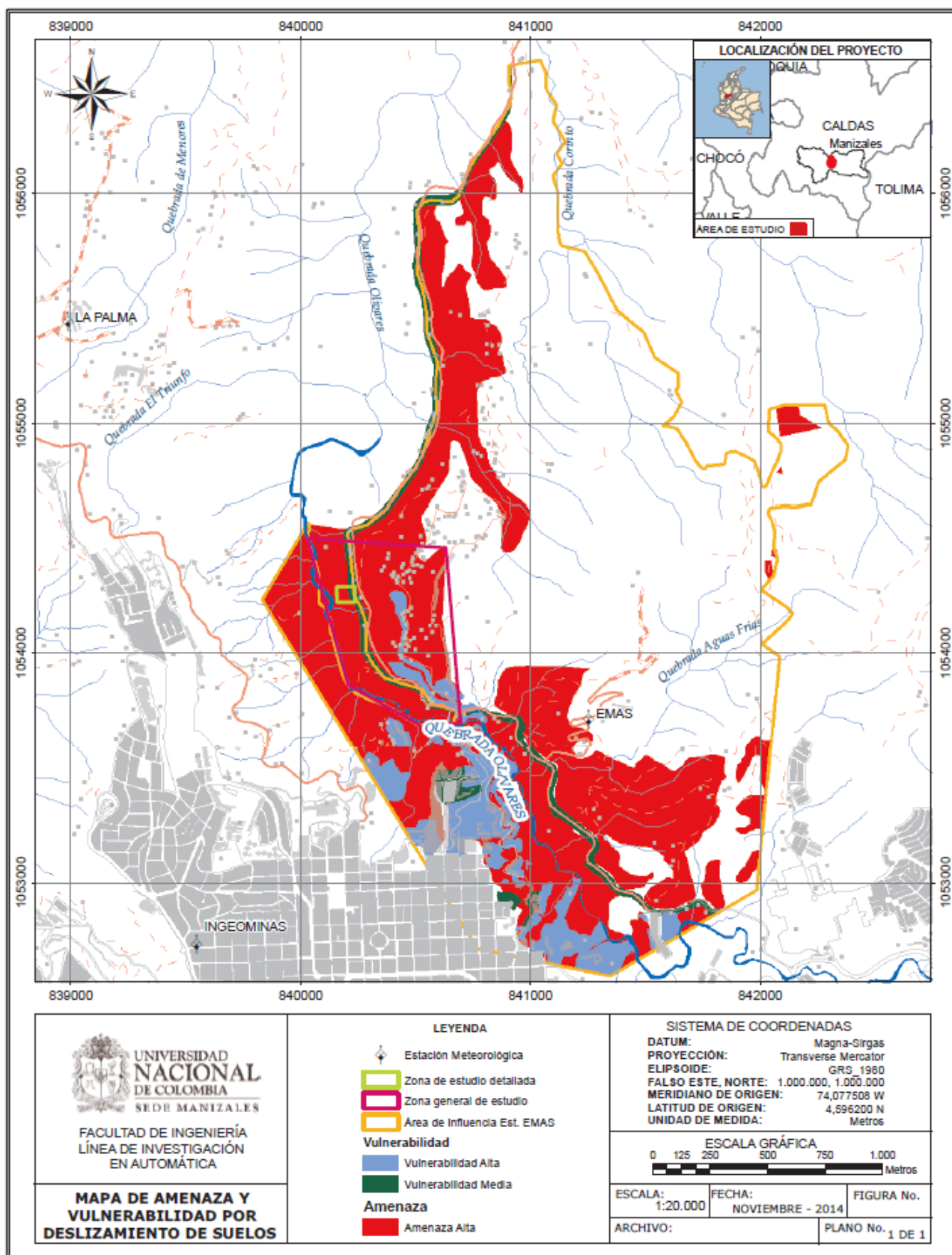


Figura 4: Mapa de Amenaza de deslizamiento y vulnerabilidad de la Zona de estudio

