



**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL**

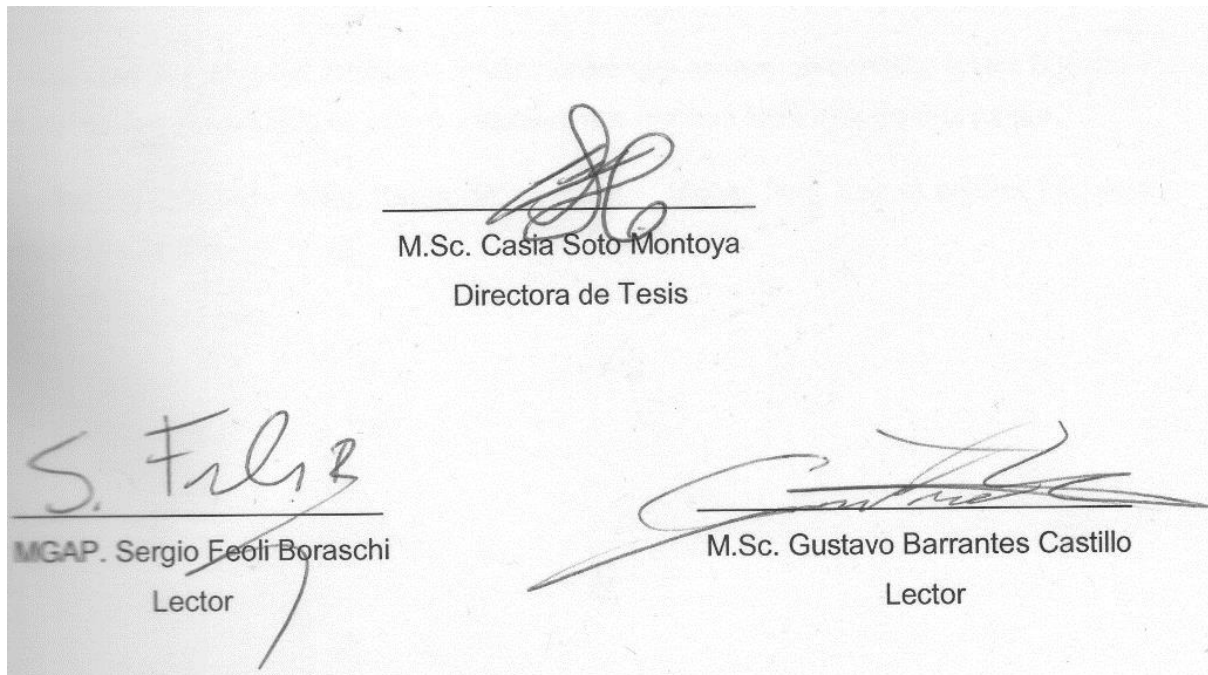
**MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO EN LAS
MICROCUENCAS DE LOS RÍOS TORRES Y TIBÁS, COSTA RICA**

NATALIA FALLAS CORDERO

CARTAGO, COSTA RICA
JUNIO, 2015

**MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO EN LAS MICROCUENCAS DE
LOS RÍOS TORRES Y TIBÁS, COSTA RICA**

Informe presentado a la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito para optar al título de Licenciatura en Ingeniería Forestal



DEDICATORIA

A mi madre quién ha sido mi inspiración a lo largo de mi vida y la que me ha enseñado a luchar por lo que uno anhela.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen que me dieron la fuerza y me guiaron para concluir este ciclo.

A mi padre, hermanos, abuelitos y toda mi familia que siempre me apoyaron y alentaron a seguir adelante.

A Casia Soto por sus consejos y correcciones en el desarrollo del trabajo.

A Sergio Feoli por todo su apoyo, paciencia y oportunidad para ejecutar el trabajo.

A Gustavo Barrantes por la confianza, guía y comentarios que me hizo en mejora de la calidad del trabajo.

A los profesores y administrativos de la escuela de Ingeniería Forestal que me hicieron crecer profesionalmente a través de toda la carrera.

A David que siempre estuvo a mi lado, apoyándome, dándome esa voz de aliento y brindándome su apoyo incondicional en todos estos años juntos.

A Ro y Lucy por ser esas amigas incondicionales que estuvieron conmigo en las buenas y las malas, me dieron todo su apoyo y aprendimos muchas lecciones de vida juntas.

A todos los chiquillos (Naty, Karen, Mora, Alonso, Víctor, Sofi, Marce) porque fuimos y somos una familia.

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
RESUMEN-----	1
ABSTRACT -----	2
INTRODUCCIÓN -----	3
OBJETIVOS -----	5
REVISIÓN DE LITERATURA-----	6
MATERIALES Y MÉTODOS-----	13
Ubicación del área de estudio-----	13
Análisis de datos-----	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	18
CONCLUSIONES -----	42
RECOMENDACIONES -----	45
REFERENCIAS -----	46
ANEXOS -----	51

TABLA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2014. -----	14
Figura 2. Litología en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	19
Figura 3. Litología en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	20
Figura 4. Humedad del suelo en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	21
Figura 5. Humedad del suelo en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	22
Figura 6. Nivel de pendiente en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	23
Figura 7. Nivel de pendiente en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	25
Figura 8. Nivel de intensidad sísmica en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	27
Figura 9. Nivel de intensidad sísmica en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	28
Figura 10. Nivel de intensidad de lluvias en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	29
Figura 11. Nivel de intensidad de lluvias en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	30
Figura 12. Nivel de susceptibilidad por elementos pasivos en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	31
Figura 13. Nivel de susceptibilidad por elementos pasivos en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	32
Figura 14. Nivel de susceptibilidad por elementos activos en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	33
Figura 15. Nivel de susceptibilidad por elementos activos en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	34
Figura 16. Susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	35

Figura 17. Susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	37
Figura 18. Uso del suelo en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.	38
Figura 19. Uso del suelo en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	40

