

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Forestal

**Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por
medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca
del Río Macho, San José, Costa Rica**

Para optar por el título de
Ingeniero forestal
Con el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería forestal

Iván Fabricio Chaverri Molina

Cartago, Costa Rica

2016

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Forestal

**Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por
medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca
del Río Macho, San José, Costa Rica**

Para optar por el título de
Ingeniero forestal
Con el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería forestal

Iván Fabricio Chaverri Molina

Cartago, Costa Rica

2016

ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTO, POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA MORA-VAHRSON, EN LA MICROCUENCA DEL RÍO MACHO, SAN JOSÉ, COSTA RICA

Ing. Iván Chaverri Molina ¹

RESUMEN

Se determinó por medio de un Sistema de Información Geográfica, la susceptibilidad a deslizamientos de la microcuenca del Río Macho, utilizando la metodología Mora Varhson. Esta metodología permite clasificar la susceptibilidad a deslizamientos de una región, por medio del análisis de cinco variables: pendiente, litología, humedad del suelo, sismicidad y registro de lluvias intensas en un lapso de 24 horas asociado a un periodo de retorno de 100 años. Se utilizó el programa de sistemas de información geográfica ArcGIS 10®, para el análisis de la información y la elaboración de los mapas. Se determinó que en el área de estudio predomina un relieve con pendientes planas, el factor litológico revela condiciones de geológicas de alta susceptibilidad, los factores de humedad en el suelo, intensidad sísmica y lluvias máximas presentan valores constantes para toda la microcuenca. Los resultados muestran que la zonificación más ampliamente distribuida es la de muy baja y baja, concordante con la caracterización topográfica. El 8% del área de la microcuenca se encuentra en una zona de alta susceptibilidad.

Se incorporó el parámetro “uso del suelo” para determinar las zonas prioritarias a intervenir por medio de técnicas de restauración ecológica, utilizando como criterios la susceptibilidad a deslizamientos y el tipo de cobertura. Se identificaron además áreas urbanas ubicadas en zonas de susceptibilidad mediana y alta.

Palabras clave: *Modelo cartográfico, susceptibilidad, deslizamiento, microcuenca, Río Macho, Sistema de Información Geográfica.*

*Chaverri, I. 2016. Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Varhson, en la microcuenca del río Macho. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 58p.

ABSTRACT

The susceptibility to landslides in the Rio Macho microbasin was determined using a Geographic Information System, applying Mora-Varhson methodology. This methodology allows to classify the susceptibility to landslides of a region, by means of the analysis of five variables: slope, lithology, soil moisture, seismicity and record of intense rains in a period of 24 hours associated with a return period of 100 years. The program of geographic information systems ArcGIS 10® was used for the analysis of the information and the elaboration of the maps. It was determined that the area of study predominates a relief with flat slopes, the lithological factor reveals geological conditions of high susceptibility, soil moisture factors, seismic intensity and maximum rains present constant values for the entire micro basin. The results show that the most widely distributed zoning is very low and low susceptibility, consistent with the topographic characterization. 8% of the area of the micro watershed is in an area of high susceptibility.

The parameter "land use" was incorporated to determine the priority areas to reforest using as criteria the susceptibility to landslides and the land use. Urban areas located in medium and high susceptibility areas were also identified.

Keywords: Cartographic modeling, landslide, hazard, watershed, Rio Macho, Geographic Information System.

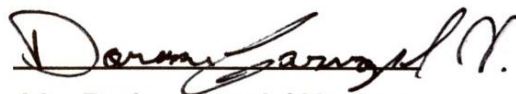
**CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE
PROYECTO DE GRADUACIÓN.**

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por M.Sc. Casia Soto Montoya, MGAP Sergio Feoli Boraschi y M.Sc. Karen Zárate Robleto; como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Casia Soto Montoya M.Sc.

Directora de tesis



Lic. Dorian Carvajal Vanegas

**Coordinador de trabajos
finales de graduación**



Sergio Feoli Boraschi. MGAP

Compañía Nacional de Fuerza y Luz



Karen Zárate Robleto

Magister en Geología-UCR



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional](#).

Usted es libre de: **compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
El licenciador no puede revocar estas libertades mientras cumpla con los términos de la licencia.
Bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento — Debe [reconocer adecuadamente](#) la autoría, proporcionar un enlace a la licencia e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de una manera que sugiera que tiene el apoyo del licenciador o lo recibe por el uso que hace.



NoComercial — No puede utilizar el material para una [finalidad comercial](#).



SinObraDerivada — Si [remezcla, transforma o crea](#) a partir del material, no puede difundir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales [o medidas tecnológicas](#) que legalmente restrinjan realizar aquello que la licencia permite.

DEDICATORIA

Este trabajo final de graduación lo quiero dedicar con mucho amor a mi esposa Yenory por todos estos años maravillosos que me ha dado, por su apoyo y esfuerzo a lo largo del camino. A mis hijos Keisha, Fabián y Pablo los amo y que este trabajo de graduación les sea un estímulo para perseverar hasta que logren las metas que se propongan.

A mis padres José Fabio y Rosa María, por todos sus años de esfuerzo y sacrificio, por ser un ejemplo de amor y de lucha por la vida. A mi hermano Esteban por ser ejemplo de superación en medio de las dificultades que la vida va poniendo.

AGRADECIMIENTOS

- A la escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por abrir el espacio para obtener el grado académico de licenciatura.
- A M.Sc. Casia Soto, por asumir el reto de guiarme el proceso de tesis, por sus recomendaciones y su constante apoyo para sacar adelante este proyecto.
- A Ing. Sergio Feoli por todos sus aportes y sugerencias en la realización de este trabajo.
- A M.Sc. Karen Zárate y al Ing Gustavo Torres por sus valiosos aportes en la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	1
Objetivos.....	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
Marco teórico.....	4
Fundamentos de deslizamientos.....	4
Caracterización de los deslizamientos.....	6
Factores vinculados a los deslizamientos.....	8
Susceptibilidad y amenaza.....	9
Índice de susceptibilidad a deslizamientos.....	11
Descripción de los factores de susceptibilidad.....	12
Factor pendiente:	12
Factor litológico	13
Factor humedad del suelo	15
Descripción de los indicadores detonantes.....	16
Intensidad sísmica:.....	16
Intensidad de precipitaciones:	17
Índice de susceptibilidad.....	18
Metodología	20
Descripción del área de estudio.....	20
Ubicación geográfica.....	20
Zona de vida	20
Uso actual	21

Factores de susceptibilidad (FS).....	26
Pendiente (Sr).	26
Factor litológico (Sl).....	26
Factor humedad del suelo (Sh)	27
Factores detonantes (FD)	27
Intensidad sísmica (Ts).	27
Intensidad de precipitaciones (Tp).....	27
Índice de susceptibilidad a deslizamientos (H).....	28
Susceptibilidad a deslizamientos versus uso del suelo.	28
Modelo cartográfico.	29
Índice de susceptibilidad (H).....	29
Interacción del uso del suelo y el índice de susceptibilidad.	29
Resultados y discusión	33
Factores de susceptibilidad (FS).....	33
Factor pendiente (Sr).....	33
Factor litológico (Sl).....	35
Factor humedad del suelo (Sh).	37
Factores detonantes (FD).....	42
Lluvias máximas (Tp)	42
Sismos (Ts).....	44
Susceptibilidad a deslizamientos (H).	47
La susceptibilidad a deslizamientos y el uso del suelo.....	50
Conclusiones y recomendaciones.....	53
Conclusiones	53
Recomendaciones	55

Referencias bibliográficas.....	57
Anexos.....	62

ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Clasificación de deslizamientos según el tipo de movimiento y material.</i>	<i>6</i>
<i>Cuadro 2. Valores de relieve relativo (Rr) expresados en términos de porcentaje de pendiente y grados de inclinación, para determinar el factor de pendiente (Sr)</i>	<i>13</i>
<i>Cuadro 3. Clasificación de diferentes litologías y su grado de susceptibilidad.....</i>	<i>14</i>
<i>Cuadro 4. Clasificación de los valores de precipitación promedio mensual.</i>	<i>15</i>
<i>Cuadro 5. Factor humedad del suelo (S_r), resultante de la clasificación de los valores promedios de precipitación mensual acumulada, según el cuadro 4.</i>	<i>16</i>
<i>Cuadro 6. Determinación del factor de intensidad sísmica basado en el evento de 100 años en la escala Mercalli Modificada.....</i>	<i>17</i>
<i>Cuadro 7. Valoración del parámetro de disparo por lluvias T_p.....</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 8. Clasificación del índice de susceptibilidad a deslizamiento.</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 9. Clasificación y caracterización de la susceptibilidad al deslizamiento.</i>	<i>19</i>
<i>Cuadro 10. Caracterización general de las zonas de vida presentes en la microcuenca del río Macho, San José Costa Rica.</i>	<i>21</i>
<i>Cuadro 11. Caracterización del uso actual del suelo en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica.</i>	<i>22</i>
<i>Cuadro 12. Asignación de valores para el uso de suelo en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	<i>30</i>
<i>Cuadro 13. Matriz para la interpretación del resultado de la suma de los ráster de uso del suelo y susceptibilidad, para la microcuenca del río Macho. San José, Costa Rica.</i>	<i>31</i>
<i>Cuadro 14. Clasificación y valoración del área de la microcuenca del río Macho según la pendiente.</i>	<i>33</i>
<i>Cuadro 15. Clasificación y valoración de las unidades litológicas en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	<i>35</i>

<i>Cuadro 16. Clasificación del área, en hectáreas, según los valores de precipitación promedio mensual, en la microcuenca del río Macho. San José, Costa Rica.</i>	<i>37</i>
<i>Cuadro 17. Distribución del área según el grado de susceptibilidad pasiva (FS), en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	<i>41</i>
<i>Cuadro 18. Precipitación máxima en un período de 24 horas con un período de retorno de 100 años, en la microcuenca del río Macho. San José Costa Rica.</i>	<i>42</i>
<i>Cuadro 19. Porcentaje del área de la microcuenca del río Macho, según el valor de susceptibilidad, correspondiente a cada factor de la metodología Mora-Vahrson.</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 20 Caracterización de la microcuenca del río Macho en cuanto a la susceptibilidad a deslizamientos.</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 21. Clasificación porcentual del área según el uso del suelo y el grado de susceptibilidad a deslizamientos, en la microcuenca del río Macho, San José Costa Rica.</i>	<i>50</i>

ÍNDICE DE FIGURAS.

<i>Figura 1. Clasificación general de los movimientos en masa (Varnes 1978; Skinner y Porter 1992; Citados por Mora s.f.)</i>	5
<i>Figura 2. Componentes geométricos de un deslizamiento. (modificado de Varnes 1978, citado por Highland y Bobrowsky 2008).</i>	7
<i>Figura 3. Ubicación de la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	23
<i>Figura 4. Zonas de vida presentes en la microcuenca del río Macho, San José Costa Rica.</i>	24
<i>Figura 5: Clasificación del uso del suelo en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	25
<i>Figura 6: modelo cartográfico utilizado en la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	32
<i>Figura 7. Susceptibilidad a deslizamientos por el factor pendiente (Sr) en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	34
<i>Figura 8. Susceptibilidad a deslizamientos por el factor litología (Sl) en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	36
<i>Figura 9. Índice de precipitación promedio mensual y factor de susceptibilidad por humedad del suelo (Sh) en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	39
<i>Figura 10. Índice de susceptibilidad pasiva a deslizamientos (FS) en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.</i>	40
<i>Figura 11. Susceptibilidad a deslizamientos detonados por lluvias máximas en un período de 24 horas, en la microcuenca del río Macho. San José Costa Rica.</i>	43
<i>Figura 12: Mapa de fuentes generadoras de sismos, intensidades máximas y áreas de influencia. (Ramírez et al, 1996).</i>	44
<i>Figura 13. Susceptibilidad a deslizamientos detonados por sismos en la microcuenca del río Macho. San José Costa Rica.</i>	46
<i>Figura 14. Susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Macho. San José Costa Rica.</i>	49

Figura 15. Propuesta de áreas prioritarias para restauración ecológica, según el criterio de susceptibilidad a deslizamientos.52

Introducción

En este estudio se utilizó un sistema de información geográfica (SIG) para zonificar la microcuenca del río Macho con respecto a la susceptibilidad de deslizamiento, utilizando la metodología Mora-Vahrson (Mora y Vahrson 1994).

Esta metodología permite determinar, en un área específica, la susceptibilidad a deslizamientos por medio del análisis de cinco variables, las cuales se clasifican en factores de susceptibilidad y factores detonantes. Los factores de susceptibilidad reúnen las características geomorfológicas propias del sitio: pendiente, litología y humedad del suelo; mientras que los factores detonantes integran los agentes externos que propician la ocurrencia de un deslizamiento: sismicidad y lluvias intensas.

La metodología Mora-Vahrson (MV) es un procedimiento relativamente sencillo y bastante efectivo a la hora de zonificar regiones. Ha sido utilizada en países como Guatemala (Barillas 2008), El Salvador (SNET 2004) y Nicaragua (INETER *et al.* 2004), con buenos resultados según se desprende de los estudios publicados. En Costa Rica esta metodología se ha implementado exitosamente en el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos en diversas localidades, entre ellas la Península de Papagayo (Mora *et al.* 2002), El Cacao de Atenas (Mora 2004a), el cantón de San José (Mora 2004b), Valle de Orosí (Salazar 2007) y en el corredor del poliducto entre Siquirres y Turrialba (Segura *et al.* 2011).

La efectividad de la metodología ha sido confirmada por Barrantes *et al.* (2011) en un estudio realizado en la microcuenca del río Sarapiquí, en el que se corroboró la coincidencia entre las zonas identificadas como de alta susceptibilidad y los deslizamientos ocurridos el 6 de enero de 2008 a raíz del terremoto de Cinchona. Los resultados fueron suficientemente precisos, en las zonas identificadas como de

muy alta y alta susceptibilidad ocurrieron deslizamientos de magnitud considerable. Así mismo, los autores recomiendan que esta metodología se aplique a una escala no mayor que 1:50000, debido a la dificultad de conseguir información detallada de litología, altitud y meteorología.

Los insumos de información que requiere el método MV y la interacción entre ellos se pueden modelar y analizar en un sistema de información geográfica. Los mapas generados con esta técnica servirán como herramientas en la toma de decisiones respecto a las zonas de interés para la asignación de recursos y acciones concretas en la prevención, control y mitigación de deslizamientos. Estos fenómenos desencadenan procesos de arrastre de material y sedimentación que reducen la capacidad de almacenaje en los embalses de las centrales hidroeléctricas que opera la Compañía Nacional de Fuerza y Luz.

El modelo cartográfico derivado de la implementación de este estudio, aportará a la Compañía Nacional de Fuerza y Luz una herramienta que le permitirá:

- Zonificar microcuencas de tal forma que permita visualizar las zonas con mayor susceptibilidad de deslizamientos.
- Identificar en la microcuenca, zonas con limitaciones biofísicas que requieran acciones específicas en los proyectos de restauración ecológica.
- Contar con un procedimiento para seleccionar áreas para compensar emisiones de CO₂ en los proyectos denominados “Mecanismo de Desarrollo Limpio” (MDL).

Objetivos

Objetivo general

- Determinar, por medio de un sistema de información geográfica, la susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, utilizando la metodología Mora-Vahrson (1994).

Objetivos específicos

- Elaborar un modelo cartográfico que permita implementar la metodología Mora – Vahrson para determinar la susceptibilidad a deslizamientos.
- Elaborar un mapa de zonificación basado en la susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Macho.
- Delimitar las zonas prioritarias para restauración ecológica, utilizando como criterios las regiones más susceptibles a deslizamientos.

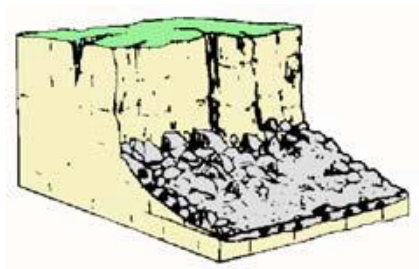
Marco teórico.

Fundamentos de deslizamientos.

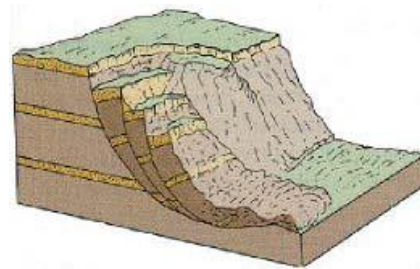
El deslizamiento de tierra es un proceso de degradación natural y uno de los factores más importantes de construcción del paisaje (Lal Rajbhandari *et al.* 2002). Se denomina deslizamiento de tierra, al movimiento descendente de suelo, rocas y materiales orgánicos, que ocurre, bajo el efecto de la gravedad, en una superficie de ruptura curva (deslizamiento de rotación) o plana (deslizamiento de traslación); el término comprende también la forma del terreno que resulta de ese movimiento (Highland y Bobrowsky 2008).