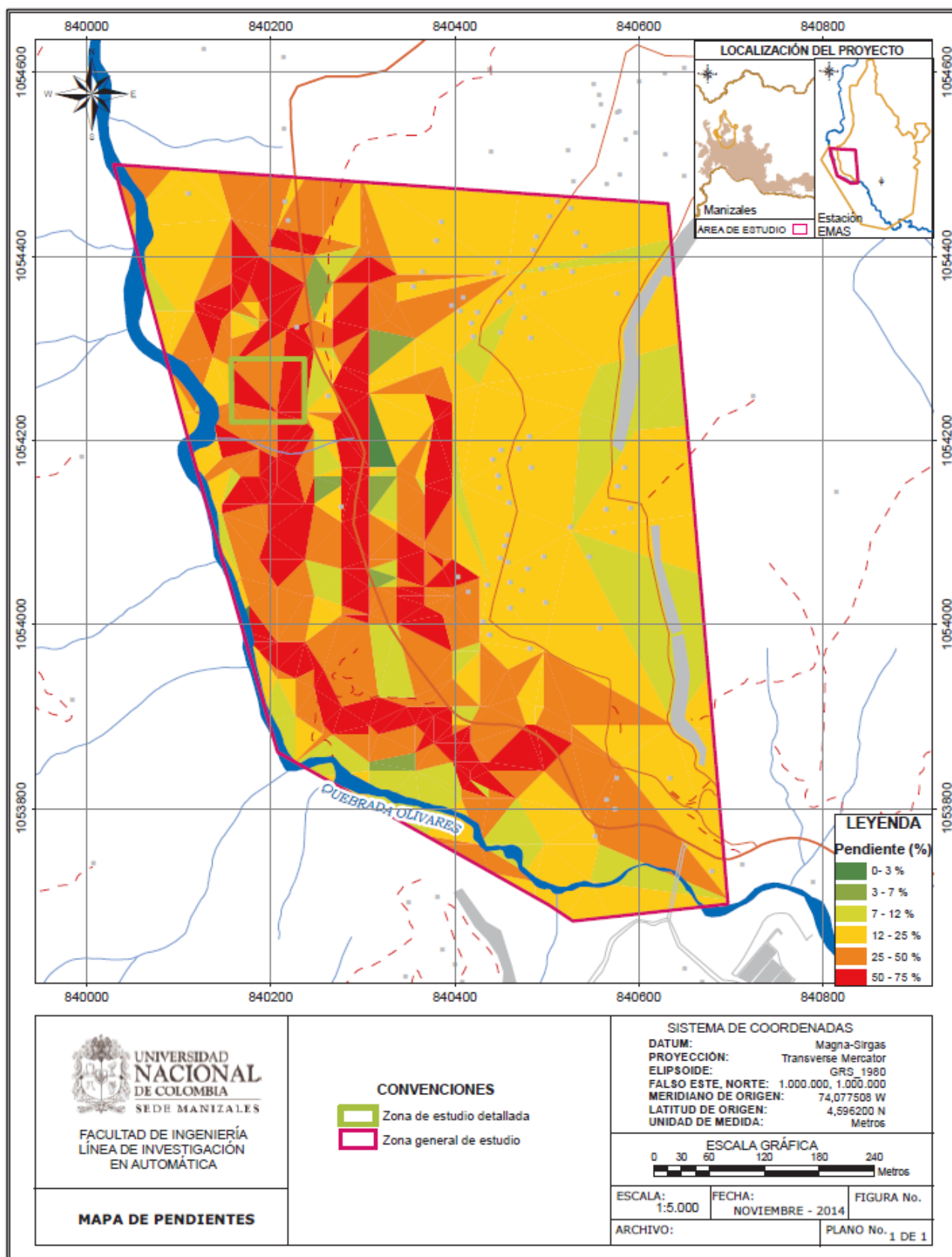


Figura 5: Mapa de Pendientes

Bibliografía

- [1] Scheidegger, A. E., Tectonic predesign of mass movements, with examples from the Chinese Himalaya. *Geomorphology* 26,37-46,1998.
- [2] Yang H Huang, Stability Analysis of Earth Slopes, Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1983.
- [3] Lee W.Abramson, Thomass Lee,Sunil Sharma,Glenn M. Boyce,Slope Stability and Stabilization Methods,segunda edición, Editorial Jhon Wiley y Sons. 2002
- [4] Hunter,P.; Pullan, A. FEM/BEM notes, Auckland University,2003.
- [5] Wilmer F. Morales P.(2004), Análisis estático y dinámico de estabilidd de taludes por medio de elementos de frontera, tesis,Universidad Nacional de Colombia.
- [6] Griffiths, D. V., and Lane, P. A. (1999). "Slope stability analysis by finite elements." *Geotechnique*, 49(3), 387-403.
- [7] Smith, I. M., and Griffiths, D. V. (1988). *Programming the finite element method*, 2nd edition, John Wiley and Sons, Chichester, New York.
- [8] Smith, I. M., and Griffiths, D. V. (2004). *Programming the finite element method*, 4th edition, John Wiley and Sons, Chichester, New York.
- [9] P. Cundall, A computar model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics* (Nancy, France). Vol. 1, papar No II-8. 1971.
- [10] P.Cundall, O.D.L.(1979) Strack. A discrete numerical model for granular assembles. *Geotechnique* 29 (1), 47-65.
- [11] González Gómez Elena,(2003). Tesis doctoral, Aspectos Geomecánicos de los Deslizamientos rápidos: Modelación y Diseño de Estructuras de contención,Universidad Politécnica de Madrid.
- [12] Leonardo Ermini,Filippo Catani,Nicola Casagli.(2005). Artificial Neural Networks applied to landslide susceptible assessment. *Geomorphology*,V 66 ,P 327-343.

- [13] Shivani Chauchan, Mukta Sharma, M,K, Arora, N. K. Gupta, (2010). Landslide susceptibility Zonation through rating derived from artificial Neural Network, International Journal of Applied Earth observation and Geoinformation, V 12, P 340-350.