TABLA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Clasificación del factor pendiente según los rangos obtenidos.-----	9
Cuadro 2. Clasificación del factor litológico valorando la susceptibilidad a la inestabilidad de las laderas. -----	9
Cuadro 3. Clasificación de los valores medios mensuales de las precipitaciones. -	11
Cuadro 4. Factor de humedad resultante de la clasificación de los valores acumulados de los índices promedio de precipitación mensual. -----	11
Cuadro 5. Determinación del factor de intensidad sísmica como desencadenante en la generación de deslizamientos de tierra, utilizando valores de intensidad de cien años (Escala Mercalli Modificada) basados en observaciones en Cosa Rica y América Central.-----	11
Cuadro 6. Factor de intensidad de precipitación T_p resultante de la clasificación de las precipitaciones máximas diarias durante un período de retorno de 100 años.--	12
Cuadro 7. Clasificación de los valores de los parámetros del peligro de deslizamiento HI, derivado de la ecuación 1. -----	12
Cuadro 8. Estaciones meteorológicas localizadas dentro y en los alrededores de las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2014. -----	15
Cuadro 9. Estaciones meteorológicas localizadas dentro y en los alrededores de las microcuencas de los ríos Torres y Tibás.-----	16
Cuadro 10. Porcentaje de área por clase de pendiente en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015. -----	24
Cuadro 11. Porcentaje de área por clase de pendiente en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	26
Cuadro 12. Área y porcentaje por clase de uso de suelo en la microcuencas de río Torres, San José - Cartago y río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015. -----	40

TABLA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Valores asignados por estación y mes para el cálculo de la humedad del suelo en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2015.	51
Anexo 2. Precipitación máxima diaria para diferentes períodos de retorno en años, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2015.	51
Anexo 3. Factor asignado por estación para un período de retorno de 100 años de la intensidad de lluvias en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2015.	52
Anexo 4. Confección del modelo del factor litológico en la microcuena de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 5. Confección del modelo del factor litológico en la microcuena de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 6. Confección del modelo del factor humedad del suelo en la microcuena de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 7. Confección del modelo del factor humedad del suelo en la microcuena de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 8. Confección del modelo del factor pendiente en la microcuena de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 9. Confección del modelo del factor pendiente en la microcuena de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 10. Confección del modelo del factor intensidad sísmica en la microcuena de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 11. Confección del modelo del factor intensidad sísmica en la microcuena de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 12. Confección del modelo del factor intensidad de lluvia en la microcuena de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 13. Confección del modelo del factor intensidad de lluvia en la microcuena de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 14. Confección del modelo del factor intrínseco en la microcuena de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	53

Anexo 15. Confección del modelo del factor intrínseco en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 16. Confección del modelo del factor desencadenante en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 17. Confección del modelo del factor desencadenante en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.....	53
Anexo 18. Confección del modelo de susceptibilidad al deslizamiento en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.	53
Anexo 19. Confección del modelo de susceptibilidad al deslizamiento en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.....	53

MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO EN LAS MICROCUENCAS DE LOS RÍOS TORRES Y TIBÁS, COSTA RICA

Natalia Fallas-Cordero

RESUMEN

Costa Rica es un territorio muy montañoso, con fallamientos, fuertes pendientes y condiciones climáticas que propician la generación de deslizamientos, que pueden agravarse por variables desencadenantes. El Valle Central presenta históricamente alta susceptibilidad a deslizamientos. Para la prevención de un desastre, es necesario implementar modelos que identifiquen las áreas propensas a movimientos de tierra. En el desarrollo de este trabajo se utilizó el método Vahrson y Mora, por su facilidad de uso y gran implementación a nivel de América. El objetivo de este estudio fue elaborar los mapas de susceptibilidad al deslizamiento en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás. La microcuenca del río Torres se ubica en la provincia de San José y aproximadamente posee 4952 ha y la microcuenca del río Tibás comprende alrededor de 4640 ha y se ubica en la provincia de Heredia. Para la elaboración de los mapas se obtuvieron datos de los elementos pasivos de pendiente, litología y humedad del suelo, además de los elementos activos de intensidad sísmica e intensidad de lluvias. Para cada factor se definió un índice de influencia y se obtuvieron mapas de susceptibilidad, se sumaron los factores activos y se multiplicaron los factores pasivos, luego los mapas resultantes de los factores pasivos se multiplicaron con los resultantes de los factores activos para obtener el mapa de susceptibilidad para cada microcuenca. En la microcuenca del río Torres la mayor área correspondió a susceptibilidad media (52,48% del área) y tan solo un 1,34% presentó susceptibilidad alta a sufrir un deslizamiento. En la microcuenca del río Tibás la categoría media con respecto a la susceptibilidad representó un 52,09% del área y un 9,52% del área correspondió a susceptibilidad alta. Finalmente, se comparó el uso del suelo con las áreas susceptibles a deslizamientos para identificar las clases de usos de suelo más propensas a sufrir deslizamientos siendo estas las clases de bosques secundarios y bosque primario en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás respectivamente. Es necesario optar por medidas de regulación para la construcción de infraestructura e incremento urbanístico y protección de los recursos naturales en las zonas más propensas a presentar remociones de masa.

Palabras claves: deslizamiento, susceptibilidad, microcuenca, Costa Rica.