De acuerdo con el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET 2004) los movimientos de tierra se clasifican en tres grandes grupos:

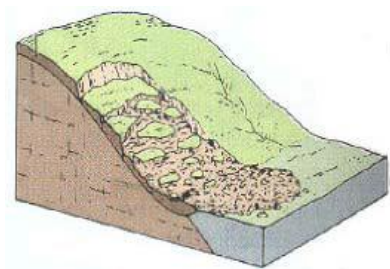
- Derrumbes: suceden al desprenderse o volcarse bloques o fragmentos rocosos que caen con gran velocidad casi en caída libre.
- Deslizamientos: ocurren cuando una masa de suelo se mueve y desliza sobre una superficie de ruptura. Pueden ser de tipo rotacional o translacional.
- Flujos: se caracterizan porque la masa deslizante se rompe y disgrega hasta convertirse en una masa viscosa que fluye hacia las partes más bajas de la ladera.



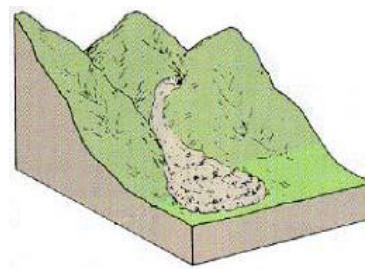
a. volcamiento



b. deslizamiento rotacional



c. deslizamiento translacional



d. flujo

Figura 1. Clasificación general de los movimientos en masa (Varnes 1978; Skinner y Porter 1992; Citados por Mora s.f.)

Los deslizamientos son una de las causas más frecuentes de desastres naturales alrededor del mundo. Las pérdidas socioeconómicas vinculadas directamente a estos fenómenos son millonarias (Aristizábal y Yokota 2006). Mora y Mora (1994), señalan los factores antrópicos como causas de deslizamientos, a medida que la población aumenta, va ocupando áreas susceptibles a deslizarse, la expansión de actividades agropecuarias, movimiento de tierra para el desarrollo de infraestructura, propician la desestabilización de laderas.

Frente a este panorama, es importante conocer los factores involucrados y comprender los mecanismos de interacción entre ellos; de tal forma que se pueda identificar las zonas de mayor susceptibilidad a deslizamientos e implementar las medidas de mitigación, corrección y protección que se requiera.

Caracterización de los deslizamientos.

Los deslizamientos se pueden clasificar de varias maneras según el tipo de estudio a realizar. Una de las más utilizadas es la de Varnes (1978), citado por Mora (s.f.), en la cual se utiliza el tipo de movimiento y la naturaleza del material. Posteriormente las subcategorías discretas se definen con base en la geometría, el movimiento y otras características. El cuadro 1, resume la clasificación de deslizamientos según Varnes (1978), citado por Mora (s.f.)

Cuadro 1. Clasificación de deslizamientos según el tipo de movimiento y material.

Tipo de movimiento	Tipo de material		
	Roca	Suelo	
		De grano grueso.	De grano fino.
Caídas	Caídas de rocas.	Caídas de detritos.	Caídas de suelo.
Basculamiento	Basculamiento de rocas.	Basculamiento de detritos.	Basculamiento de suelo.
Deslizamiento	Rotacional	Deslizamiento rotacional de rocas.	Deslizamiento rotacional de suelos.
	Translacional	Deslizamiento translacional de rocas.	Deslizamiento translacional de suelo.
Separación lateral	Separación lateral en roca.	Separación lateral en detritos.	Separación lateral en suelos.
Flujo	Flujo de rocas.	Flujo de detritos.	Flujo de suelos.
Complejos	Combinación de dos o más tipos		

Fuente: Varnes (1978); citado por Mora (s.f.)

Para efectos de comprender mejor la clasificación anterior Mora (s.f.) define los términos:

- Roca como la estructura litológica dura o firme, la cual se encontraba intacta y en su sitio antes del movimiento.
- Suelo, como un conjunto de partículas sueltas, no consolidadas, roca pobremente cementada o agregados inorgánicos. El suelo puede ser residual (formado en el sitio), o material transportado. El detrito es un suelo con un 20 a 80% de fragmentos mayores que 2 mm; mientras que el suelo fino es el que está compuesto de más del 80% de fragmentos menores de 2 mm.

En la figura 2 se muestran las estructuras básicas que se encuentran en un deslizamiento.

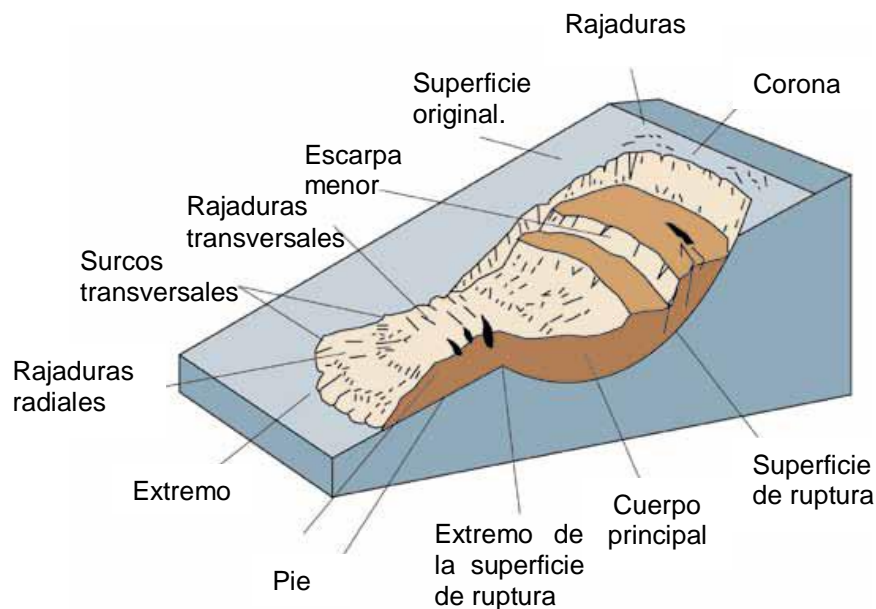


Figura 2. Componentes geométricos de un deslizamiento. (modificado de Varnes 1978, citado por Highland y Bobrowsky 2008).

Factores vinculados a los deslizamientos.

Los factores que propician la ocurrencia de deslizamientos, se dividen en dos grupos: los naturales y los antrópicos. Dentro del grupo de los naturales se encuentran las características del medio natural (clima, tipo de rocas, suelo, sismos) en tanto que los factores antrópicos abarcan las actividades humanas que alteran las condiciones naturales del sitio, entre ellas, desarrollo de obras de infraestructura, movimiento de tierra, corte, relleno, actividades productivas. (Peraldo 2000). En algunos casos los deslizamientos se ven propiciados o agravados por la combinación de ambos grupos de factores.

Se consideran como causas naturales los mecanismos desencadenantes que pueden presentarse en forma individual y combinada: agua, actividad sísmica (tectónica o volcánica). Estos mecanismos presentan diferentes consecuencias dependiendo de las condiciones propias del sitio: pendiente, geomorfología, geología subyacente, tipo de suelo.

Las causas antrópicas están vinculadas principalmente a la interacción del sitio, factores desencadenantes y las actividades humanas que se realicen en el sitio. Incluye también las perturbaciones artificiales provocadas en una pendiente (corte, relleno), cambios o perturbaciones en el patrón de drenaje, levantamiento de obras de infraestructura.

Susceptibilidad y amenaza.

La susceptibilidad a deslizamientos se define, según Vargas (2004), como “la predisposición natural o potencialidad que tiene un área para que se presenten fenómenos de remoción en masa bajo la influencia de agentes tales como altas precipitaciones, cortes naturales y/o artificiales y sismos”.

Soeters y van Westen (1996) citados por Aristizábal y Yokota (2006) definen la susceptibilidad como la posibilidad de que un fenómeno ocurra en un área de acuerdo con las condiciones locales del terreno. Los factores detonantes, como precipitación, sismicidad y actividad volcánica no son considerados dentro de la definición.

Varnes (1984), define el concepto de amenaza como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructivo dentro de un período de tiempo y en un determinado lugar.

Se debe tener claro que los mapas de susceptibilidad buscan delimitar las áreas con mayor potencial para la ocurrencia de deslizamientos, sin indicar de manera clara cuándo y dónde específicamente pueden ocurrir. En ese sentido, el concepto de susceptibilidad aquí utilizado se diferencia del concepto de amenaza, por cuanto este último implica determinar la probabilidad de ocurrencia en términos de tiempo, lugar y magnitud.

Se han desarrollado una gran cantidad de metodologías para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos de una región. Aristizábal y Yokota (2006) clasifican estas metodologías en tres grupos:

- **Metodologías heurísticas:** se basan en la comprensión de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno. Se utilizan ampliamente para evaluar la susceptibilidad y se pueden resumir en: mapeo de los deslizamientos, mapeo de los factores ambientales que afectan la estabilidad de las laderas, estimación de las relaciones entre factores y fenómenos de inestabilidad y clasificación del terreno en regiones de diferente susceptibilidad (Clerici *et al.* 2002, citado por Aristizábal y Yokota 2006).
- **Metodologías estadísticas:** basadas en predicciones estadísticas derivadas de una combinación de variables generadoras de deslizamientos en el pasado. Se utilizan tanto para evaluar la susceptibilidad como la amenaza a deslizamientos.
- **Metodologías determinísticas:** se basan en modelos de estabilidad y se utilizan ampliamente para la evaluar amenazas.

Índice de susceptibilidad a deslizamientos.

La susceptibilidad a deslizamientos es la condición que tiene un área a sufrir un deslizamiento como resultado de la interacción de los “factores de susceptibilidad” y los “factores detonantes”. La susceptibilidad se determinó en función de las condiciones geológicas, topográficas y de humedad del suelo (Mora y Vahrson 1994), mientras que los factores detonantes son la sismicidad y la ocurrencia de lluvias extremas de gran intensidad.

$$H = FS \times FD \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

- H = Grado de susceptibilidad a deslizamientos
- FS = Susceptibilidad intrínseca del sitio
- FD = Sumatoria de los factores detonantes.

Tomando en cuenta que la “susceptibilidad del sitio” (FS) está determinada por la interacción multiplicativa de los factores pendiente, litología y humedad del suelo; y que el factor detonante (FD) corresponde a la adición de los agentes de sismicidad y lluvias, se puede desarrollar la ecuación 2.

$$H = (S_r \times S_l \times S_h) \times (T_s + T_p) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- H = Grado de susceptibilidad a deslizamientos
- S_r = Factor pendiente o relieve relativo
- S_l = Factor litológico
- S_h = Factor de humedad del suelo.
- T_s = Sismicidad
- T_p = Intensidad de precipitaciones.

A partir de la ecuación 2 se puede descomponer la susceptibilidad a deslizamientos como la sumatoria de la susceptibilidad a deslizamientos provocados por sismos (H_s) y los provocados por lluvias intensas (H_p).

$$H = (S_r \times S_l \times S_h \times T_s) + (S_r \times S_l \times S_h \times T_p) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$H = H_s + H_p \quad \text{Ecuación 2.2.}$$

Donde

H = Grado de susceptibilidad a deslizamientos.

H_s = Susceptibilidad a deslizamientos propiciada por sismos.

H_p = Susceptibilidad a deslizamientos propiciada por lluvias intensas.

Descripción de los factores de susceptibilidad.

Factor pendiente:

Se refiere al efecto que tiene la inclinación del terreno como agente pasivo en la susceptibilidad a deslizamientos, se supone que conforme se incrementa la pendiente, la probabilidad de que ocurra un deslizamiento aumenta también.

Originalmente la metodología Mora-Vahrson (1994) evalúa el factor pendiente utilizando un parámetro denominado relieve relativo (R_r), la cual se define como la máxima diferencia de elevación por kilómetro cuadrado (ecuación 3).

$$R_r = \frac{h_{max} - h_{min}}{Km^2} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde

R_r = Relieve relativo.

$H_{máx}$ = Elevación máxima en una cuadrícula.

$H_{mín}$ = Elevación mínima en una cuadrícula.

Para determinar el factor pendiente (Sr), los autores Mora (2004b), SNET (2004), Barillas (2008) y Segura *et al.* (2011) entre otros, han asociado el relieve relativo (m/km²) a rangos de porcentaje de pendiente o grados de inclinación, tal y como se muestra en el cuadro 2. Esta modificación facilita la clasificación por categorías y lo expone de una forma más simple y clara.

Cuadro 2. Valores de relieve relativo (Rr) expresados en términos de porcentaje de pendiente y grados de inclinación, para determinar el factor de pendiente (Sr)

Relieve relativo (m/Km ²)	Pendiente (%)	Inclinación (°)	Calificativo	Factor pendiente Sr
0 – 75	00,0 – 07,5	00,00 - 04,29	Muy bajo	0
76 – 175	07,6 – 17,5	04,30 - 09,93	Bajo	1
176 – 300	17,6 – 30,0	09,94 - 16,70	Moderado	2
301 – 500	30,1 – 50,0	16,71 - 26,57	Medio	3
501 – 800	50,1 – 80,0	26,58 - 38,66	Alto	4
800 <	80,0<	38,66<	Muy Alto	5

Fuente: SNET (2004)

Factor litológico

Este factor caracteriza la estructura de suelos y rocas, tomando en cuenta aspectos como composición, grado de alteración, resistencia, porosidad, permeabilidad. Permite relacionar la composición geológica con la incidencia de deslizamientos. Los valores se asignan de acuerdo a la información del cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de diferentes litologías y su grado de susceptibilidad.

Litología	Características físico-mecánicas	Grado de susceptibilidad	Valor factor S_1
Aluviones: gruesos, permeables, compacto, con nivel freático bajo. Calizas: duras, permeable. Intrusivos: poco fisurados, bajo nivel freático. Basaltos, andesita, ignimbritas y similares: sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas: sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo	Sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas sin rellenos.	Bajo	1
Rocas sedimentarias: poco alteradas, estratificación maciza (decamétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas: medianamente fisuradas o alteradas, nivel freático a profundidades intermedias	Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables	Moderado	2
Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas: medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados: drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.	Resistencia al corte: moderada a media, fracturación importante	Medio	3
Aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.	Resistencia al corte: moderada a baja.	Alto	4
Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica: con estado de alteración avanzado, drenaje pobre, se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos muy elevados.	Resistencia al corte: muy baja, materiales blandos con muchos finos.	Muy alto	5

Fuente: Mora y Vahrson (1991)

Factor humedad del suelo

Este factor cuantifica la influencia de la humedad acumulada en el suelo en la incidencia de deslizamientos de tierra. La manera deseable para determinar el contenido de humedad del suelo es por medio de un muestreo en el sitio, seguido del cálculo de balance hídrico. Sin embargo no siempre se tendrá disponibilidad de tiempo y recursos para tomar los datos de campo, por lo que se puede estimar el contenido de humedad a partir de los datos de precipitación media mensual restando la evapotranspiración potencial (Mora y Vahrson 1994). En Costa Rica el valor de evapotranspiración potencial puede estimarse en 125 mm/mes, por lo tanto valores de precipitación mensual menores a 125 mm, no reflejan un aumento en la humedad del terreno; mientras que una precipitación entre 125 y 250 sí produce un incremento en la humedad que retiene el suelo (Mora y Vahrson 1994). Precipitaciones mayores a 250 mm mensuales conducen a una humedad del suelo muy alta, hasta niveles de saturación (Mora *et al.* 1992).

Cuadro 4. Clasificación de los valores de precipitación promedio mensual.

Promedio mensual de precipitaciones (mm/mes)	Valor
< 125	0
125 – 250	1
250 <	2

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

De acuerdo con la información del cuadro 4, se asigna un valor a cada mes del año; de tal forma que la sumatoria resultará en valores que oscilan entre 0 y 24 unidades. El en cuadro 5 se muestran los valores asociados a los distintos rangos de este índice.

Cuadro 5. Factor humedad del suelo (S_h), resultante de la clasificación de los valores promedios de precipitación mensual acumulada, según el cuadro 4.

Valor acumulado del índice de precipitación.	Clasificación	Factor S_h
0 – 4	Muy bajo	1
5 – 9	Bajo	2
10 – 14	Medio	3
15 – 19	Alto	4
20 – 24	Muy Alto	5

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

Descripción de los indicadores detonantes

Intensidad sísmica:

Es un parámetro que cuantifica la influencia de la actividad sísmica en los deslizamientos de tierra. Mora y Vahrson (1994) exponen la sismicidad como un factor capaz de generar deslizamientos en proporción directa con su intensidad y lo relacionan con la escala Mercalli Modificada, según el Cuadro 6

Cuadro 6. Determinación del factor de intensidad sísmica basado en el evento de 100 años en la escala Mercalli Modificada

Intensidad MM	Aceleración PGA		Grado de susceptibilidad	Valor Factor Ds
	(% g)	(m/s ²)		
III	1 - 12	0,098 - 1,226	Leve	1
IV	13 - 20	1,227 - 2,011	Muy bajo	2
V	21 - 29	2,012 - 2,894	Bajo	3
VI	30 - 37	2,895 - 3,679	Moderado	4
VII	38 - 44	3,680 - 4,365	Medio	5
VIII	45 - 55	4,366 - 5,445	Elevado	6
IX	56 - 65	5,446 - 6,426	Fuerte	7
X	66 - 73	6,427 - 7,210	Bastante fuerte	8
XI	74 - 85	7,211 - 8,388	Muy fuerte	9
XII	>85	>8,389	Extremadamente fuerte	10

Fuente: Adaptado de Mora y Vahrson (1994) y SNET (2004)

Intensidad de precipitaciones:

Este factor considera la influencia de las lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos. Se considera la lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución de valores extremos Gumbel tipo I o Log Pearson Tipo III, con más de 10 años de registro (Mora *et al.*1992).