- [14] Biswajeet Predhan, Saro Lee, Manfred F.,(2010). A GIS-based back-propagation neural network model and its cross-application and validation for landslide susceptibility analyses. Computers, Enviroment and Urban Systems, V 34 p 216-235.
- [15] U.S. Ten Brink, R Barkan, B.D. Andrews, J.D. Chaytor,(2009). Size distributions and failure initiation of submarine and subaerial landslides, Earth and planettary Science Letters, V 287, p 31-42.
- [16] Escobar Gonzalo Duque,(2008), P.As Unal (Manizales), Riesgo en la zona andina tropical por laderas inestables.
- [17] Terlien, Mark Theodoor Johaness . Modelling spatial and temporal variontions in rainfall- triggered landslides . Enschede (Holanda) , 1996, 254p. Trabajo de doctorado(Ingeniero Geógrafo). International Institute for Aerospace survey and Earth Sciences(ITC)
- [18] Iverson, R.M., (2000), Landslide triggering by rain infiltration: Water Resources Research, v. 36, no. 7, p. 1897-1910.
- [19] Luis R. Vásquez Varela,(2008).Modelación numérica de la respuesta hidrológica de taludes, tesis, Universidad nacional de Colombia, Bogotá.
- [20] Lumb, P., (1975). Slope failure in Hong Kong. Q.J. Eng . Geol. 8, 31-65.
- [21] Crozier, M.J., (1986). landslides:Causes, consequences and Environment. Croom Helm, London, 245 pp.
- [22] Ruth Mayorga marquez,(2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia, Tesis de maestria Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [23] Castellanos, R.,Gonzalez, A. (1996), Relaciones entre la lluvia anual y la lluvia crítica que dispara movimientos en masa. IX Jornadas Geotécnicas de la ingeniería colombiana. Santa fé de bogotá 462-470.
- [24] Hurtado, G. (2.000): La precipitación en Colombia. Nota técnica IDEAM / METEO / 006 / 2000. Bogotá.
- [25] Narvaez, G., Lean G., (2001), caracterización y zonificación climática de la región Andina. Meteorológica. Colombia.4:1-8, ISSN 0124-6984. Bogotá.
- [26] Terlien, Mark T.(1997), hydrological landslide triggering is ash covered slopes of Manizales, Geomorphology 20, 165-175.