MAPS OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN THE MICRO-BASIN OF RIVERS TORRES AND TIBAS, COSTA RICA

Natalia Fallas-Cordero

ABSTRACT

Costa Rica is a very mountainous territory, with faulting, steep slopes and climatic conditions, which promotes landslides generation that can be aggravated with trigger variables. Historically, Central valley has high susceptibility to landslides. To prevent a disaster is necessary to implement models that identify areas prone to earth movements. The Vahrson and Mora method was used during this study development, due to its ease of use and high implementation in America. This study aimed to develop maps of landslides susceptibility in the micro-basin of rivers Torres and Tibas. Torres River micro-basin is located in the province of San José and has 4952 ha approximately and the micro-basin of Tibás River covers about 4640 ha and is located in Heredia. To elaborate maps, data from passive slope elements, lithology and soil moisture were obtained, including active elements of seismic intensity and rain intensity. An influence index was defined for each factor and susceptibility maps were generated; active factors were added and multiplied by passive factors. Then, the resulting maps of the passive factors were multiplied with the resulting maps from the active factors to obtain the susceptibility map for each micro-basin. In the Torres River micro-basin the greatest area corresponded to average susceptibility (52,48% area) and only 1,34% had high susceptibility to suffer landslide. In the Tibás River micro-basin the average category regarding susceptibility represented a 52,09% area and 9,52% corresponded to high susceptibility area. Finally, land use was compared to landslide susceptible areas to identify land uses categories that were more likely to suffer landslides, being the categories of secondary forest and primary forest in the micro-basin of rivers Torres and Tibás respectability. Choosing regulatory measures is necessary in infrastructure construction and urban growth and natural resources protection in areas most likely to have mass removals.

Keywords: landslide, susceptibility, micro-basin, Costa Rica

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica aproximadamente el 60% del territorio es montañoso, con presencia de abundantes fracturas por fallamiento local intenso, rocas blandas o inclinación de rocas a favor de la pendiente, estas condiciones naturales favorecen y propician la posibilidad de generar deslizamientos (Vallejos, Esquivel y Hidalgo, 2012).

Los deslizamientos son remociones en masa de grandes dimensiones de suelos y rocas, provocados por la acción de la gravedad, presión del agua en poros y fisuras que conllevan una desestabilización del suelo, los cuales provocan ruptura, agrietamiento del suelo y erosión intensa (Mora, Alvarado y Morales, 1992). Según R. Mora y S. Mora (1994) los deslizamientos pueden ser agrupados bajo la denominación de fenómenos de inestabilidad de laderas.

Vahrson, Cartín y Patterson (1992) identifican la intensidad de lluvias, pendientes, humedad del suelo y geomorfología como variables relacionadas directamente con la ocurrencia de deslizamientos. Según Barrantes G., Barrantes O. y Núñez (2011) las fuertes pendientes son un factor con alto peso en los deslizamientos. La actividad sísmica también se considera como un factor que desencadena este evento (Mulas, 2010). Además la densidad de población e infraestructura ayudan al aumento de la susceptibilidad del fenómeno, provocado por la falta de regulaciones efectivas de ordenamiento territorial (Arroyo, Salgado y Moraga, 2011).

El Valle Central es una zona de alta susceptibilidad a deslizamientos, según Arroyo, Salgado y Moraga (2011), San José es la provincia que presentó mayor cantidad de reportes de deslizamientos en la década comprendida entre los años 1999 al 2009, seguida por Cartago y Alajuela. Según Mora y Morales (1992) los deslizamientos son uno de los efectos más notables posterior a la actividad sísmica afectando carreteras, cultivos, infraestructura y ríos.

En los últimos años la ocurrencia de movimientos de remoción en masa situados en microcuencas ha ido en aumento, una de las metodologías utilizadas es el modelo de Mora y Vahrson (1994) el cual se emplea para la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos. Este modelo ha sido utilizado ampliamente en América, tal es el caso de estudios realizados en Guatemala (Barillas, 2004), El Salvador (IPGARAMS, 2008), Colombia (Rodríguez et al, 2013) y Costa Rica (Barrantes G., Barrantes O. y Núñez, 2011).

En el presente trabajo se realizaron los mapas de susceptibilidad al deslizamiento en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás a través de la aplicación de la metodología de Mora y Vharson.

OBJETIVOS

Objetivo general

Elaborar los mapas de susceptibilidad al deslizamiento en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás.

Objetivos específicos

Describir los factores pasivos y activos que influyen en la inestabilidad de las laderas en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás.

Identificar los sitios susceptibles a deslizamiento en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás.

REVISIÓN DE LITERATURA

Cuenca hidrográfica

Originalmente se consideraba que una cuenca hidrográfica era una porción de territorio que fluye hacia un único sistema de drenaje natural. Actualmente el concepto es más amplio, se continúa considerando que la cuenca hidrográfica es un territorio delimitado por la propia naturaleza y se ha establecido que además es un espacio social producido por el conjunto de relaciones e interacciones sociales de apropiación y uso de los recursos que ella contiene (FAO, 2007).

Ramakrishna (1997) define cuenca hidrográfica como el área natural en la que se forma un curso principal de agua proveniente de la precipitación. Está conformada por el conjunto de flujos de agua definidos por el relieve y se definen naturalmente. La cuenca la conforman componentes biofísicos, biológicos que están interrelacionados y en equilibrio entre sí, por lo tanto si se afecta uno de ellos se pone en peligro todo el sistema.

Una cuenca puede presentar varias partes, si se utiliza el criterio de altitud se distingue la parte alta, media y baja en función de los rangos de altura que tenga la cuenca. Si se aplica el criterio de topografía la cuenca se divide en tierras planas, tierras onduladas y laderas. Las cuencas también pueden dividirse en subcuencas y microcuencas. La subcuenca hace referencia cuando al cauce principal llega un afluente secundario y la microcuenca representa la agrupación de pequeñas áreas de una subcuenca o parte de ella.

Sánchez (2003) menciona que la cuenca hidrográfica representa el territorio que es delimitado por la propia naturaleza, esencialmente por los límites de las zonas de escurrimiento de las aguas superficiales que convergen hacia un mismo cauce. La cuenca, sus recursos naturales y sus habitantes poseen condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que le confieren características que son particulares de cada una. Las cuencas se conciben como sistemas biológicos, físicos y antropogénicos que interaccionan entre sí creando un conjunto único, inseparable y en permanente cambio.