Cuadro 7. Valoración del parámetro de disparo por lluvias T_p

Lluvia máxima (mm) en 24 horas, período de retorno 100 años.	Clasificación	Factor T_p
< 100	Muy bajo	1
100 – 200	Bajo	2
200 – 300	Medio	3
300 – 400	Alto	4
>400	Muy Alto	5

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

Índice de susceptibilidad.

El método Mora-Vahrson originalmente propone que a partir de la interacción y ponderación de los factores descritos anteriormente, se realice el cálculo del índice de susceptibilidad según la ecuación 2.2. El valor resultante se interpreta según el cuadro 8.

Cuadro 8. Clasificación del índice de susceptibilidad a deslizamiento.

Índice de susceptibilidad a deslizamientos	Clasificación	Potencial de deslizamiento
0 – 6	I	Muy bajo
7 – 32	II	Bajo
33 – 162	III	Moderado
163 – 512	IV	Mediano
513 – 1250	V	Alto
>1250	VI	Muy alto

Fuente: Mora y Vahrson (1992).

Basado en los trabajos de Mora *et al.* (2002); Mora (2004); Barrantes *et al.* (2011); en los que, para interpretar el resultado del índice de susceptibilidad, se recomienda no establecer una escala de valores única; sino que se sugiere dividir el rango de valores obtenidos en cinco clases de susceptibilidad, a partir del histograma de distribución de frecuencia. Para efectos del análisis e interpretación de resultados, en este estudio se utilizará la escala que se presenta en el cuadro 9.

Cuadro 9. Clasificación y caracterización de la susceptibilidad al deslizamiento.

Clasificación	Potencial de deslizamiento	Característica
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

Fuente: Mora (2004a).

Metodología

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, se elaboró a partir del método Mora y Vahrson (1994), para lo cual se utilizaron las bases de datos y cartografía digital de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz y los datos oficiales del Instituto Meteorológico Nacional. Para el modelado, análisis y presentación de datos se utilizó el programa ArcGIS®.

Descripción del área de estudio.

Ubicación geográfica.

La microcuenca del río Macho se localiza en la región noreste de la provincia de San José, en los cantones de Vásquez de Coronado y Moravia. El área de estudio mide 2838 hectáreas y se ubica entre las coordenadas 1103000-1108000 N, 497000-508000 E, de la cuadrícula Transversal de Mercator modificada para Costa Rica (CRTM-2005), el rango altitudinal varía entre los 1300 y 2600 metros de elevación (Figura 3).

Zona de vida

Las zonas de vida que se encuentran en el área de estudio son: bosque muy húmedo montano bajo, bosque muy húmedo premontano, bosque pluvial montano bajo. La distribución geográfica de estas zonas de vida se muestra en la figura 4 y se resumen en el cuadro 10

Cuadro 10. Caracterización general de las zonas de vida presentes en la microcuenca del río Macho, San José Costa Rica.

Zona de vida	Precipitación anual (mm)	Temperatura anual (°C)	Área (ha)	Porcentaje
Bosque muy húmedo premontano	2000-4000	18-24	378,1	13,3%
Bosque muy húmedo montano bajo	2000-4000	12-18	2106,4	74,2%
Bosque pluvial montano bajo	4000-8000	12-18	354,3	12,5%
Total			2838,8	100,0%

Fuente: (ITCR 2014).

Uso actual

Esta microcuenca tiene un área de 2838,8 hectáreas; se elaboró un mapa de uso del suelo a partir de las imágenes de satélite LANDSAT del Plan Regional Urbano para el Gran Área Metropolitana (MIVAH,2009). La figura 5 muestra el uso del suelo en la microcuenca, evidenciando que la mayor parte del área está dedicada al uso agropecuario, predominantemente pastoreo, según se muestra en el cuadro siguiente:

Cuadro 11. Caracterización del uso actual del suelo en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica.

Uso del suelo	Área (ha)	%
Cobertura forestal		
Bosques primarios	69,42	2,45%
Bosques secundarios	68,49	2,41%
Bosques secundarios fragmentados	684,79	24,12%
Charrales	24,48	0,86%
Plantaciones de coníferas	16,12	0,57%
Sub-total	863,30	30,41%
Uso agropecuario		
Cultivos anuales	281,07	9,90%
Cafetales	22,95	0,81%
Invernaderos	7,84	0,28%
Pastos	1173,08	41,32%
Pastos con árboles dispersos	305,78	10,77%
Pastos mezclados con árboles	27,24	0,96%
Sub-total	1817,97	64,04%
Uso urbano		
Zona urbana - densidad baja	60,11	2,12%
Zona urbana - densidad moderada	14,60	0,51%
Zona urbana - densidad alta	82,82	2,92%
Sub total	157,53	5,55%
Total	2838,80	100,0%

Fuente: MIVAH, 2009.

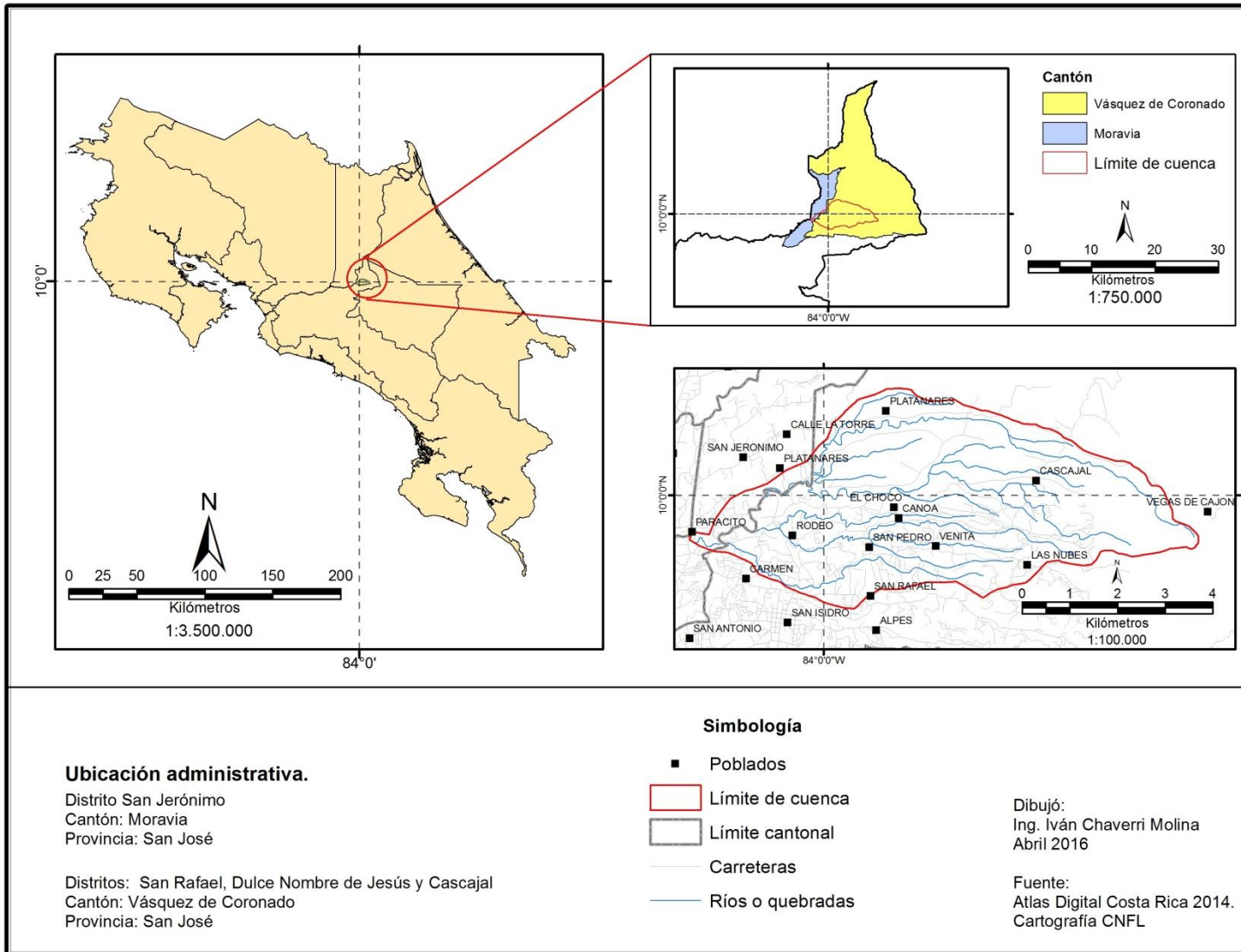


Figura 3. Ubicación de la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

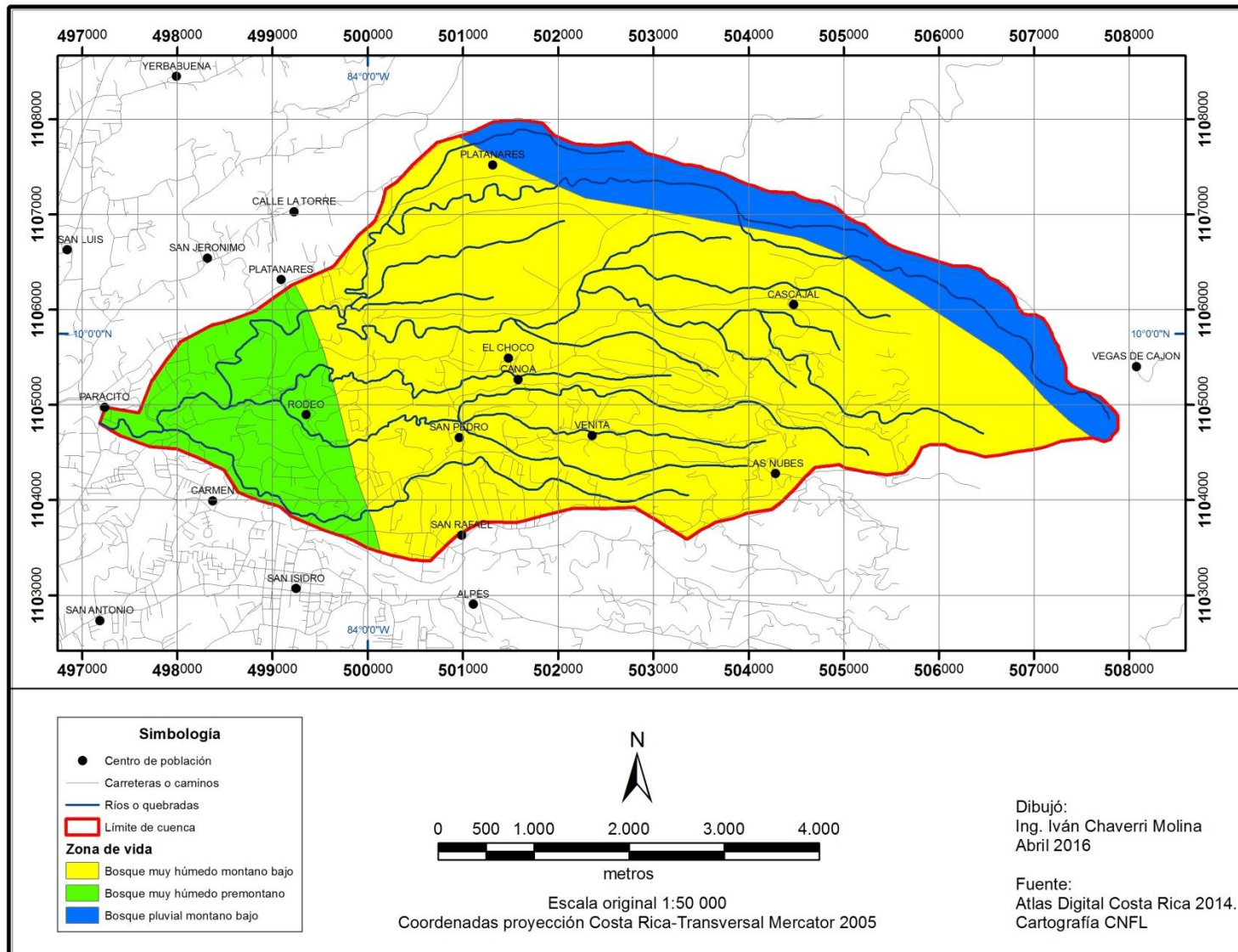


Figura 4. Zonas de vida presentes en la microcuenca del río Macho, San José Costa Rica.

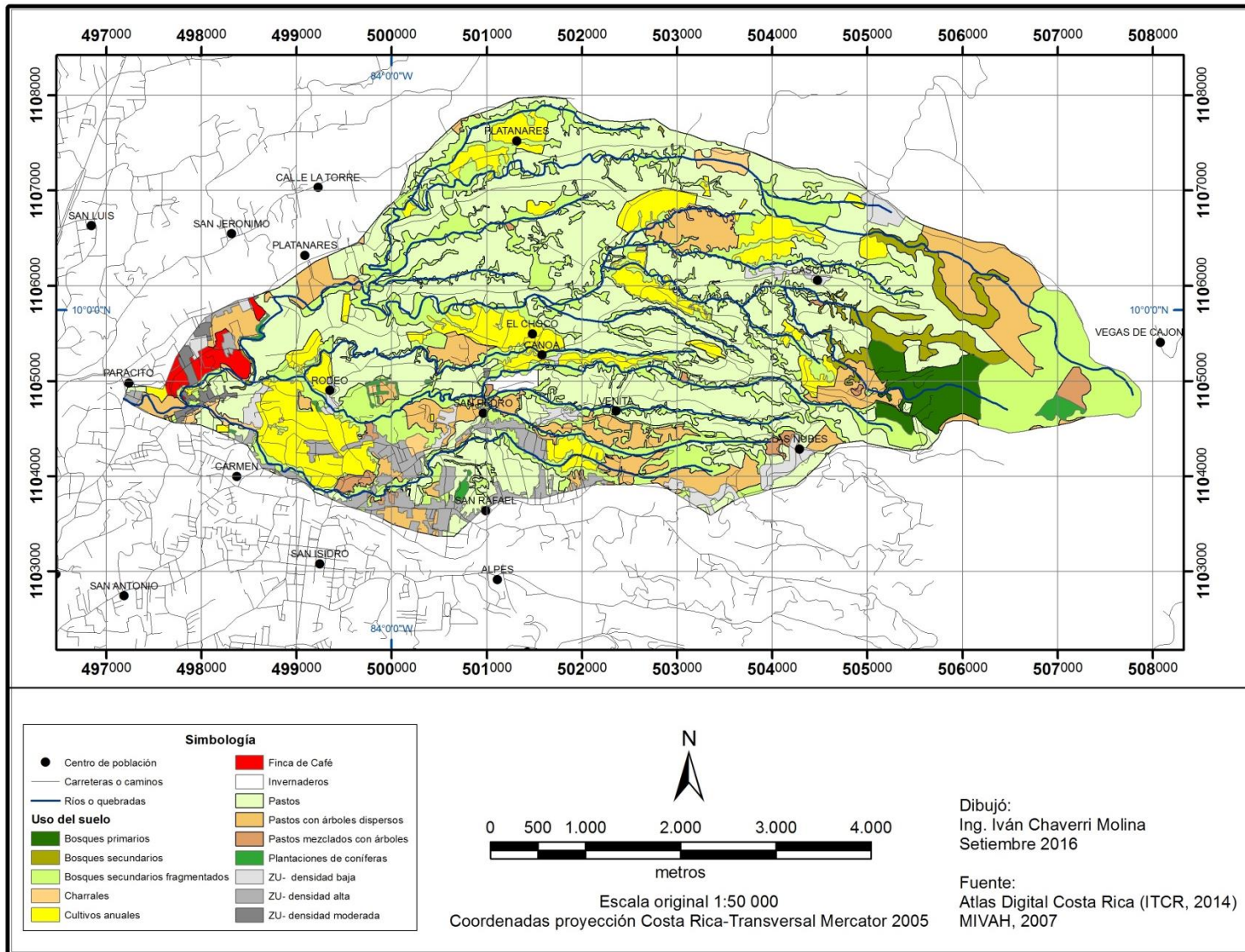


Figura 5: Clasificación del uso del suelo en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

Factores de susceptibilidad (FS)

La colección de datos para la elaboración de las capas de información se realizó a partir de fuentes secundarias, mapas publicados, artículos científicos, atlas digital Costa Rica (ITCR 2014). A continuación se presenta el procedimiento utilizado para obtener cada una de las capas de información correspondientes a cada factor considerado por el método Mora-Vahrson.

Pendiente (Sr).

Para determinar el factor de susceptibilidad asociado a la pendiente, se utilizaron las curvas de nivel, digitalizadas a partir de la hoja cartográfica, Abra, escala 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional.