- [27] Juan David Arango (2000), Relaciones lluvias de deslizamiento y zonificación Geotécnica en la Comuna de la ciudad de Manizales. Tesis, Universidad Nacional sede Medellín.
- [28] Cuadros Q., Oscar Javier, Sisa Combariza, Roberto Alexander.(2003).Relaciones de lluvias en la ciudad de Manizales y zonas aledañas. tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- [29] Diego Narváez,(2007). Análisis de la lluvia como elemento detonante en la ocurrencia de movimiento en masa en las comunas Atardceres y Macarena sector occidental de la ciudad de Manizales, tesis de maestría.
- [30] NG, C. W: W: ,SHI, Q. (1998) A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. Computers and Geotechnics Vol 22 No 1 Elsevier Science Ltda.
- [31] TH. W.J. Van Asch, J.Buma, L.P.H. Van Beek,(1999) A view on some hydrological triggering systems in landslides, Geomorphology, 30, pp 25-32.
- [32] Kenneth Gavin, Jianfeng Xue,(2007) A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes, Computers and Geotechnics. pp 223-230.
- [33] Jaime I Velez, Manuel R. Villaraga, Oscar D. Alvarez, Jorge E. Alarcón, Felipe Quintero,(2005), Modelo distribuido para determinar la susceptibilidad al deslizamiento superficial por efecto de tormentas intensas y sismos., Boletín de las ciencias de la tierra Universidad nacional de Colombia, sede Medellín, No 17
- [34] M. Casadel, W. E. Dietrich , N.L. Miller, (2003), Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil - mantled landscapes, Earth Surface Processes and Landforms, 28, pp 925-950.
- [35] Dietrich WE , Reiss R, Hsu M, Montgomery DR. (1995), A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. Hydrological Process 9, pp383-400
- [36] Aristizabal E. , H. martinez, J.I. Velez, (2010) Una revisión sobre el estudio de movimiento en masa detonados por lluvias. Rev. Acad.Colombia. ciencias. 34 (131): p 209-227.
- [37] Theodore W J., Van Asch, Jean PhilippeMalet,Ludovicus P.H. Van Beek, David Amitrano.(2007). Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard. Bull.Soc.Geol.FR. t, 178, No 2, pp 65-88
- [38] Ying Fan, Rafael L.Bras, (1998). Analytical solutions to hillslope subsurface storm flow and saturation overland flow. Water resources research, vol 34, No 4 pp 921-927.

- [39] Peter Troch, Emiel van Loon, Arno Hilberts, (2002). Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow, *Advances in Water Resources* v 25 pp 637-649.
- [40] Peter Troch, Caludio Paniconi, E.Emiel van Loon, (2003). Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response. *Water Resource research*, vol 39, No 11, pp 1316, doi 10.1029/2002WR001728.
- [41] Peter A. Troch, Aranaut H. Van Loon, G.J.Hilberts. (2004). Analytical solution of linearized hillslope-storage Boussinesq equation for *exponential hillslope with dh function*. *Water Resource Research*. vol 40. doi : 10.1029/2003WR002850.
- [42] T. Sabzevari, A. Talebi, R. Ardakanian, A.Shamsai.(2010). A steady-state saturation model to determine the subsurface travel time (STT) in complex hillslopes. *Hydrology and Earth system Sciences*. 14, pp 891-900
- [43] J.J. Velez, F. Mejia, Duque Mendez, M. Orozco Alzate,(2012). Red de Monitoreo climático para dar apoyo a la prevención y atención de desastres en Manizales, Colombia. Congreso Convección Trópico- Habana, cuba-2012, <http://www.convenciontropico.cuba.com/>
- [44] OEA. (2010). Manual para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante inundaciones. Washington: Organización de Estados Americanos.
- [45] J. Pablo Londoño L.(2006), Evaluación Holística del Riesgo Frente a Deslizamientos en áreas Urbanas Andinas, Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- [46] Varnes, D. J.,(1984.) Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards*, 3, UNESCO Press. Paris, 64 pp.
- [47] Castillo H. (1998) Propuesta metodológica para la evaluación de riesgos por movimientos en masa a Escala Local. Especialización en Evaluación de Riesgos y Prevención de Desastres. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.
- [48] Cardona A.O. (1999). . Enfoque metodológico para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo Sismico. Especialización en Evaluación de riesgos y prevención de desastres, modulo II. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá.
- [49] Aristizabal, E.;Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburra, Dyna, Año 73, Nro. 149, pp. 5-16. Medellín.
- [50] Brabb E.E.,(1984). Innovative approaches to landslide hazard mapping. *Proceed. IV Int. Symp. Landslides*, Toronto, v. 1, 307-324.