Susceptibilidad a deslizamientos

La susceptibilidad es la facilidad o propensión de determinadas zonas a generar movimientos en masa o a ser impactadas, en este concepto no se tienen en cuenta la frecuencia ni la magnitud del evento (IPGARAMS, 2008).

La susceptibilidad a deslizamientos es la predisposición del terreno a sufrir un deslizamiento en función de sus condiciones topográficas, geológicas y humedad del suelo (Mora y Vahrson, 1994). No obstante, este concepto no determina la probabilidad de ocurrencia en términos de tiempo, lugar y magnitud (Vargas, 2002).

Desastres naturales

Romero y Maskrey (1983) definen los desastres naturales como la correlación entre los fenómenos naturales peligrosos (huracanes, terremotos, maremotos, entre otros) y determinadas condiciones socioeconómicas y físicas vulnerables (como situación económica precaria, viviendas mal construidas, suelos inestables), es decir que existe un alto riesgo de desastre si uno o más fenómenos naturales ocurren en sitios vulnerables.

Un desastre representa una ruptura ecológica importante entre la relación de los seres humanos y el medio ambiente, puede ser súbito o lento (Noji, 2000). Según E. Vega y M. Vega (2005) entre más humanos y actividades hallan en el sitio y más vulnerables sean más efectos habrá.

Deslizamiento

Los deslizamientos son movimientos gravitacionales de masas de roca o suelo que deslizan sobre una o varias superficies de rotura al superarse la resistencia al corte. La velocidad de los deslizamientos puede ser muy variable, pero en general son procesos rápidos que pueden alcanzar inmensas proporciones y resultar devastadores (Ferrer, 1988).

Alcántara (2000) define los deslizamientos como movimientos de ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. Con frecuencia, la formación de grietas transversales es la primera señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos.

Los mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera tienen la finalidad de prevenir riesgos y asegurar el adecuado uso del territorio, en la obtención de estos mapas se conjugan factores que controlan los movimientos del terreno, para su elaboración existen diferentes métodos: evaluación directa, métodos probabilísticos y métodos deterministas (González et al, 2002). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten hacer superposición de mapas con factores pasivos y activos, construir índices (Barrantes, Barrantes y Núñez, 2011); los modelos cartográficos permiten definir de manera clara y repetible el proceso. El método Vharson y Mora utiliza SIG y modelos cartográficos, ha sido muy utilizado y validado en América (Nicaragua, Guatemala, Colombia, Costa Rica), por lo tanto este modelo se adaptó a la información que se tenía y al área de estudio en que se desarrolló este trabajo.

Modelo Vahrson – Mora

Vahrson y Mora (1994), describen este modelo como un sistema diseñado para permitir la clasificación de los riesgos de deslizamientos en zonas tropicales sísmicamente activas.

El modelo recibe como entrada cinco factores, los cuales se dividen en dos grupos: susceptibilidad por elementos pasivos (pendiente, litología, humedad del suelo) y susceptibilidad por elementos activos (intensidad sísmica e intensidad de lluvias).

Para cada factor, se define un índice de influencia para un determinado sitio y con él, al combinarse de acuerdo a un peso específico ponderado se obtiene un nivel relativo de riesgo (H), a través de la multiplicación y suma de los índices por medio de las siguientes ecuaciones.

$$H = (Sr * Sl * Sh) * (Ts + Tp) \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

Pendiente (Sr): representa la topografía del área en estudio. El método de Mora y Vahrson (1994), originalmente utilizó datos de relieve relativo, sin embargo Salazar (2007) posteriormente realizó una variación y cambia esta variable por pendientes y utiliza los rangos propuestos por Van Zuidam (1986), pues actualmente con los SIG es más fácil la obtención de estos datos. El cuadro 1 muestra la clasificación general de la pendiente.

Cuadro 1. Clasificación del factor pendiente según los rangos obtenidos.

Rangos de pendientes (grados)	Peso asignado (Sr)	Procesos y condiciones característicos del terreno	Colores sugeridos
0 – 2	1	Plano o casi completamente	Medio verde oscuro
2 – 4	2	Inclinación suave	Verde ligero
4 – 8	3	Pendientes inclinadas	Amarillo ligero
8 – 16	4	Modelo escarpado	Amarillo anaranjado
16 – 35	5	Escarpado	Rojo claro
35 – 55	6	Muy escarpado	Rojo oscuro a medio
> 55	7	Extremadamente escarpado	Púrpura oscura

Fuente: Van Zuidam (1986)

Litología (SI): este factor representa la influencia de los tipos de suelos y rocas en la activación de los deslizamientos. El cuadro 2 muestra una clasificación general de diferentes litologías y el peso asignado.

Cuadro 2. Clasificación del factor litológico valorando la susceptibilidad a la inestabilidad de las laderas.

Litología	Clasificación	Factor (SI)
Aluviones: gruesos, permeable, compacto, con nivel freático bajo. Calizas: duras, permeables. Intrusivos: poco fisurados, bajo nivel freático. Basaltos, andesita, ignimbritas y similares: sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas: sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.	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	Moderado	2

freático o profundidades intermedias.

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.	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.	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.	Muy alto	5

Fuente: Vharson y Mora (1994)

Humedad del suelo (Sh): cuantifica la influencia de la humedad acumulada durante todo el año y puede ser considerada como un punto de partida ya que las fuertes lluvias pueden actuar como un elemento desestabilizador. Se aplicó una metodología simple de un balance de agua del suelo, la cual requiere solo los valores promedios mensuales. En la clasificación de los valores medios mensuales se utilizó un valor límite de 125 mm, este porque es representativo de la evapotranspiración potencial media mensual en Centroamérica. Además se demostró que la infiltración significativa requiere al menos 40 mm de lluvia acumulada en diez días, lo que corresponde a aproximadamente 125 mm/mes (Vharson y Mora, 1994). Se ejecutaron los siguientes pasos:

A cada valor de la precipitación media mensual se asignó un valor de índice, como se muestra en el cuadro 3. Al evaluar cada mes, se obtuvieron 12 valores mensuales los cuales fueron calculados para cada estación pluviométrica analizada. Estos valores se agruparon en cinco clases de 0 a 24 (cuadro 4). Para obtener la capa del total del área se realizaron interpolaciones con el método Kriging semivariograma exponencial.