Una vez digitalizadas las curvas de nivel se procedió a utilizar los módulos de *3D Analyst Tools* de ARCGis®, para generar una red de triangulación irregular (TIN), sobre la cual se genera un mapa de pendientes. En el Anexo 1 se presenta el modelo cartográfico para obtener el mapa de susceptibilidad a deslizamientos asociados al factor pendiente (Sr).

Factor litológico (Sl).

La caracterización litológica se basa en el mapa geológico, tomado del Atlas Digital Costa Rica (ITCR 2014), la clasificación se realizó con base en las características indicadas en el cuadro 3. Una vez determinado los valores de susceptibilidad de litología se realiza el proceso indicado en el Anexo 2, para obtener un archivo formato ráster con los valores de Sl.

Factor humedad del suelo (Sh)

Este factor se obtuvo a partir de los mapas publicados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2014), en el Atlas Climatológico. Se elaboró un mapa de precipitaciones mensual y se clasificó según los criterios indicados en el cuadro 4. Para obtener el valor anual de humedad acumulada en el suelo, se realizó una suma de cada uno de los valores mensuales. El mapa se reclasifica, por medio del sistema de información geográfica, asignándole las categorías indicadas en el cuadro 5.

Factores detonantes (FD)**Intensidad sísmica (Ts).**

Para determinar los valores de intensidad sísmica, se utilizó el mapa de fuentes generadoras de sismos, intensidad máxima y área de influencia, publicado por Ramírez et al (1996).

Intensidad de precipitaciones (Tp).

La intensidad de lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos, se obtuvo considerando un evento de lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 100 años, para efectos de este estudio se utilizó el mapa elaborado por Vahrson (s.f.)

Índice de susceptibilidad a deslizamientos (H).

Para determinar el índice de susceptibilidad H, se elaboran dos mapas, el primero asociado al factor detonante sismos (Ts) y el otro al factor detonante precipitaciones máximas (Tp).

$$H = (S_r \times S_l \times S_h \times T_s) + (S_r \times S_l \times S_h \times T_p)$$

El índice de susceptibilidad para la microcuenca en cuestión se calculó sumando los dos mapas.

Susceptibilidad a deslizamientos versus uso del suelo.

Una vez elaborado el mapa de zonificación según la susceptibilidad a deslizamientos se realizó una sobreposición con el mapa de uso del suelo (Figura 5). Este procedimiento permite delimitar las áreas prioritarias a intervenir, por medio de procesos de restauración ecológica, utilizando como criterios las regiones más susceptibles a deslizamientos. Para efectos de este estudio se considera restauración ecológica como la incorporación de árboles y arbustos de diverso porte, en pastizales, formando sistemas agroforestales, cortinas rompevientos, árboles.

La cuenca del río Macho, según se detalla en el cuadro 11, presenta tres tipos de uso del suelo: cobertura forestal, uso agropecuario y zona urbana. En estos tres grupos, para efectos de este estudio, el uso más propicio para establecer proyectos de restauración ambiental es el de pastos, ya que todos los demás o ya tienen una cobertura forestal establecida o en desarrollo, o bien son pastos en con socios agroforestales (mezclados con árboles o bien con árboles dispersos). Se enfatiza en los pastos ubicados en zonas con un índice de susceptibilidad IV y V.

Modelo cartográfico.

Índice de susceptibilidad (H)

El análisis parte de la ecuación 2.2 donde $H = H_s + H_p$ se plantea el siguiente diagrama para iniciar el posterior desarrollo del modelo cartográfico.

$$H = (S_r \times S_l \times S_h \times T_s) + (S_r \times S_l \times S_h \times T_p)$$

H = grado de susceptibilidad a deslizamientos

Sr = Factor pendiente o relieve relativo

Sl = Factor litológico

Sh = Factor de humedad del suelo.

Ts = Sismicidad

Tp = Intensidad de precipitaciones.

En la figura 6 se muestra un esquema del modelo cartográfico utilizado en este estudio.

Interacción del uso del suelo y el índice de susceptibilidad.

Para delimitar las regiones prioritarias para restauración ecológica se utilizaron como criterios la susceptibilidad a deslizamientos y el uso del suelo. Se dio prioridad a las regiones con un índice de susceptibilidad mayor a IV. En el caso del uso del suelo, la prioridad se encuentra en las áreas de pasto desprovistas de árboles.

El archivo ráster de uso del suelo se editó para asignarle un valor numérico que representa el uso actual. Para facilidad de cálculo, el valor numérico fue asignado arbitrariamente con numerales múltiplos de diez, tal y como se muestra en el cuadro 12.

Cuadro 12. Asignación de valores para el uso de suelo en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

Valor	Uso del suelo	Valor	Uso del suelo
10	Bosque primario	80	Pasto
20	Bosque secundario	90	Pasto arboles dispersos
30	Bosque secundario fragmentado	100	Pasto mezclado con árboles
40	Charrales	110	Plantaciones de coníferas
50	Cultivos anuales	120	Zona urbana Baja densidad
60	Fincas cafetaleras	130	Zona urbana Alta densidad
70	Invernadero	140	Zona urbana moderada densidad

Los valores de susceptibilidad corresponden con los obtenidos por medio de la metodología Mora Vahrson.

Las áreas de interés se encuentran delimitadas por los valores resultantes de una suma entre los dos archivos ráster: uso del suelo y susceptibilidad, Las áreas de interés se encuentran identificados con los valores 84 y 85, correspondientes al uso del suelo "Pasto" ubicados en regiones de susceptibilidad IV y V. En el cuadro 13 se muestra la matriz completa, para la interpretación del resultado de realizar la suma de archivos raster correspondientes a Uso del suelo y susceptibilidad.

Cuadro 13. Matriz para la interpretación del resultado de la suma de los ráster de uso del suelo y susceptibilidad, para la microcuenca del río Macho. San José, Costa Rica.

		SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS					
		Muy bajo	Bajo	Moderado	Mediano	Alto	
		1	2	3	4	5	
USO DEL SUELO		10	11	12	13	14	15
	Bosque primario	10	11	12	13	14	15
	Bosque secundario	20	21	22	23	24	25
	Bosque secundario fragmentado	30	31	32	33	34	35
	Charrales	40	41	42	43	44	45
	Cultivos anuales	50	51	52	53	54	55
	Fincas cafetaleras	60	61	62	63	64	65
	Invernadero	70	71	72	73	74	75
	Pasto	80	81	82	83	84	85
	Pasto arboles dispersos	90	91	92	93	94	95
	Pasto mezclado con árboles	100	101	102	103	104	105
	Plantaciones de coníferas	110	111	112	113	114	115
	Zona urbana Baja densidad	120	121	122	123	124	125
	Zona urbana Alta densidad	130	131	132	133	134	135
	Zona urbana moderada densidad	140	141	142	143	144	145

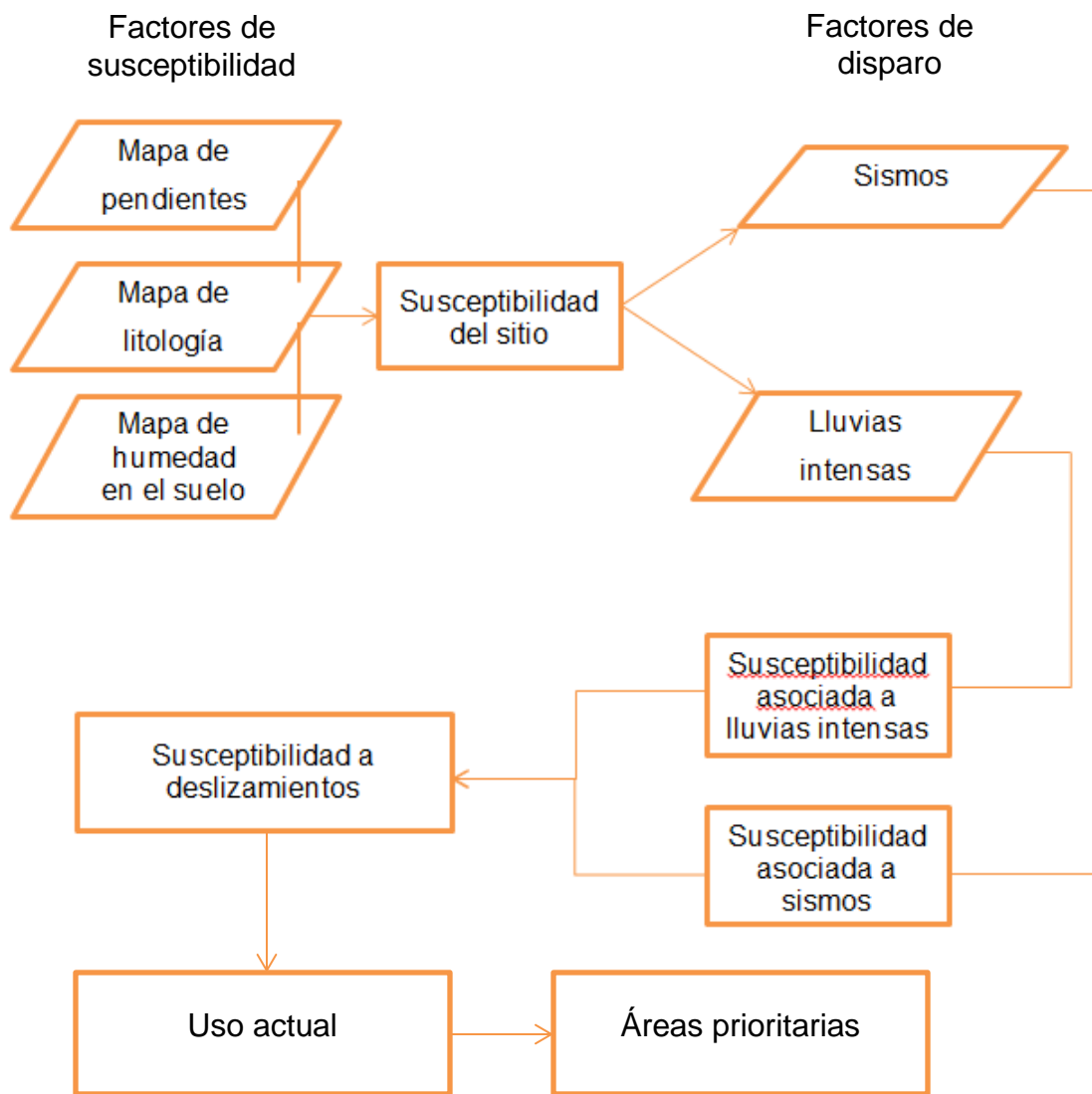


Figura 6: modelo cartográfico utilizado en la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

Resultados y discusión

Factores de susceptibilidad (FS).

Factor pendiente (Sr).

La microcuenca del río Macho se caracteriza por tener pendientes bajas y planicies, con un factor de susceptibilidad 0 y 1, que abarcan el 56,5% del área de estudio. Las regiones de susceptibilidad moderada corresponden a los sectores de transición entre las zonas de alta pendiente y las de baja pendiente; y ocupan un 32,9% del área de la microcuenca. Finalmente las zonas de pendiente alta, representan menos del 10% del área total, se encuentran concentradas en el extremo oriental de la microcuenca y en algunos cañones fluviales. Los resultados se resumen en el cuadro 14 y se muestran en la figura 7.

Cuadro 14. Clasificación y valoración del área de la microcuenca del río Macho según la pendiente.

Factor pendiente (Sr)	Clasificación	Área (ha)	Porcentaje
0	Muy bajo	1085,5	38,2%
1	Bajo	520,6	18,3%
2	Moderado	580,7	20,5%
3	Medio	353,3	12,4%
4	Alto	220,3	7,8%
5	Muy alto	78,4	2,8%
Total		2838,8	100,0%

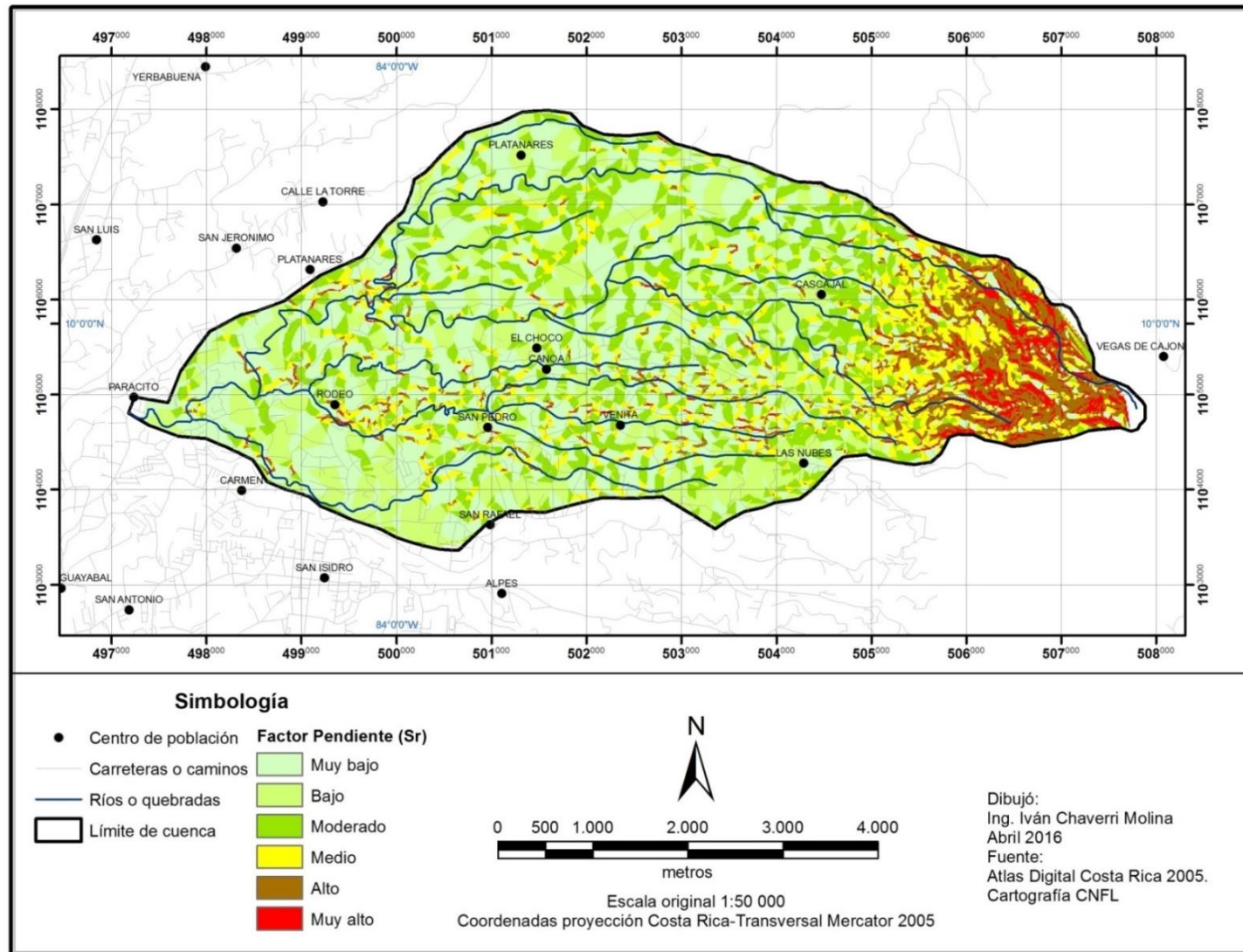


Figura 7. Susceptibilidad a deslizamientos por el factor pendiente (Sr) en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

Factor litológico (Sl).

Para la determinación del factor litológico se utilizó el mapa de geología, disponible en el Atlas Digital compilado y editado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (2014). Se determinó que en términos geológicos, la microcuenca está conformada por materiales volcánicos recientes y por depósitos aluviales del período cuaternario. La distribución geográfica de las unidades litológicas se encuentra en la figura 8.

La unidad geológica predominante (Qal) se encuentra conformada por depósitos aluviales y coluviales, que abarcan el 93% del área de estudio. Esta unidad geológica, por sus características y con base en la descripción de parámetros del cuadro 3, se determinó que es de alta susceptibilidad a deslizamientos.

La otra unidad geológica (Qv), corresponde a materiales de origen volcánico, se encuentran localizadas en las partes más altas de la microcuenca. Esta unidad geológica le corresponde una susceptibilidad moderada, según Mora y Vahrson (1994), citado por Salazar (2007). Esta unidad geológica ocupa el 7 % del área de la microcuenca.