- [51] Brunsden, D. (2002). The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into a old game. *Quart. J. of Engng. Geol.* 35, 101-142.
- [52] Guzzetti F., Stark C.P. and Salvati P. (2005) Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy. *Environmental Management*, Vol. 36, No. 1, pp. 15-36.
- [53] Sooters, R., Van Westen, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. En: A.K. Turner and R. L. Schuster (Eds) *Landslides Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy press, Washinton, D.C., ISA. 129-177 pp
- [54] Barredo J. I., Benavides A., Hervás H., Van Westen C.J. (2000). Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Titajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information* 2, Issue 1, 9-23
- [55] Dai, F.C., Lee, C.F. (2001). Frequency - volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology* 59 . Pág. 253-266.
- [56] Hutchinson, J.N. (1995). Keynote paper, Landslide hazard assesment, *Proceeding of the 6th International Symposium on Landslides*, Christchurch, New Zealand 3, 1805-1841.
- [57] Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P., A. (2002). procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology* 48, 349-364.
- [58] Aracil Javier, Gordillo Francisco (1997). *Dinámica de Sistemas*, Alianza Editorial S.A., Madrid.
- [59] Forrester, J. (1999). *Industrial Dynamics*. Pegasus Communications, Inc. Waltham.
- [60] Forrester, J. (1999). *Urban Dynamics*. Pegasus Communications, Inc. Waltham.
- [61] Senge, P. et al (2006). *La Quinta Disciplina, estrategias y herramientas para construir la organización abierta al aprendizaje*. Editorial Granica. Buenos aires.
- [62] Senge, P. (2009). *La Quinta Disciplina, el arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Editorial Granica. Buenos aires.
- [63] Jaime A. LLano. (2000) *Relación entre la cantidad de lluvia y la ocurrencia de Deslizamiento en la carretera manizales -Chinchina*, Tesis, Universidad Nacional de Colombia.
- [64] Terlien, (1996). *Modelling Spatial and Temporal Variations in Rainfall- Triggered Landslides*, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

- [65] G.B. Crosta, P. Frattini(2003). Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall, *Natural hazards and Earth System Sciences*, v 3, p 81-93.
- [66] Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E.,(1994), A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resources Research*, 30, 83-92, 1994.
- [67] Svetlana Melentijevic,(2005), Estabilidad de Taludes en Macizos Rocosos con criterios de Rotura no lineales y leyes de Fluencia no Asociada,Departamento de ingeniería y morfología del Terreno,Universidad politécnica de madrid E.T.S. de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Tesis Doctoral.
- [68] Erlangung Des DoktorGrads,(2005), Landslide hazard and Risk Assessment,Bonn University, Tesis Doctoral.
- [69] Braja M. Das,(2006). Principles of Geotechnical Engineering, Sexta Edición, Editorial Thomson.
- [70] Favbio Vittorio De Blasio,(2011). Introduction to the physics of Landslides. Editorial Springer.
- [71] Weimin Wu, Roy C. Sidle,(1997). Application of a distributed Shallow Landslide Analysis Model (dSlam) to managed forested catchments in oregon, USA. *Human Impact on erosion and Sedimentation*, N 245.
- [72] Sidle, R. C. (1992) A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. *Wat. Resour. Res.* 28, 1897-1910.
- [73] Dietrich WE, Reiss R, Hsu M, Montgomery DR.(1995). A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes* 9: p 383-400.
- [74] Skempton AW, Delory FA.(1975).stability of natural slopes in London clay. *ASCE Journal* 2:378-381.
- [75] Wu, W., and R. C. Sidle (1995), A distributed slope stability model for steep forested basins, *Water Resour. Res.*, 31(8), 2097-2110.
- [76] Van Beek, H. (2002), Assessment of the Influence of Changes in Land Use and Climate on Landslide Activity in a Mediterranean Environment. PhD Thesis, Utrecht University, 363 p.
- [77] Evans, I. S. (1980), An integrated system of terrain analysis and slope mapping, *Zeitschrift fur Geomorphologie, Supplementband*, 36, 274-295.
- [78] Stefano CD. Ferro V. Porto P. Tusa G.(2000). Slope curvature influence on soil erosion and deposition processes. *Water Resour Res*; 36(2): 607-17.