Cuadro 3. Clasificación de los valores medios mensuales de las precipitaciones.

Precipitación media mensual (mm/mes)	Valor asignado
< 125	0
125 – 250	1
> 250	2

Fuente: Vharson y Mora (1994)

Cuadro 4. Factor de humedad resultante de la clasificación de los valores acumulados de los índices promedio de precipitación mensual.

Valor acumulado de los índices de precipitación	Calificación	Factor Sh
0 – 4	Muy bajo	1
5 – 9	Bajo	2
10 – 14	Medio	3
15 – 19	Alto	4
20 – 24	Muy alto	5

Fuente: Vharson y Mora (1994)

Intensidad sísmica (Ts): este factor se determinó mediante el análisis de los deslizamientos de tierra provocados por terremotos para establecer la influencia de intensidades sísmicas. En el cuadro 5, se muestran los datos de las categorías de influencia utilizando los valores de períodos de retorno de 100 años en relación con los registros históricos.

Cuadro 5. Determinación del factor de intensidad sísmica como desencadenante en la generación de deslizamientos de tierra, utilizando valores de intensidad de cien años (Escala Mercalli Modificada) basados en observaciones en Cosa Rica y América Central.

Intensidades (MM) Tr = 100 años	Calificación	Factor Ts
LII	Leve	1
IV	Muy bajo	2
V	Bajo	3
VI	Moderado	4
VII	Medio	5
VIII	Considerable	6
IX	Importante	7
X	Fuerte	8
XI	Muy fuerte	9
XII	Extremadamente fuerte	10

Fuente: Vharson y Mora (1994)

Intensidad de lluvias (Tp): este factor calculó la influencia de la lluvia en el tiempo, es uno de los factores desencadenantes que influyen en la presencia de los deslizamientos. En el cuadro 6 se muestra la clasificación de las precipitaciones máximas diarias para un período de retorno de 100 años.

Cuadro 6. Factor de intensidad de precipitación Tp resultante de la clasificación de las precipitaciones máximas diarias durante un período de retorno de 100 años.

Precipitación máxima n>10 años, Tr = 100 años	Precipitación media n<10 años	Clasificación	Factor Tp
< 100 mm	< 50 mm	Muy bajo	1
101 – 200 mm	51 – 90 mm	Bajo	2
201 – 300 mm	91 – 130 mm	Medio	3
301 – 400 mm	131 – 175 mm	Alto	4
> 400 mm	> 175 mm	Muy alto	5

Fuente: Vharson y Mora (1994)

En el cuadro seis, la columna dos representa una clasificación auxiliar que se basa en los valores medios anuales máximos (duración un día), aplicable sólo en casos de pluviómetros con registros cortos.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la combinación de todos los parámetros antes mencionados a través de la ecuación 1, el valor del indicador del peligro del deslizamiento (HI) puede ser clasificado y evaluado para cada sitio en particular como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7. Clasificación de los valores de los parámetros del peligro de deslizamiento HI, derivado de la ecuación 1.

Valor de la ecuación (HI)	Clase	Clasificación del peligro de deslizamiento
< 6	I	Muy bajo
7 – 32	II	Bajo
33 – 162	III	Moderado
163 – 512	IV	Medio
513 – 1250	V	Alto
> 1250	VI	Muy alto

Fuente: Vharson y Mora (1994)

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

El estudio se desarrolló en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás. En la figura 1 se muestra la ubicación de las microcuencas utilizadas en este estudio.

Microcuenca Río Torres

La microcuenca del río Torres abarca los cantones de San José, Montes de Oca, Goicoechea y Tibás en la provincia de San José y el cantón de La Unión en la provincia de Cartago. Se localiza en las coordenadas extremas 9°58'29" N y 84°10'27" O (al norte) y 9°55'43" N y 84°10'10" O (al sur) del sistema de coordenadas WGS84. Esta microcuenca posee aproximadamente 4952,72 ha. Según la clasificación de las zonas de vida de Holdridge (1967), esta región corresponde a bosque húmedo premontano, bosque muy húmedo premontano y bosque muy húmedo montano bajo.

Microcuenca Río Tibás

La microcuenca correspondiente al río Tibás comprende alrededor de 4640,22 ha y abarca los cantones de San Rafael, San Isidro y Santo Domingo en la provincia de Heredia. Se localiza en las coordenadas extremas 10°4'60" N y 84°5'56" O (al norte) y 9°58'4" N y 84°5'48" O (al sur) del sistema de coordenadas WGS84. Según Holdridge (1967), este sitio contempla las zonas de vida bosque pluvial montano bajo, bosque muy húmedo montano bajo, bosque muy húmedo premontano y bosque húmedo premontano.

Descripción del área de estudio

En ambas microcuencas la precipitación oscila entre los 2000 y 8000 mm anuales, la temperatura ronda entre los 12 y los 24 °C y los suelos corresponden a Inceptisoles y Ultisoles (ITCR, 2014).