Cuadro 15. Clasificación y valoración de las unidades litológicas en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

Código	Tipo de material	Clasificación	Factor Sl	Área (ha)	Porcentaje (%)
Qal	Depósitos aluviales, coluviales.	Alta	4	2638,9	93,0%
Qv	Materiales volcánicos: lavas, tobas piroclásticos.	Moderada	3	199,9	7,0%
Total				2838,8	100,0%

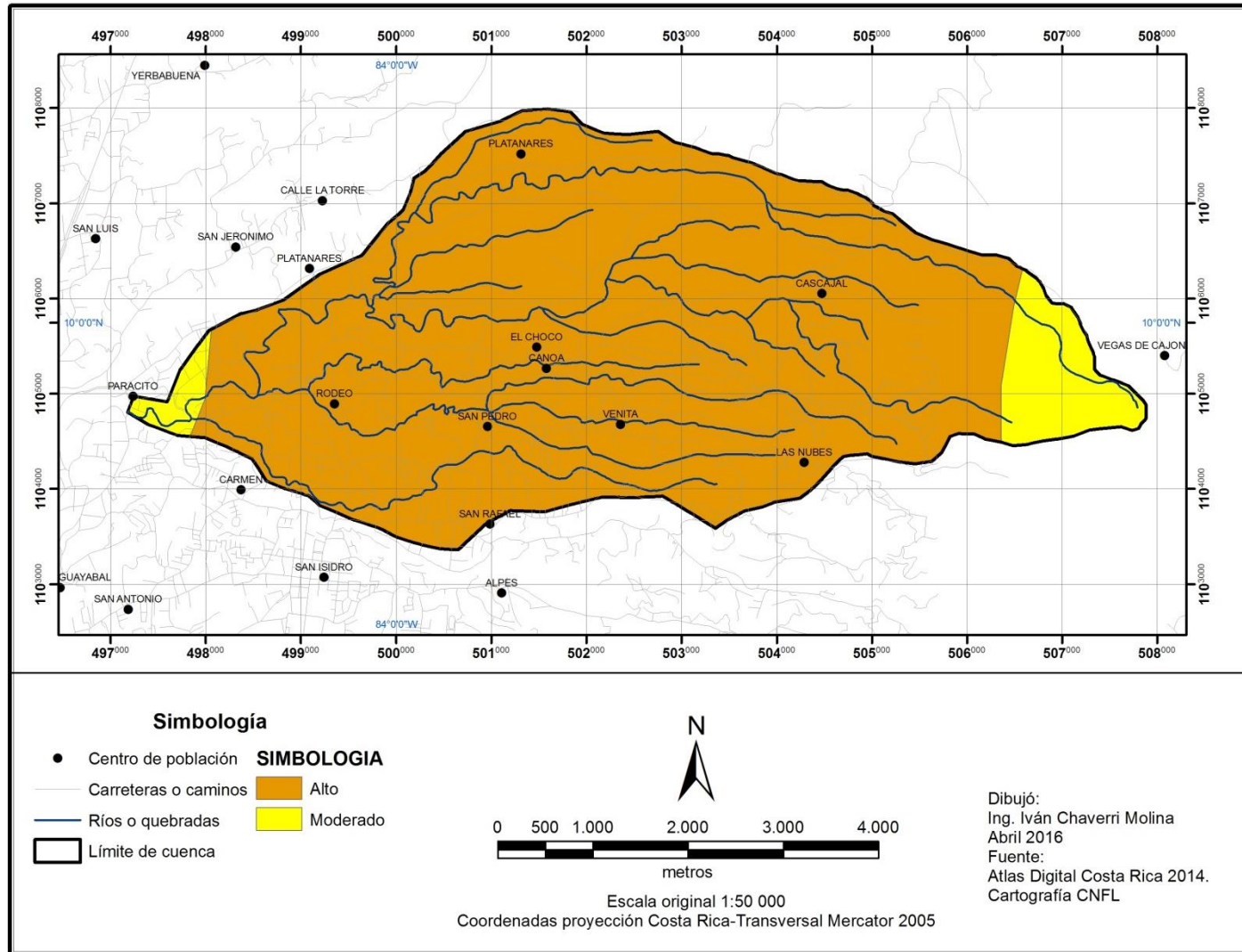


Figura 8. Susceptibilidad a deslizamientos por el factor litología (SI) en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

Factor humedad del suelo (Sh).

El factor humedad del suelo se obtuvo por medios indirectos, a partir de los mapas de precipitación mensual elaborados por el Instituto Meteorológico Nacional (2014) correspondiente a la sección del área de interés.

A partir del proceso de digitalización de los mapas de precipitaciones, se obtuvo una secuencia mensual de precipitación promedio. En la figura 9 se puede observar la distribución geográfica del régimen de precipitaciones medias.

A partir de los valores medios de lluvia, se asignó el valor correspondiente según los criterios indicados en el cuadro 4 y se determinó el área correspondiente a cada rango de precipitación pluvial. Los resultados se muestran en el cuadro 16.

Cuadro 16. Distribución del área, en hectáreas, según los valores de precipitación promedio mensual, en la microcuenca del río Macho. San José, Costa Rica.

Precipitación mensual (mm)	25-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-400	400-500
Punto medio	38	75	125	175	225	275	350	450
Valor de índice de precipitación	0	0	1	1	1	2	2	2
Enero		1809,7	1029,1					
Febrero	350,1	1458,6	1030,1					
Marzo	2558,2	280,6						
Abril			2488,8	350				
Mayo					1586,5	611,1	641,2	
Junio						99,5	2739,3	
Julio						1884,1	954,7	
Agosto						613,5	2225,3	
Septiembre							634,9	2203,9
Octubre						131,7	2707,1	
Noviembre				186,1	715,4	1513,7	423,6	
Diciembre			355,7	1105,4	743,8	633,9		

La información mostrada en el cuadro 16 permite observar el patrón temporal de distribución de precipitaciones. Durante el primer trimestre (enero-marzo) la mayor parte del área de estudio se encuentra recibiendo menos de 125 mm de precipitación como promedio mensual. Mora y Vahrson (1991) estiman que en Costa Rica el valor de evapotranspiración potencial es de 125 mm mensuales, por lo que la precipitación que recibe el suelo durante el primer trimestre es igual o menor a las pérdidas por evapotranspiración. Esto significa que durante estos meses la susceptibilidad es baja debido a que no se está acumulando humedad en el suelo.

A partir del mes de mayo, la precipitación supera, la tasa de evapotranspiración, por lo que el suelo empieza a acumular humedad. Durante un período de cinco meses, comprendido entre junio y octubre la totalidad de la cuenca se encuentra bajo un régimen de precipitación mayor a 250 mm como promedio mensual, incrementando notablemente la susceptibilidad a deslizamientos.

El atlas climatológico de Costa Rica, elaborado por el Instituto Meteorológico Nacional (2014), revela que en la microcuenca del río Macho, durante el mes de setiembre se presenta un máximo valor de precipitación; en el que el 77,6% del área de la microcuenca está recibiendo entre 400 y 500 mm de lluvia como promedio mensual. Este es un elemento que permite ubicar en el tiempo una mayor probabilidad de saturación de humedad en el suelo, con lo que es de esperarse una mayor incidencia de deslizamientos asociados al factor humedad en el suelo (Sh).

La clasificación final del parámetro de humedad es de 4, lo cual indica una influencia alta en lo que respecta a la susceptibilidad al deslizamiento. (Aguilar 1996) y (Peraldo 2000) reportan al menos un deslizamiento asociado a lluvias, ocurrido en el área de estudio. Este siniestro dejó como saldo seis casas declaradas inhabitables en San Pedro de Cascajal.

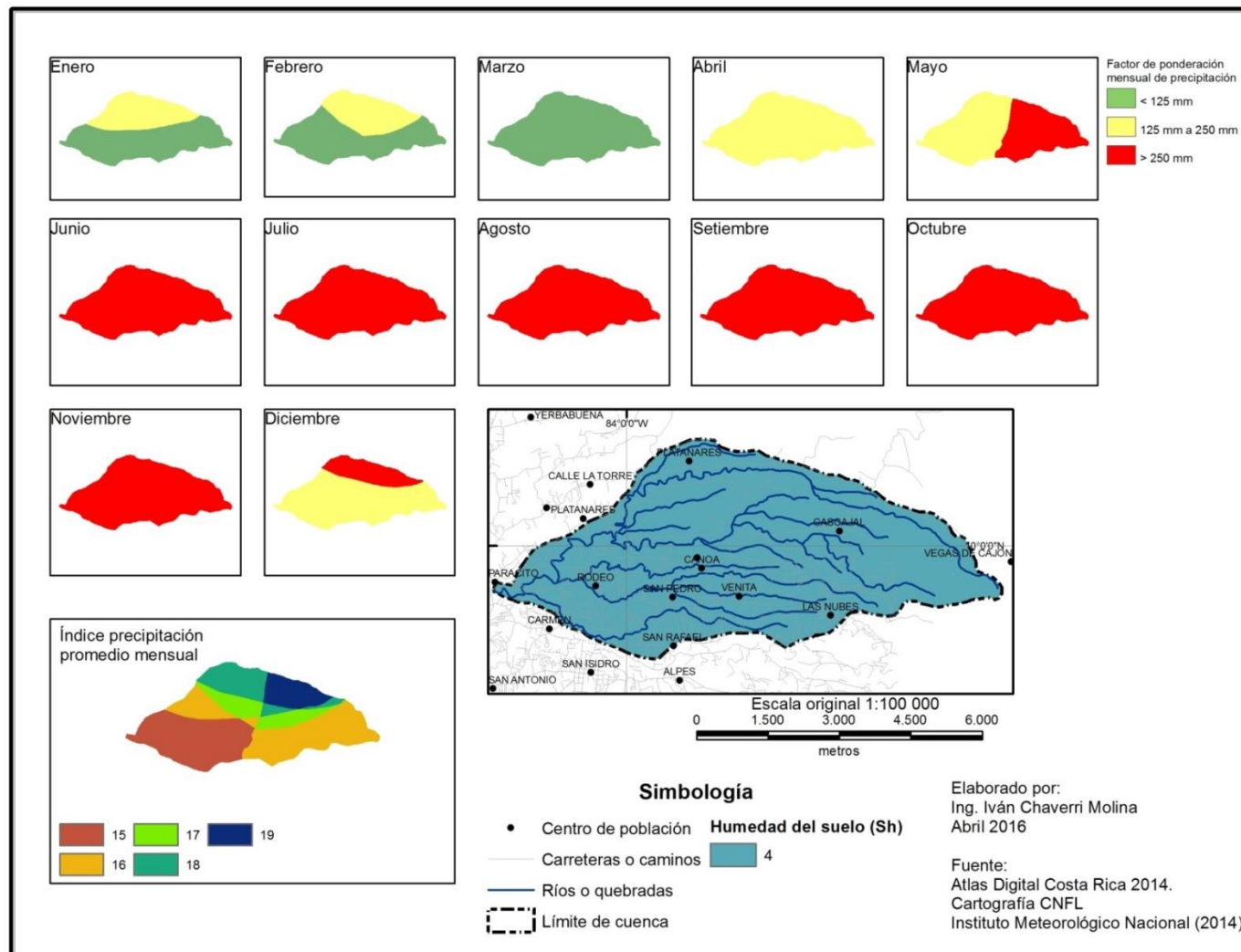


Figura 9. Índice de precipitación promedio mensual y factor de susceptibilidad por humedad del suelo (Sh) en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

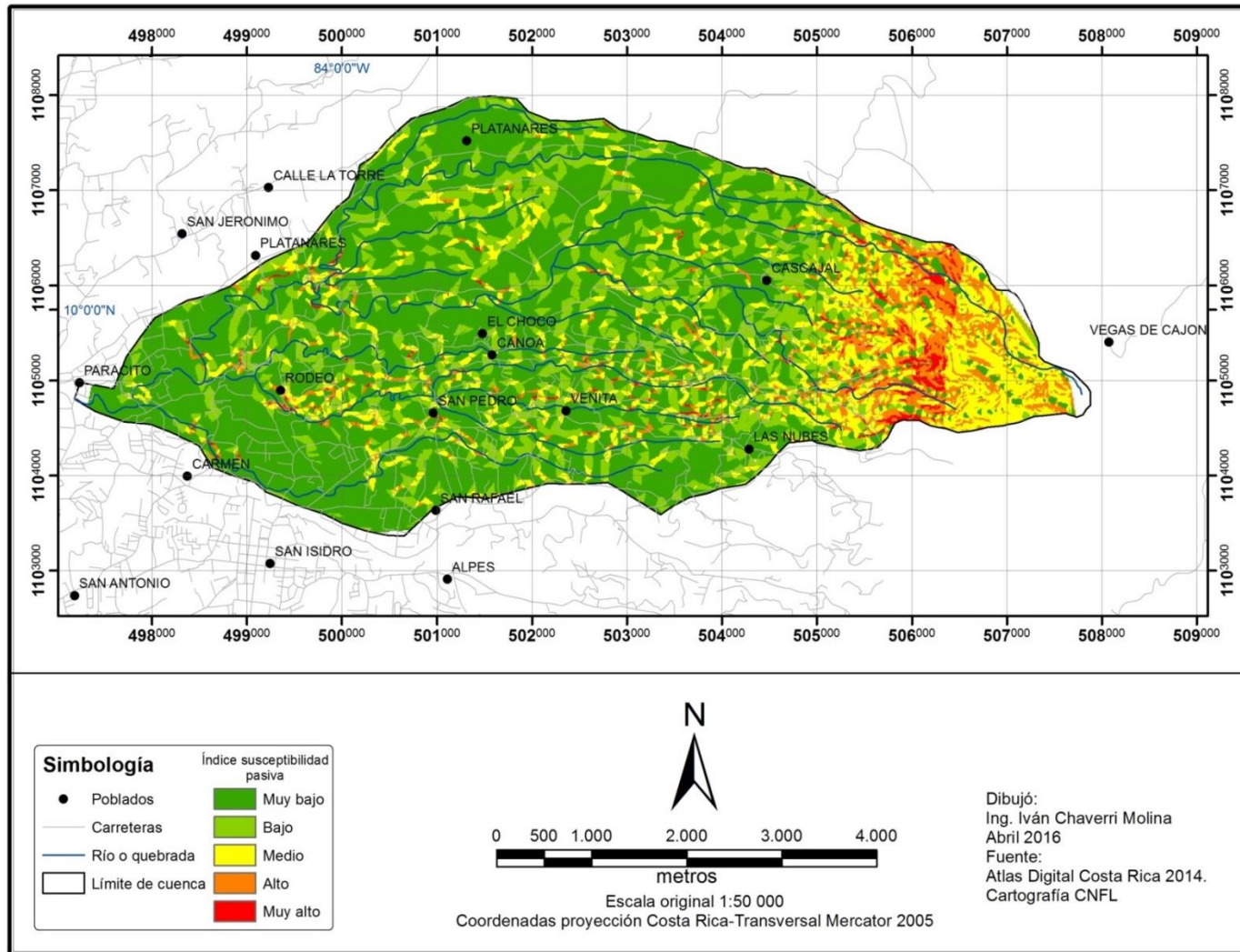


Figura 10. Índice de susceptibilidad pasiva a deslizamientos (FS) en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

En la figura 10, se muestra la integración entre los factores de susceptibilidad, denominados FS en la ecuación 1; corresponde a la multiplicación de los factores pendiente, litología y humedad del suelo. El factor de susceptibilidad intrínseca del sitio (FS) tendrá valores que oscilan entre 0 y 125; en el caso específico de la microcuenca del río Macho, los resultados obtenidos varían entre 0 y 80; resultado altamente influenciado por los factores pendiente y litología, ya que el factor de humedad del suelo es un valor constante para toda la microcuenca. En esta microcuenca el factor de susceptibilidad FS puede expresarse como:

$$FS = S_r * S_l * K$$

Donde:

- FS = Susceptibilidad intrínseca del sitio
- S_r = Factor pendiente o relieve relativo
- S_l = Factor litológico
- K = Constante correspondiente al factor $S_h = 4$

Para interpretar el resultado del índice de susceptibilidad Mora *et al.* (2002); Mora (2004a) y Barrantes *et al.* (2011), han recomendado en sus publicaciones no establecer una escala de valores única; sino que proponen dividir el rango de valores obtenidos en cinco clases de susceptibilidad. Para este caso en específico siendo que los valores oscilan entre 0 y 80, se propone una distribución con un ancho de clase de dieciséis unidades. Como se muestra en el cuadro 17.

Cuadro 17. Distribución del área según el grado de susceptibilidad intrínseca (FS), en la microcuenca del río Macho, San José, Costa Rica.

Clase	Área (ha)	(%)	Susceptibilidad
0-16	1606,1	56,6%	Muy bajo
17-32	580,7	20,5%	Bajo
33-48	424,8	15,0%	Medio
49-64	188,4	6,6%	Alto
65<	38,8	1,4%	Muy alto
Total	2838,8	100,0%	

Considerando únicamente los factores de susceptibilidad (FS), un 76,1% de la microcuenca del río Macho presenta condiciones de muy baja o baja susceptibilidad, esto se debe a que las condiciones topográficas predominantes son de pendiente plana aun cuando se encuentran en los terrenos con susceptibilidad alta por concepto de litología. Así mismo los terrenos más susceptibles por tener mayor pendiente están ubicados en zonas con un mejor material litológico. Las regiones con un grado de susceptibilidad alto o muy alto, se encuentran localizados en las zonas de traslape de pendientes fuertes y terrenos poco consolidados.

Factores detonantes (FD).

Lluvias máximas (Tp)

En el área de estudio se presenta un rango de precipitación máxima, en un período de 24 horas, que oscila entre los 200 y los 250 mm. En la figura 11 se muestran las dos condiciones, sin embargo para efectos de aplicación de la metodología Mora-Vahrson y de acuerdo a la clasificación mostrada en el cuadro 7, toda la microcuenca se encuentra clasificada como de susceptibilidad media, con un factor Tp de 3.

Cuadro 18. Precipitación máxima en un período de 24 horas con un período de retorno de 100 años, en la microcuenca del río Macho. San José Costa Rica.