- [79] A. Talebi, Peter A. Troch, Remko U. (2008), A steady-state analytical slope stability model for complex hillslopes, *Hydrological Processes*, 22, 546-553.
- [80] A. Talebi, Remko Uijlenhoet, Peter A. Troch, (2007), Soil moisture storage and hillslope stability, *Natural hazards and Earth System sciences*, 7, 523-534.
- [81] Childs EC. (1971) Drainage of groundwater resting on a sloping bed. *Water Resour Res*; 7(5): 1256-63.
- [82] D.W. Peaceman and H.H. Rachford. (1955). The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. *J. Soc. Indust. App Math.*, 3:28-41.
- [83] J. Li, Y. Chen and G. Liu. High-order compact ADI method for parabolic equations. *Comp. Math, Appl.*, 52:1343-1356, 2006.
- [84] J.J. Velez, F. Mejía, N.D. Duque-Méndez y M. Orozco Alzate. Red de monitoreo climático para dar apoyo a la prevención y atención de desastres en Manizales, Colombia. Convención Trópico, La Habana, 2012.
- [85] Ralf Seppelt. *Computer-Based Environmental Management*, Editorial Wiley-Vch, 2003.
- [86] Allan Brimicombe. *Gis, Environmental Modeling and Engineering*, CRC Press Taylor & Francis Group. 2010.
- [87] Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales, Alcaldía de Manizales, www.manizales.gov.co, 2014.
- [88] Crosta, G., (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation, *Environmental Geology*. P 131-145, v 35.
- [89] Rahardjo, H., Ong T.H., Rezaury R.B., Leong E.C., 2007. Factors Controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, P 1532-1543, v 133.
- [90] Aleotti, P., (2004), A warning system for rainfall-induced shallow failures *Engineering Geology*, P 247-265, V 73.
- [91] Polanco, C, Inventario y sistematización de los desastres naturales ocurridos en los municipios del departamento de Antioquia, exceptuando los municipios del valle del Aburrá, entre 1920-1999, Universidad Eafit. Medellín, V 4.
- [92] Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Colin P.S. (2008), The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update, *Journal landslides*, v 5, p 3-17

- [93] Jaiswal, P. van Western C.J.,(2009),Rainfall.based temporal probability for landslide initiation along transportation routes in Southern India. En *Landslide Processes : from geomorphologic mapping to dynamic modeling*. France, P 139-143.
- [94] Kenneth Gavin, Jianfeng Xue, (2007) A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes, *Computers and Geotechnics*. pp 223 - 230.
- [95] Braja M. Das.(2008), *Advanced Soil Mechanics*, Third Edition, Edition Taylor and Francis.
- [96] Y. Matsushi, Y.Matsukura,(2006),Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content, *Bull Eng Geol Env*, v 65, pp 449-455.
- [97] Cho S.E. , Lee S-R(2002) ,Evaluation of surficial stabikity for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *Journal of Geothecnical and Geoenviromental Engineering*, pp 756-763, v 128.
- [98] Yang Hong, Robert Adler, George Huffman (2006),Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, Vol 33.
- [99] A. Voinov, R.Costanza, C.Fitz, T. Maxwell,(2007).Patuxent Landscape model: 1.Hydrological Model Development. *Hydropysical Processes*, vol 34, No 2 pp 181 -189.
- [100] Jianfeng Xue, Kenneth Gavin.(2008). Effect of Rainfall Intensity on Infiltration into Partly Saturated Slopes, *Geotech Geol Eng*, vol 26, pp 199-209
- [101] Grayson, R.B. y Blöschl, G.,(2000). Spatial moelling of catchment dynamics, in R.B. Grayson y G. Blöschl (eds), *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*(Cambrige:Cambridge University Press),pp 51-81.
- [102] Grayson, R.B. y Blöschl, G., Western, A.W. and McMahon, T.A.,(2002). Advances in the use of observed spatial pattern of carchment hydrological response. *advances in Water Resources*, 25, pp 1313-1334.