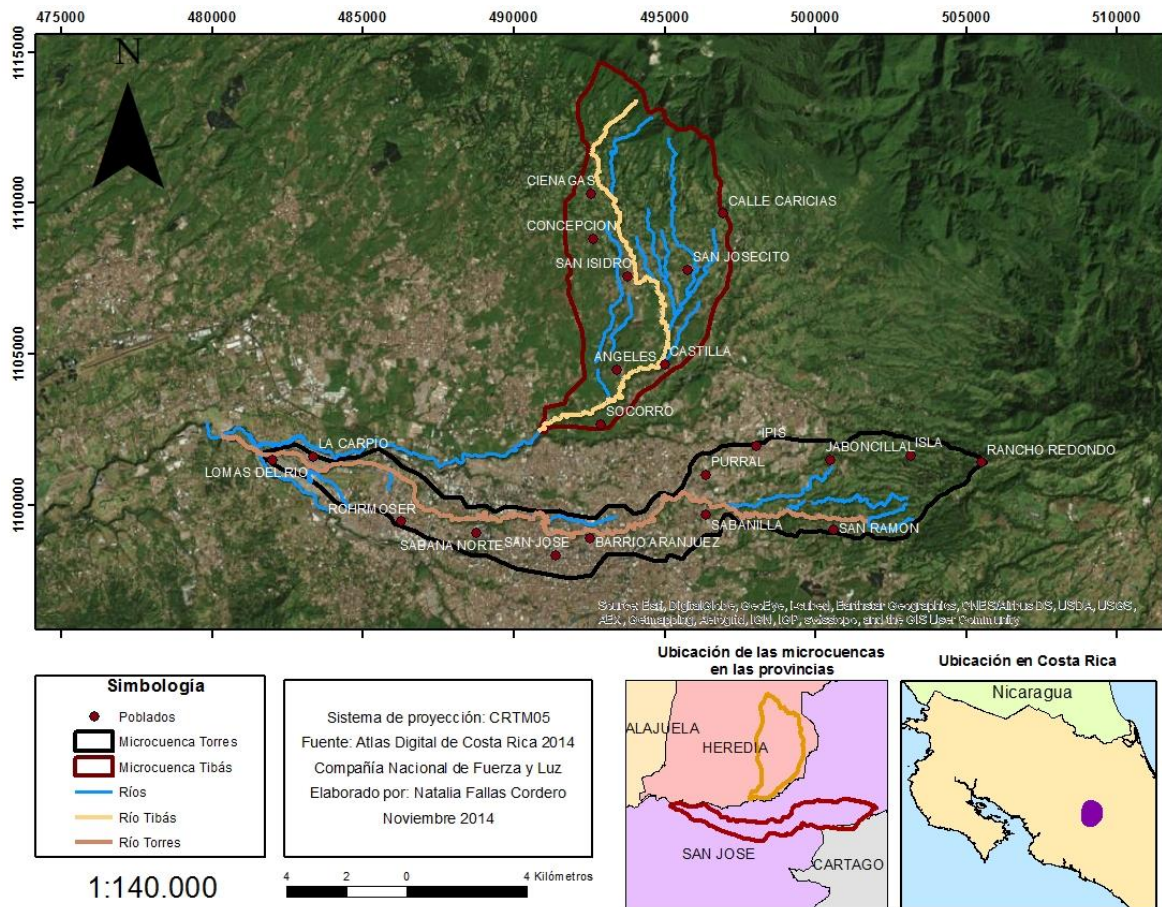


Figura 1. Ubicación de las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2014.

Análisis de datos

En la elaboración de los mapas de susceptibilidad al deslizamiento se utilizó el modelo de Vahrson y Mora (1994) a través del software ArcGis 10.2.

La capa en formato shape de litología fue proporcionada por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) a una escala de 1: 25 000. La clasificación de la litología fue realizada por el Ingeniero Sergio Feoli Boraschi, con base en las características que se describen en el cuadro 2. La realización del mapa de litología para la microcuenca del río Tibás se detalla en el anexo 4 y para Torres el anexo 5.

El mapa de pendientes se elaboró empleando curvas de nivel obtenidas del Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (PRUGAM) del año 2007. Posteriormente se construyó un modelo de elevación digital con un tamaño de celda de

10 x 10 m con el cual se obtuvo el valor de las pendientes en grados, se clasificó de acuerdo a los valores del cuadro 1. En el anexo 6 y 7 se describe el procedimiento para la realización de los mapas de pendientes para las microcuencas de los ríos Tibás y Torres respectivamente.

Para obtener los valores de humedad del suelo se utilizaron datos de precipitación (mm/mes) de ocho estaciones meteorológicas ubicadas dentro o en las proximidades de las microcuencas en estudio (Cuadro 8). La información fue brindada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) con registros de 10 años, los cuales abarcan el período del 2004 al 2013. Los registros no estaban completos, por lo tanto se utilizó el método de Razón-Normal para completar los datos faltantes en las ocho estaciones. Posteriormente, ya con los promedios mensuales completos se procedió a asignar los valores de acuerdo a los cuadros 3 y 4 (Anexo 1). Luego con el factor de humedad obtenido se elaboró un mapa de superficie mediante una interpolación por el método de Kriging semivariograma exponencial. Los anexos 8 y 9 muestran el procedimiento para la obtención de estos mapas.

Cuadro 8. Estaciones meteorológicas localizadas dentro y en los alrededores de las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2014.

N° Estación	Nombre	Registro (años)
69600	Cerro Zurquí	2004 – 2013
84096	Sabana Norte	2004 – 2013
84114	San Ramón de Tres Ríos	2004 – 2013
84118	Barva	2004 – 2013
84120	Cerro Escazú	2004 – 2013
84122	San Luis de Santo Domingo	2004 – 2013
84124	San Pedro de Coronado	2004 – 2013
84130	Colima	2004 – 2013

Fuente: ICE, 2014

Con los factores obtenidos de las variables de pendiente, litología y humedad del suelo, se realizó la multiplicación donde se obtuvo la susceptibilidad por elementos pasivos. El

procedimiento para la obtención de este mapa se muestra en los anexos 10 y 11, para las microcuencas de los ríos Tibás y Torres respectivamente.

El mapa correspondiente a la variable de intensidad sísmica máxima, se basó en el mapa de Sismicidad y Neotectónica del Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana, Costa Rica, con la escala de intensidad Mercalli Modificada (Denyer y Kussmaul, 1994). Posteriormente, se realizó la categorización según el cuadro 5 para obtener el factor de intensidad. Los anexos 12 y 13 presentan los procedimientos para la confección de los mapas de intensidad sísmica máxima para las dos microcuencas.