Precipitación máxima (mm)	Clasificación	Factor Tp	Área (ha)	Porcentaje (%)
200	Medio	3	2295,1	80,8%
250	Medio	3	543,7	19,2%
Total			2838,8	100,0%

Fuente: Vahrson (sf).

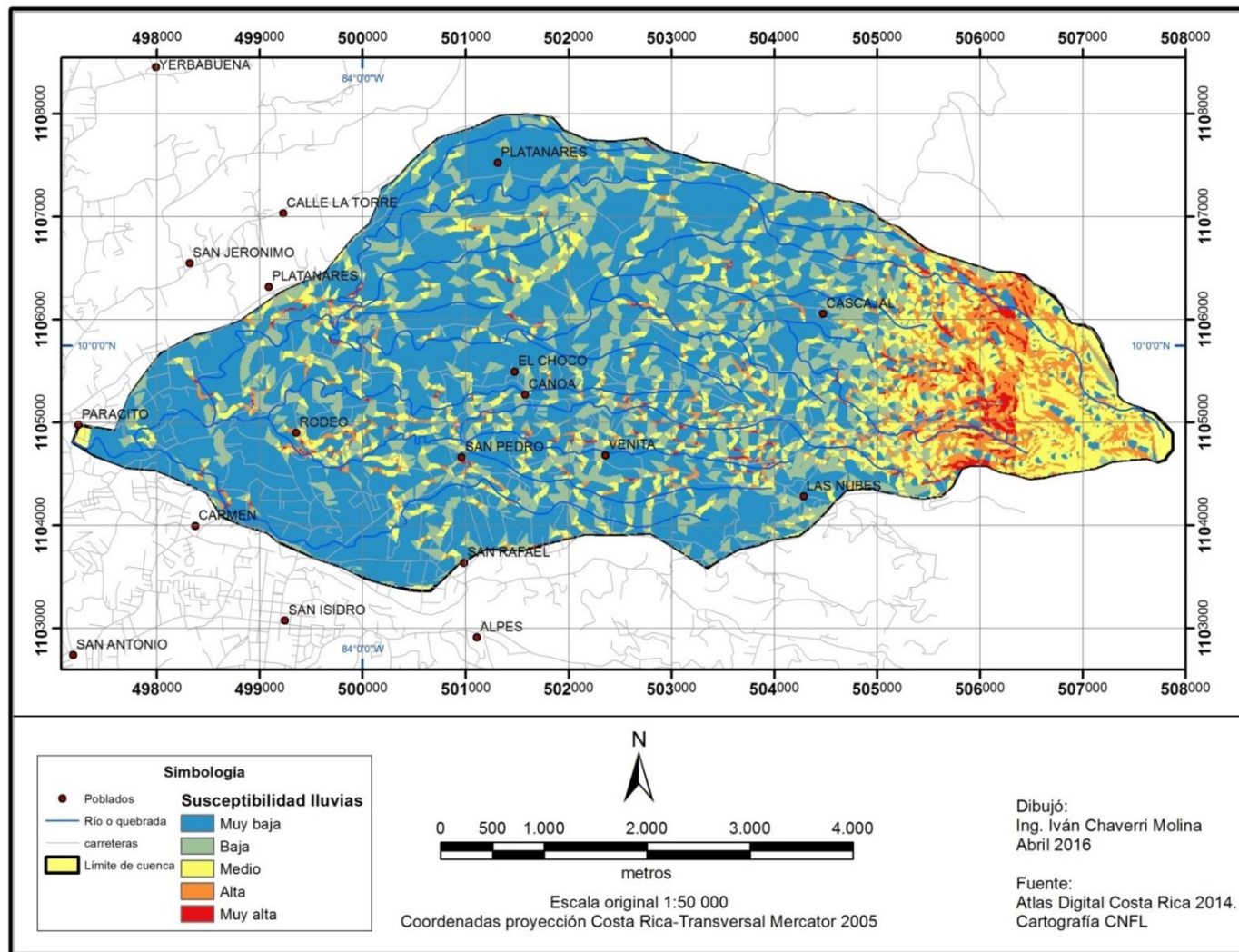


Figura 11. Susceptibilidad a deslizamientos detonados por lluvias máximas en un período de 24 horas, en la microcuenca del río Macho. San José Costa Rica.

Sismos (Ts).

El área de estudio se encuentra en la región denominada Arco Interno o Arco Volcánico caracterizada por eventos sísmicos generados a partir de fallas geológicas locales (CNE, 2003). De acuerdo al mapa de fuentes generadoras de sismos, intensidades máximas y áreas de influencia (Ramírez et al, 1996), le corresponde un valor de Intensidad Máxima de VIII.

La escala Mercalli no se basa en los registros sismográficos sino en el efecto o daño producido en las estructuras y en la sensación percibida por las personas. Denyer y otros (2003), describen la magnitud VIII con las siguientes características la conducción de vehículos es difícil. Daños de consideración en mampostería. Caída de tanques elevados y monumentos. Algunas ramas de árbol caen. Cambio en flujo y temperatura de pozos de agua. Grietas en terrenos húmedos y taludes inclinados.

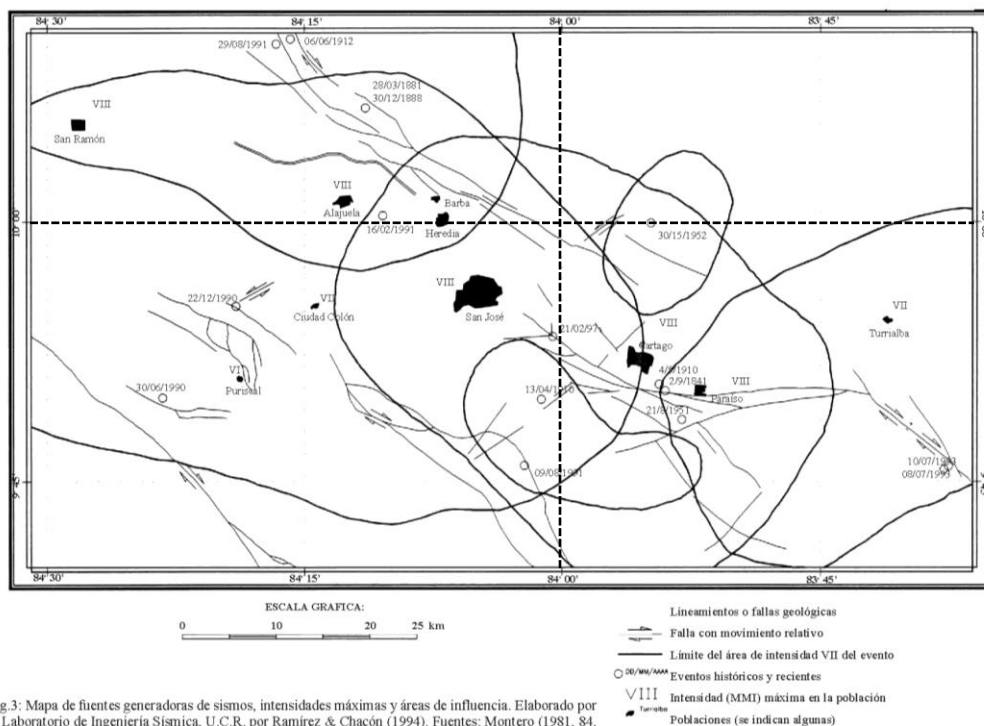


Fig.3: Mapa de fuentes generadoras de sismos, intensidades máximas y áreas de influencia. Elaborado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, U.C.R. por Ramírez & Chacón (1994). Fuentes: Montero (1981, 84, 86, 94), Alvarado et al. (1988), Morales (1985) y RSN (1990-94).

Figura 12: Mapa de fuentes generadoras de sismos, intensidades máximas y áreas de influencia. (Ramírez et al, 1996).

Este valor de intensidad máxima le corresponde un grado de susceptibilidad de “Elevado” tal y como se muestra en el cuadro 6. La totalidad del área de estudio se ubica dentro de una misma categoría de susceptibilidad por eventos sísmicos. Estos resultados son congruentes con Mora, Alvarado & Morales (1992), quienes ubican en el área de estudio el sismo Patillos, ocurrido el 30 de diciembre de 1952. Este sismo produjo gran cantidad de deslizamientos y avalanchas y se reportaron 21 personas fallecidas. (Peraldo, 2000).

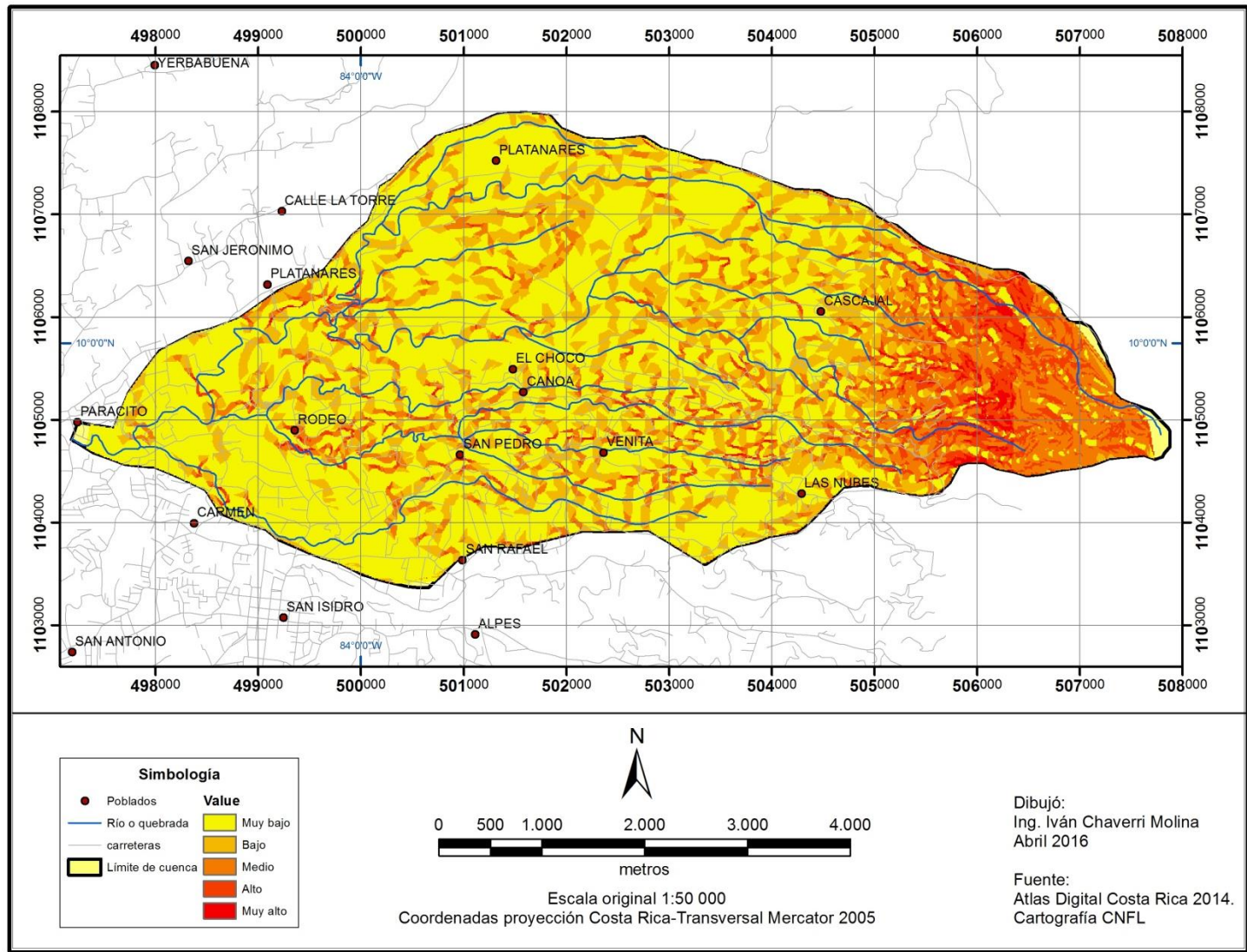


Figura 13. Susceptibilidad a deslizamientos detonados por sismos en la microcuenca del río Macho. San José Costa Rica.

Susceptibilidad a deslizamientos (H).

Una vez analizada la información correspondiente a los factores detonantes (FD), se elaboró el mapa de susceptibilidad a deslizamientos incorporando todos los factores que indicados en la metodología Mora-Vahrson. En el cuadro 19 se resumen los valores para cada factor, expresado como un porcentaje del área de la cuenca.

Cuadro 19. Porcentaje del área de la microcuenca del río Macho, según el valor de susceptibilidad, correspondiente a cada factor de la metodología Mora-Vahrson.

Factor	Valor de susceptibilidad							Total
	0	1	2	3	4	5	6	
Pendiente	38,2%	18,3%	20,5%	12,4%	7,8%	2,8%		100%
Litología				7%	93%			100%
Humedad en el suelo				100%				100%
Sismos							100%	100%
Precipitaciones extremas.				100%				100%

En el cuadro 19, se puede observar que los factores “Humedad en el suelo”, “Sismos” y “Precipitaciones extremas”, tienen un valor constante para toda la microcuenca. Esto es debido a que los datos utilizados para delimitar la humedad en el suelo y las precipitaciones extremas, provienen de fuentes secundarias con una escala baja (hasta 1:250000). En el caso de sismos, el área de la microcuenca es relativamente pequeña y con una forma ovalada por lo que es muy probable que se encuentre dentro de una misma unidad de intensidad sísmica.

A partir de los valores obtenidos para cada factor de susceptibilidad, se elaboró el mapa de susceptibilidad a deslizamientos para la microcuenca del río Macho, mostrado en la figura 14.

En el cuadro 20 se presenta la distribución de área según la clasificación del potencial de deslizamiento en el área de estudio.

Cuadro 20 Caracterización de la microcuenca del río Macho en cuanto a la susceptibilidad a deslizamientos.

Índice de susceptibilidad	Clasificación	Potencial de deslizamiento	Área (ha)	Porcentaje
0 – 6	I	Muy bajo	1085,51	38,2%
7 – 32	II	Bajo	0,00	0,0%
33 – 162	III	Moderado	520,66	18,3%
163 – 512	IV	Mediano	1005,46	35,4%
513 – 1250	V	Alto	227,17	8,0%
>1250	VI	Muy alto	0,0	0,0%
Total			2838,80	100%

Los resultados mostrados en el cuadro 20, revelan que en orden de importancia respecto al área de la microcuenca, los terrenos con muy bajo potencial de deslizamientos ocupan el primer lugar con un 38,2%; esto se debe principalmente a que el terreno presenta condiciones de poca inclinación. En segundo lugar se encuentran las regiones de moderado potencial, con un 35,4%, que corresponden a las zonas de pendientes moderadas. Las zonas clasificadas con grado V, alto potencial de deslizamiento, corresponden únicamente a un 8% del área y se encuentran en las zonas de mayor pendiente, asociado además a condiciones geológicas susceptibles a deslizamientos.

Lo anterior concuerda con el señalamiento que realizó la Comisión Nacional de Emergencias, (2003), en el cual se anota que el cantón Vázquez de Coronado es vulnerable a deslizamientos de tierra, e indica que los efectos más probables seguramente sean:

- destrucción de carreteras, caminos y puentes
- generación de avalanchas
- personas y viviendas sepultadas
- daños a líneas vitales (Acueductos, tendido eléctrico).