En el cálculo de la intensidad de lluvias se utilizaron valores máximos diarios anuales de precipitación de seis estaciones del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y ocho estaciones del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) (cuadro 9). Por medio del método de Gumbel se obtuvo la precipitación máxima para los períodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años (Anexo 2), se realizó la clasificación para un período de retorno de 100 años de acuerdo al cuadro 6, del cual se obtuvo el factor de intensidad de lluvias para cada estación (Anexo 3), luego se interpolaron los datos por el método de Kriging semivariograma exponencial para obtener el área de influencia de cada factor en ambas microcuencas. En los anexos 14 y 15 se muestra el procedimiento para la obtención de los mapas de intensidad de lluvias para las microcuencas de los ríos Tibás y Torres respectivamente.

Cuadro 9. Estaciones meteorológicas localizadas dentro y en los alrededores de las microcuencas de los ríos Torres y Tibás.

	N° Estación	Nombre	Registro (años)
IMN	84005	Avance Tres Ríos	1969 – 2008
	84006	Hacienda Concepción	1969 – 2008
	84019	Hacienda La Laguna	1969 - 2008, menos 1989
	84022	Desamparados	1965 – 2000
	84139	Cigefi	1999 – 2014
	84141	San José	1995 – 2014
ICE	69600	Cerro Zurquí	1989 – 2014
	84096	Sabana Norte	1974 - 2014, menos 1986
	84114	San Ramón de Tres Ríos	1981 - 2014, menos 1983, 1984, 1991 - 1997, 2000
	84118	Barva	1991 – 2014
	84120	Cerro Escazú	1991 – 2013, menos 1999, 2012
	84122	San Luis de Santo Domingo	1991 – 2014
	84124	San Pedro de Coronado	1991 – 2014, menos 1989, 1999

Los factores obtenidos de las variables intensidad sísmica e intensidad de lluvias se sumaron y se obtuvo la susceptibilidad por elementos activos. El procedimiento para la obtención de estos mapas se describe en los anexos 16 y 17.

Finalmente, se multiplicaron las variables de susceptibilidad por elementos pasivos con las variables de susceptibilidad por elementos activos y se elaboró el mapa de susceptibilidad a deslizamientos en las microcuencas de los ríos Tibás y Torres. En los anexos 18 y 19 se presenta el procedimiento para la obtención de los mapas.

Además, se utilizaron los mapas de uso de suelo elaborados por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz en el 2012 para realizar una comparación entre estos y los mapas finales de susceptibilidad al deslizamiento, esto con el fin de identificar las clases de uso de suelo más propensas a sufrir remociones de masa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Litología

En el área de estudio dominó el factor litológico alto que representó un 98,10 % del área total, seguido por el factor litológico bajo con un 1,90% y por último un 0,01 % correspondiente al factor medio (figura 2). Según Mora y Vahrson (1994), el factor bajo presenta menor grado de meteorización; el medio, considerable resistencia sedimentaria y fracturación; y el factor alto presenta mayor grado de meteorización y fuertes fracturas en las rocas. Los depósitos son abundantes y sumamente heterogéneos con fragmentos volcánicos en la zona del río Torres, según Hidalgo et al (2004). Estos materiales se originaron por fracturas que permitieron la erupción de lava, que luego dieron paso a depósitos de lahares y cenizas (Denyer et al, 1994). Es común que la inestabilidad de las laderas sea determinada por anomalías en la litología que son difíciles de detectar, además cada formación geológica posee una susceptibilidad específica al deslizamiento (Suárez, 1998).