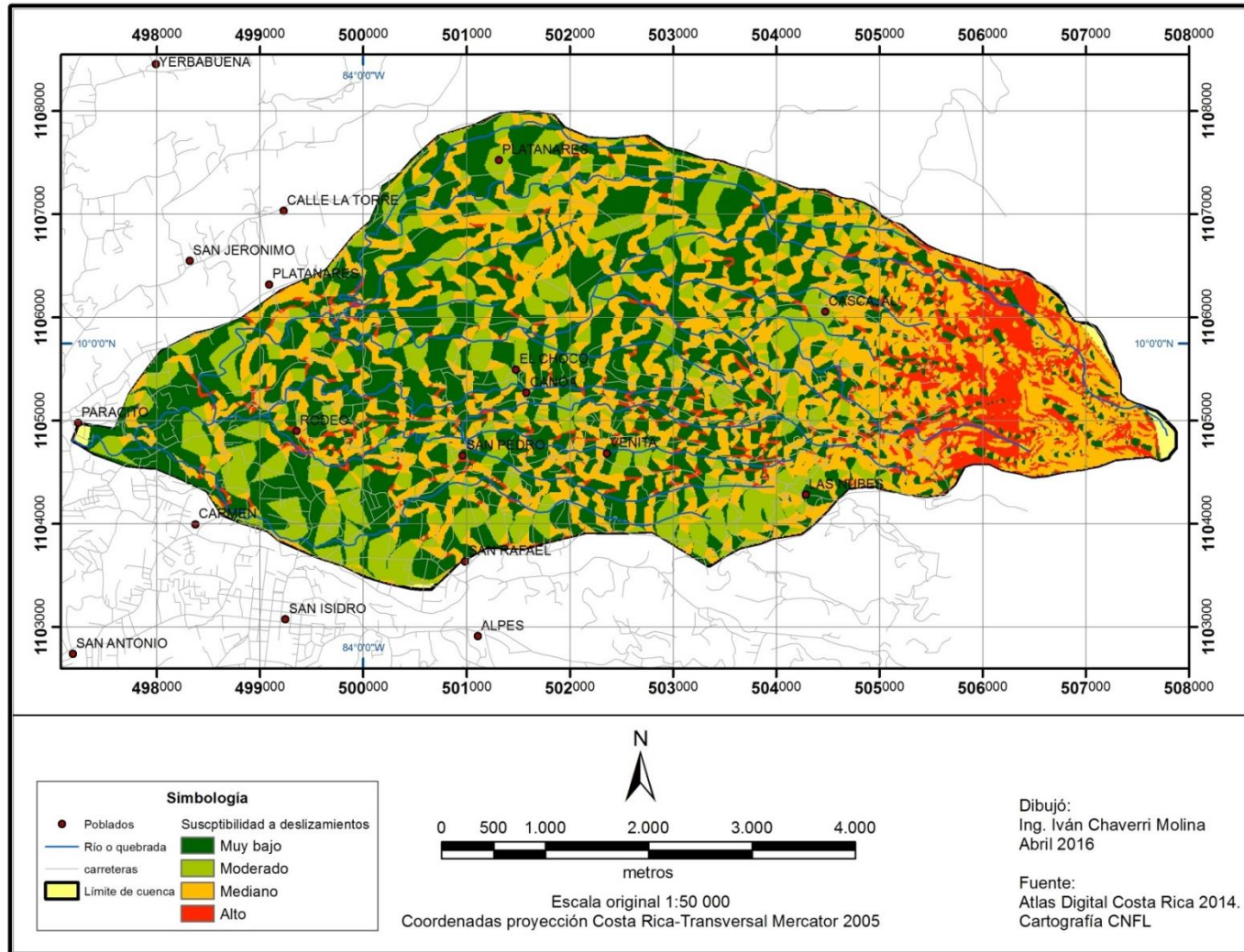


Figura 14. Susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Macho. San José Costa Rica.

La susceptibilidad a deslizamientos y el uso del suelo.

En este estudio se consideran como áreas prioritarias las que estén destinadas al pastoreo, desprovistas de vegetación arbórea y que se encuentran en las categorías de susceptibilidad mediano o alto.

La cuenca fue clasificada según el uso del suelo y la susceptibilidad a deslizamientos, los resultados se muestran en el cuadro 21.

Cuadro 21. Distribución porcentual del área según el uso del suelo y el grado de susceptibilidad a deslizamientos, en la microcuenca del río Macho, San José Costa Rica.

Uso del suelo	Grado de susceptibilidad a deslizamientos					Total
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Mediano	Alto	
<i>Usos forestales</i>						
Bosque primario	0,3%	0,0%	0,0%	1,1%	1,1%	2,4%
Bosque secundario	0,4%	0,0%	0,0%	1,2%	0,8%	2,4%
Bosque secundario fragmentado	9,3%	0,0%	3,8%	9,0%	2,0%	24,1%
Charrales	0,5%	0,0%	0,2%	0,2%	0,0%	0,9%
Plantaciones de coníferas	0,1%	0,0%	0,1%	0,3%	0,0%	0,6%
Subtotal	10,6%	0,0%	4,1%	11,8%	3,9%	30,4%
<i>Usos agropecuarios</i>						
Cultivos anuales	4,4%	0,0%	2,8%	2,6%	0,1%	9,9%
Fincas cafetaleras	0,5%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%	0,8%
Invernadero	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%	0,3%
Pasto	16,7%	0,0%	7,4%	15,4%	1,9%	41,3%
Pasto árboles dispersos	3,4%	0,0%	1,9%	3,7%	1,8%	10,8%
Pasto mezclado con árboles	0,3%	0,0%	0,3%	0,3%	0,1%	1,0%
Subtotal	25,4%	0,0%	12,6%	22,2%	3,9%	64,1%
<i>Uso urbano</i>						
Zona urbana de baja densidad	0,6%	0,0%	0,7%	0,8%	0,1%	2,1%
Zona urbana de moderada densidad	0,3%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%	0,5%
Zona urbana de alta densidad	1,4%	0,0%	0,9%	0,5%	0,1%	2,9%
Subtotal	2,3%	0,0%	1,7%	1,4%	0,2%	5,5%
Total	38,2%	0,0%	18,3%	35,4%	8,0%	100,0%

Se determinó que el 35,4% del área de la cuenca presenta un grado mediano de susceptibilidad a deslizamientos. Al sobreponerlo con el mapa de uso del suelo, se determinó que los pastos con susceptibilidad mediana corresponden a un 15,4%.

En el cuadro 21 se presentaron los resultados de la clasificación del área de la cuenca y se muestra que el 8% se encuentra en áreas de alta susceptibilidad. Solamente el 1,9% del área total, corresponde a áreas de pastos en la categoría de alta susceptibilidad.

Por medio de la aplicación de esta metodología se identificaron algunas áreas urbanas que se encuentran asentadas en zonas de alta y mediana susceptibilidad a deslizamientos. Entre las que destacan San Pedro y San Rafael de Coronado; estas comunidades han sufrido los efectos de deslizamientos provocados tanto por sismos (Peraldo, 2000) como por lluvias intensas (Aguilar, 1996).

Otras comunidades que según la metodología MV se encuentran en zonas susceptibles grado IV o V, son: Barrio El Carmen, Paracito y una comunidad de baja densidad ubicada aproximadamente 1200 metros al noreste de Cascajal.

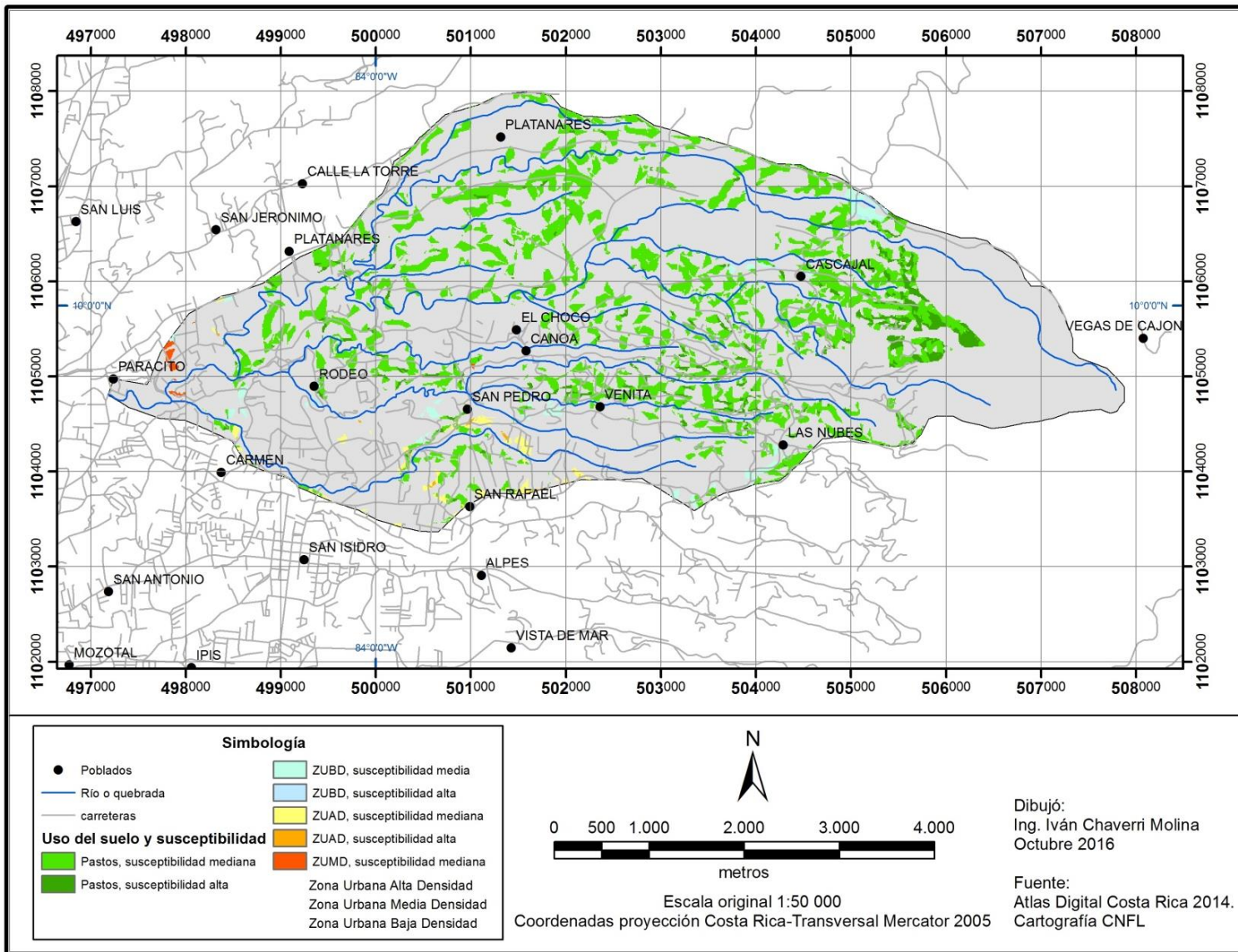


Figura 15. Propuesta de áreas prioritarias para restauración ecológica, según el criterio de susceptibilidad a deslizamientos.

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones

1. La metodología Mora-Vahrson permite realizar zonificaciones de susceptibilidad a deslizamientos, de una forma sencilla por medio del uso de sistemas de información geográfica.
2. La aplicación de la metodología Mora-Vahrson, muestra que el 35,4% del área de estudio presenta una susceptibilidad a deslizamientos “Mediana”; mientras que el 8% del área de la microcuenca tiene una susceptibilidad a deslizamientos “Alta”.
3. Se elaboró un modelo cartográfico que permite implementar la metodología Mora-Vahrson en un sistema de información geográfica.
4. Las regiones más susceptibles a deslizamientos se encuentran ubicadas en las partes altas de la microcuenca. Se identificaron sitios muy localizados, principalmente en los cañones fluviales, donde la susceptibilidad es alta. Estas regiones y las de susceptibilidad moderada, pueden ser integradas dentro de la propuesta para el Corredor Biológico Urbano que maneja la Compañía Nacional de Fuerza y Luz.
5. Se identificaron áreas urbanas (San Rafael, San Pedro, Barrio El Carmen, Paracito) asentadas en zonas de medio y alto grado de susceptibilidad a deslizamientos.

6. Los factores de humedad en el suelo (Sh), sismos (Ts) e intensidad de precipitaciones (Tp), son valores constantes para toda el área de estudio; por lo que la interacción de los factores pendiente y litología, son los que predominan a la hora de zonificar la susceptibilidad a deslizamientos.
7. Se proponen como área prioritaria para realizar restauración ecológica, un sector de 436,4 hectáreas (15,4% del área de la cuenca) de pastos ubicados en zonas de mediana susceptibilidad y 54 hectáreas (1,9% del área de la cuenca) de pastos ubicados en zonas de alta susceptibilidad.
8. El resultado de esta investigación puede ser utilizado como un insumo para la toma de decisiones en lo que respecta a la planificación urbana, otorgamiento de permisos para la construcción de obras de infraestructura y en la regulación de uso del terreno.
9. El uso de esta metodología no debe sustituir, bajo ninguna circunstancia, los estudios geotécnicos detallados, principalmente en las áreas de susceptibilidad de media a muy alta.
10. El análisis de los resultados derivados de la aplicación de esta metodología, permitió identificar áreas prioritarias para el ordenamiento territorial, prevención de desastres, manejo y gestión de riesgo.
11. La red de caminos distrital muestra algunos puntos con susceptibilidad alta a los deslizamientos. La ocurrencia de un evento de deslizamiento en estos puntos, dejaría incomunicados poblados como Las Nubes y Cascajal

Recomendaciones

- En las zonas urbanas ubicadas en áreas susceptibles a deslizamientos grado IV o V, realizar los estudios técnicos y determinar las acciones correctivas y preventivas a implementar, para reducir el riesgo.
- Validar la zonificación obtenida en este estudio, por medio de fotografía aérea más reciente o bien visitas de campo a sitios de muestreo.
- Se recomienda utilizar esta metodología en escalas de estudio no mayores a 1:50000, debido a la dificultad para acceder información detallada de litología, precipitaciones y topografía.
- Implementar un plan de restauración ecológica, en las áreas de pasto en las zonas de mediana y alta susceptibilidad. Este plan de restauración debe ser una estrategia que permita combinar el uso de especies forestales y la producción agropecuaria.
- Las obras de infraestructura civil deben respetar los retiros y áreas de protección de ríos y quebradas, especialmente en las zonas de alta pendiente.
- Aplicar técnicas de bioingeniería del suelo, para estabilizar las laderas. Es importante implementar el manejo de aguas y la conformación de los taludes con pendientes adecuadas, según las condiciones del terreno.
- Coordinar con instituciones y autoridades gubernamentales para aumentar la densidad de estaciones meteorológicas en la cuenca del Río Virilla.

- Coordinar con las diferentes instituciones encargadas del manejo y atención de emergencias, las estrategias a implementar en las áreas urbanas ubicadas en zonas de media y alta susceptibilidad a deslizamientos. A fin de que la población esté debidamente informada sobre las acciones a tomar en caso de un deslizamiento.

Referencias bibliográficas.

- Aguilar, N. 1996. Caos en San José por fuertes lluvias. La Nación, San José, CR. Ago.21. (En línea) consultado el 05 de mayo de 2016. Disponible en: http://www.nacion.com/archivo/Caos-San-Jose-fuertes-lluvias_0_14028598_13.html
- Aritzabal, E; Yokota, S. 2006. Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra. Dyna Medellín Colombia: (73)149:5-15. (En línea) Consultado 10 set 2012. Disponible en: http://dyna.unalmed.edu.co/ver_articulo.php?id_articulo=EA100505&tipo=articulo&id=149
- Barillas, E. 2008. Guía metodológica para la evaluación de zonas susceptibles a deslizamientos disparados por lluvias. (En línea) Ciudad de Guatemala, Guatemala. Consultado 01 ago. 2012. Disponible en: <http://www.geociencias.com.gt/foto/propuesta.pdf>
- Barrantes, G. Barrantes, O y Núñez, O. 2011. Efectividad de la metodología Mora – Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. Revista Geográfica de América Central 2(47):141-162.
- CNE (Comisión Nacional de Emergencias, CR). 2003. Atlas de Amenazas Naturales. (En línea) San José, Costa Rica. Consultado 17 mayo 2016. Disponible en: <http://www.cne.go.cr/Atlas%20de%20Amenazas/CORONADO.htm>
- Denyer, P. Montero, W. y Alvarado G. 2003. Atlas Tectónico de Costa Rica. 1 Ed., Editorial UCR. San José, Costa Rica. 79 p.

- Highland, L., y Bobrowsky, P. 2008, Manual de derrumbes. Guía para entender todo sobre los derrumbes: Reston, Virginia, Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA, 129 p. (En línea) Consultado 10 set. 2012. Disponible en: http://www.gfdr.org/gfdr/sites/gfdr.org/files/publication/Manual_de_derrumbes_WEB_DS%5B1%5D.pdf
- INETER, SNET & BGR. 2004. Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Nicaragua: el Método Mora-Vahrson. (En línea). Consultado 08 Set. 2012. Disponible en: http://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/desliza/estudios/Mora_Vahrson.pdf
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, CR). 2014. Atlas Climatológico de Costa Rica (CD-ROM). San José Costa Rica. 1 CD-ROM.
- I.T.C.R. (Instituto Tecnológico de Costa Rica). 2014. Atlas digital de Costa Rica. (CD-ROM) Cartago, Costa Rica. 1 CD ROM.
- Lal Rajbhandari,P; Monwar, A. Shakil M. 2002. Application of GIS (Geographic Information System) for landslide hazard zonation and mapping disaster prone area: A study of Kulekhani watershed, Nepal. Plan Plus 1 (1): 117-123. (En línea). Consultado 03 ago. 2012. Disponible en: <http://www.bdresearch.org/home/attachments/article/519/ooo.pdf>
- MIVAH (Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, CR). 2009. Plan Regional Urbano para el Gran Área Metropolitana. San José. Costa Rica.
- Mora, R. (s.f.) Fundamentos sobre deslizamientos. (En línea). Consultado 10 junio 2016. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/conf15.pdf>

- _____, Vahrson, W. y Mora, S. 1992. Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Centro de Coordinación para la prevención de desastres naturales en América Central (CEPREDENAC).
- _____ y Mora, S. 1994. Deslizamientos. In Denyer, P. & Kussmaul, K. Atlas geológico de la Gran Área Metropolitana. Ed Tecnológica de Costa Rica. Cartago : 245-288.
- _____, Chaves, J. y Vázquez, M., 2002. Zonificación de la Susceptibilidad al Deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método Mora-Vahrson (Mora, R., Vahrson & Mora, S., 1992). Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, FUNDEVI 0960-00, Vicerrectoría de Investigación 113-A0827, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- _____ 2004a. Aplicación de la metodología MVM para determinar la susceptibilidad a deslizamientos en el Bajo Cacao, Atenas, Alajuela. Escuela Centroamericana de Geología. UCR, San José Costa Rica.
- _____ 2004b. Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología UCR. San José Costa Rica. (En línea). Consultado 10 ago. 2012. Disponible en: http://www.femica.org/areas/modambiental/archivos/foro/deslizamiento_canton_san_jose.pdf

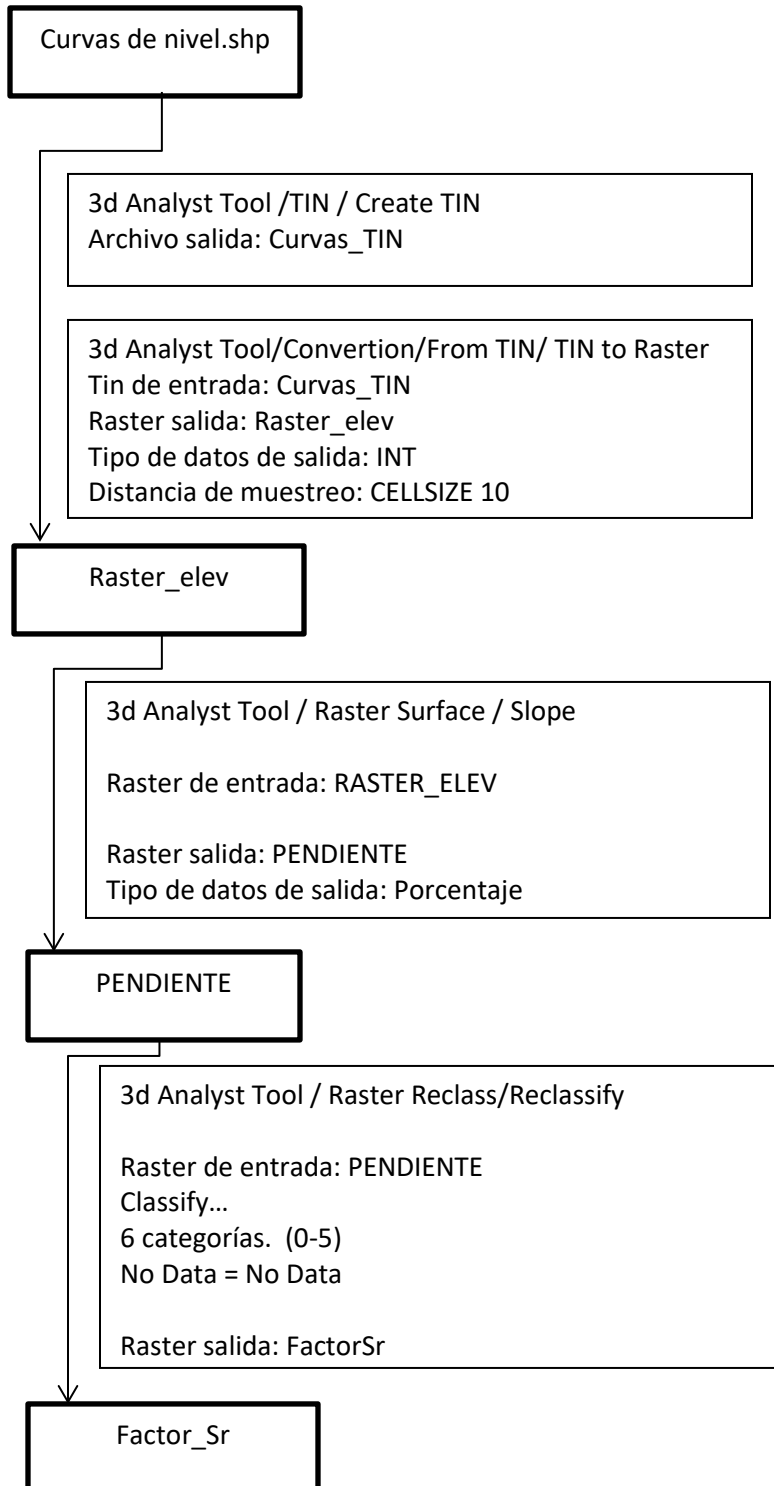
- Mora, S., y Vahrson, W., 1991. Determinación a priori de la Amenaza de Deslizamientos sobre grandes áreas, utilizando Indicadores Morfodinámicos. In Alzate, J.B. (ed) Memoria sobre el primer simposio internacional sobre sensores remotos, sistemas de información Geográfica (SIG), para estudios de Riesgos naturales, Bogotá, Colombia. 259 - 273
- _____ 1994. Macrozonation methodology for landslide hazard determination. Bulletin of the Association of Engineering and Geologist. 31(1): 49-58.
- _____ Alvarado, G. y Morales L. 1992. Mapa preliminar sintético de amenazas geológicas de Costa Rica: su importancia en el desarrollo de la infraestructura civil. Revista Geográfica de América Central. 25-26: 355-371.
- Peraldo, G. 2000. Amenaza de deslizamientos. In Denyer, P. y Kussmaul S. (comp). Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago: 273-286.
- Ramírez, R; Santana, G y Chacón, O. 1996. Mapa de amplificación sísmica del Valle Central, Costa Rica. Revista Geológica de América Central. 19/20:37-55.
- Salazar, L. 2007. Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfico ILWIS utilizando el método Mora & Vahrson, 1991. (En línea). San José Costa Rica. Consultado 10 ago. 2012. Disponible en <http://hercules.cedex.es/hidraulica/prohimet/Br07/Presentaciones/Salazar.pdf>
- Segura, G. Badilla, E. Badilla, E. y Obando, L. 2011. Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. Revista Geológica de América Central. 2(45): 101-121.

- SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales). 2004. Memoria técnica para el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de tierra en El Salvador. (En línea) San Salvador, El Salvador. Consultado 25 ago. 2012. Disponible en: <http://www.snet.gob.sv/Documentos/SusceptMovMasa-ES-SNET-2004.pdf>
- Vahrson, W. (s.f.). Mapa preliminar de lluvias máximas anuales en Costa Rica con una duración de 24 horas y un período de retorno de 100 años. Escala 1:1000000. Mapoteca Universidad Nacional. (En línea) consultado el 25 de abril de 2016. Disponible en <http://www.mapoteca.geo.una.ac.cr/index.php/repository.html?func=fileinfo&id=588>.
- Varnes, D. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Natural Hazards (3). UNESCO. París, Francia. (En línea) consultado el 13 de octubre de 2016. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0006/000630/063038EB.pdf>
- Vargas, R. (2002). Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos Municipio de La Celia, Departamento de Risaralda. (Informe final). Pereira, Colombia. (En línea) consultado el 16 de octubre de 2016. Disponible en <http://www.carder.gov.co/intradocuments/webDownload/susceptibilidad-a-deslizamientos-la-celia>

Anexos.

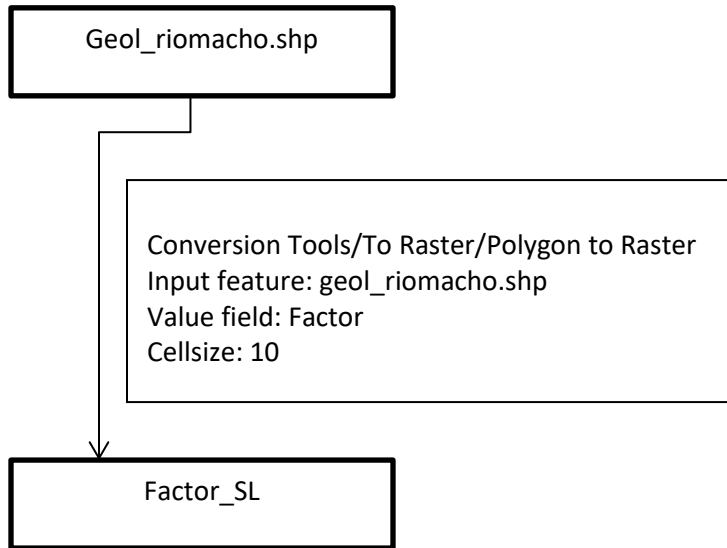
ANEXO 1.

MODELO CARTOGRÁFICO FACTOR PENDIENTE



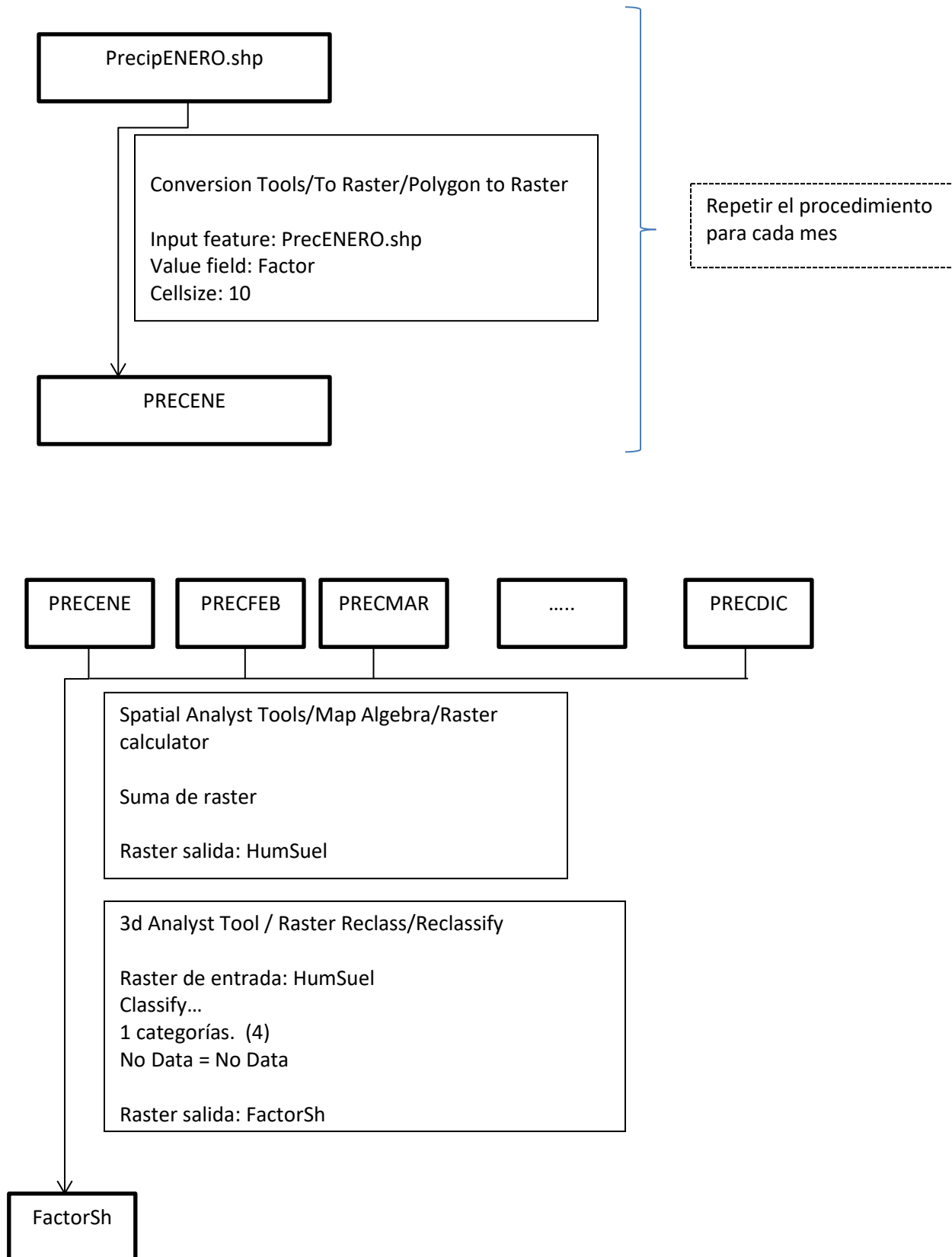
ANEXO 2.

MODELO CARTOGRÁFICO FACTOR LITOLOGÍA



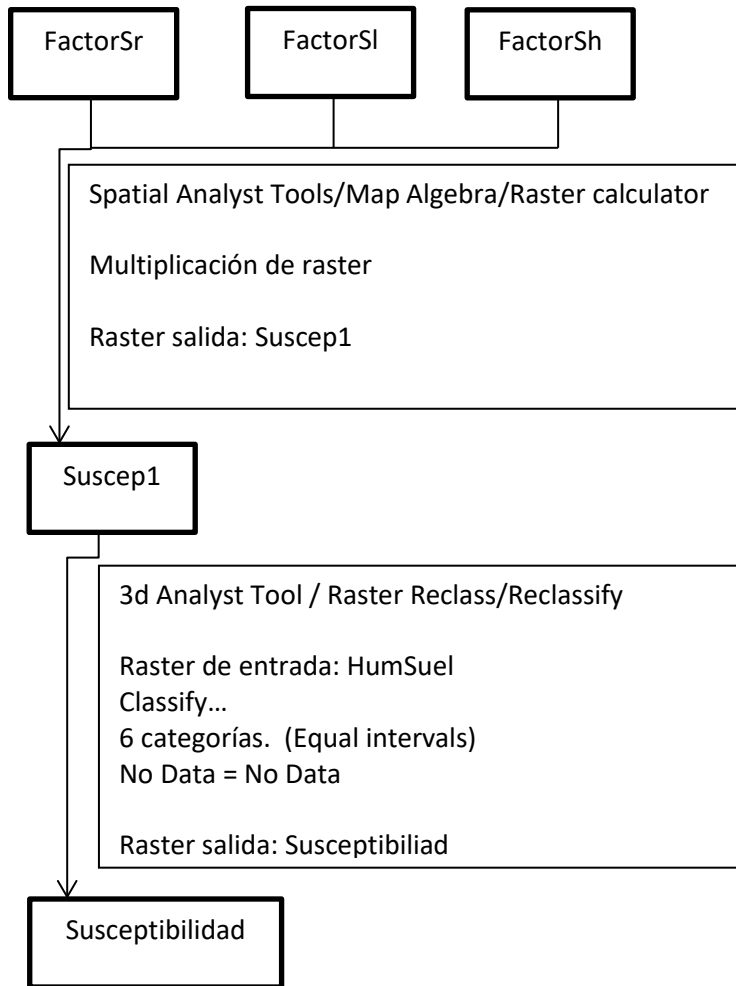
ANEXO 3.

MODELO CARTOGRÁFICO FACTOR HUMEDAD DEL SUELO



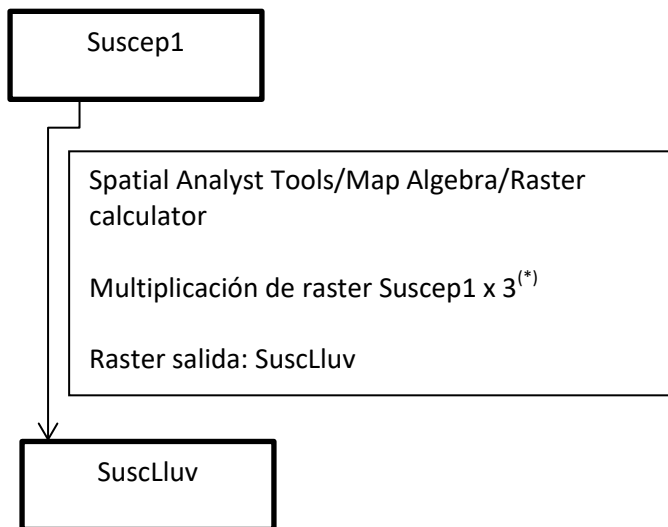
ANEXO 4.

MODELO CARTOGRÁFICO FACTORES DE SUSCEPTIBILIDAD



ANEXO 5.

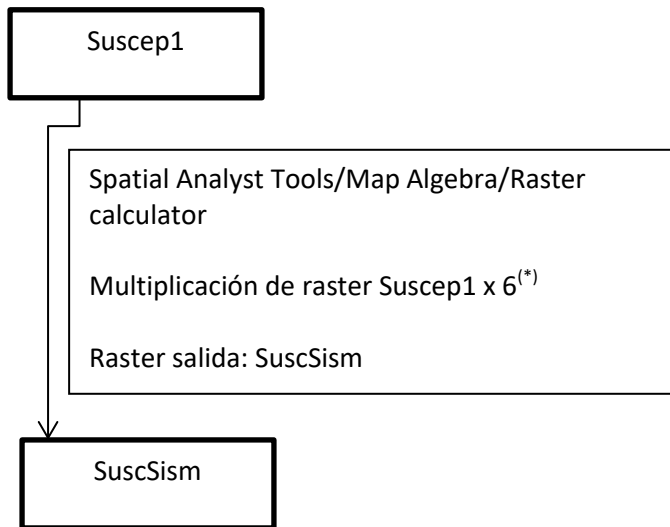
MODELO CARTOGRÁFICO SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR LLUVIAS MUY INTENSAS.



(*) Se multiplica por un factor 3 ya que el factor "Lluvias intensas" presenta un valor constante para toda la cuenca.

ANEXO 6.

MODELO CARTOGRÁFICO SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMOS.



(*) Se multiplica por un factor 6 ya que el factor "Sismos" presenta un valor constante para toda la cuenca.

ANEXO 7.

MODELO CARTOGRÁFICO ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.