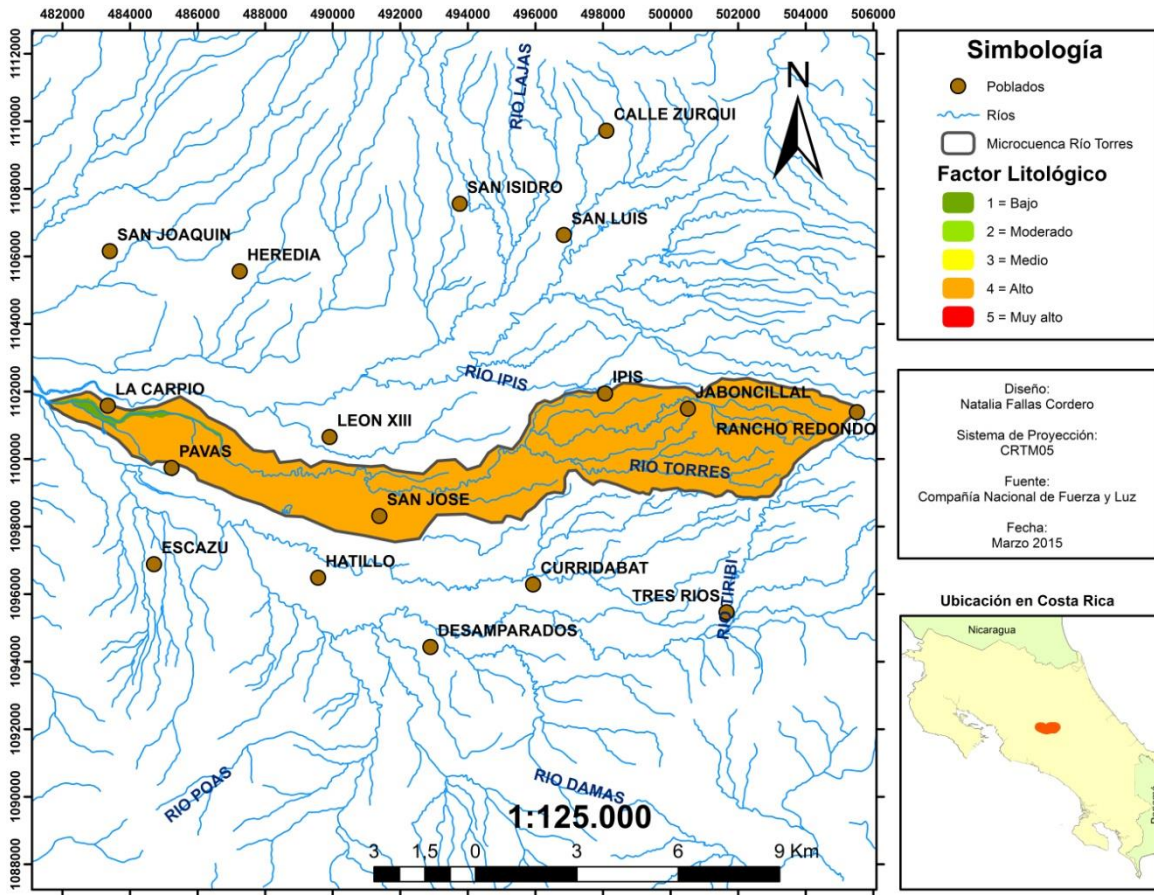


Figura 2. Litología en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

En la microcuenca del río Tibás (figura 3) predominó el factor litológico medio con un 66,28%, seguido del factor litológico bajo con 17,33% y en menor porcentaje el factor litológico alto con 16,39%. En esta área de estudio hacia la zona oriental, el suelo es profundo y se observan depósitos laháricos, mientras que en la parte occidental los suelos son delgados y en algunos casos son sustituidos por pequeñas coladas de lava en bloques (Herrera y Hernández, 1993).

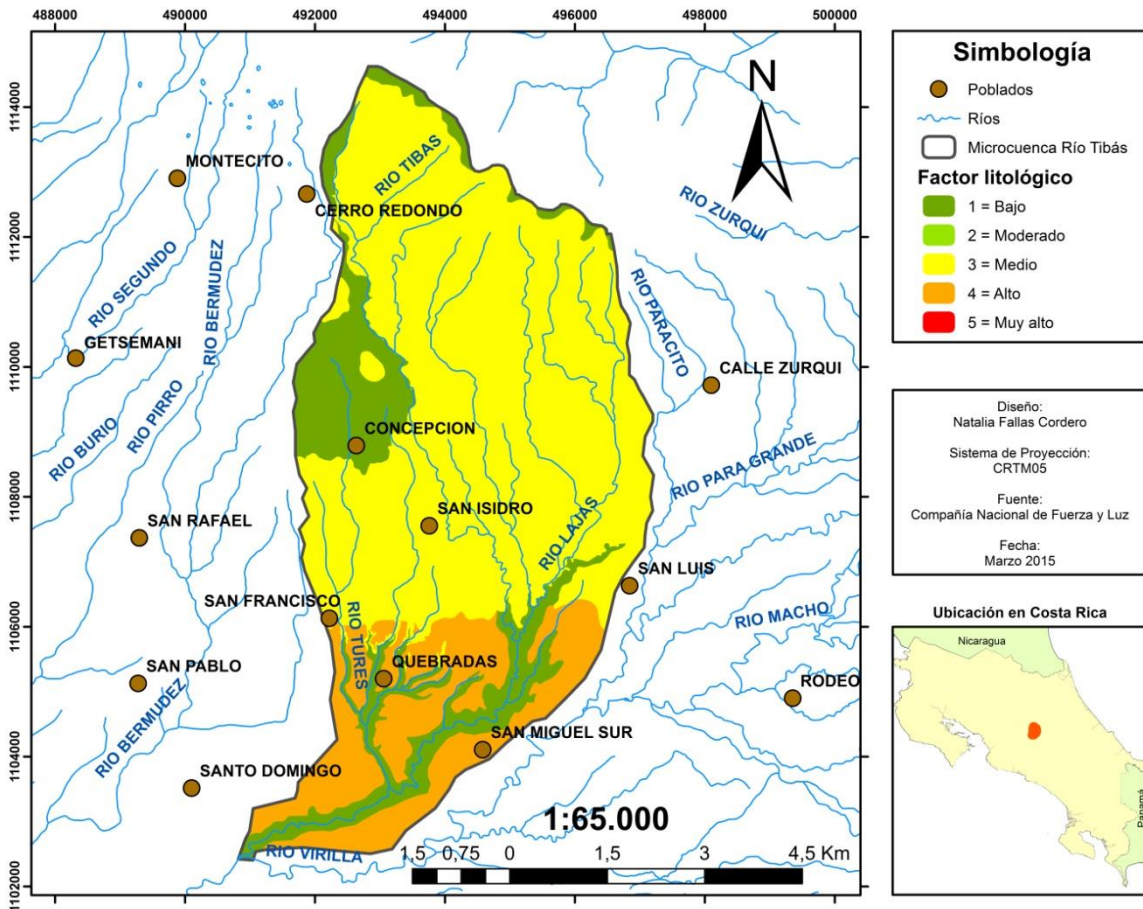


Figura 3. Litología en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Humedad del suelo

La humedad del suelo en la microcuenca del río Torres estuvo representada mayormente por un 96,93% de factor medio con respecto a su área total y un 3,07% de factor alto (figura 4). Las estaciones meteorológicas utilizadas en este sitio mostraron que en el área de factor medio la precipitación media anual oscila entre 1715,13 a 2216,37 mm, por otro lado el área con valor alto va de 2754,69 a 2875,34 mm (ICE, 2014) y es más susceptible a movimientos de tierra. La precipitación tiene una influencia directa en la infiltración y en el régimen de agua subterránea, que afecta la estabilidad de laderas (Suárez, 1998). Según Mora y Vahrson (1994), para la ruptura de suelos secos es necesaria mayor cantidad de precipitaciones.

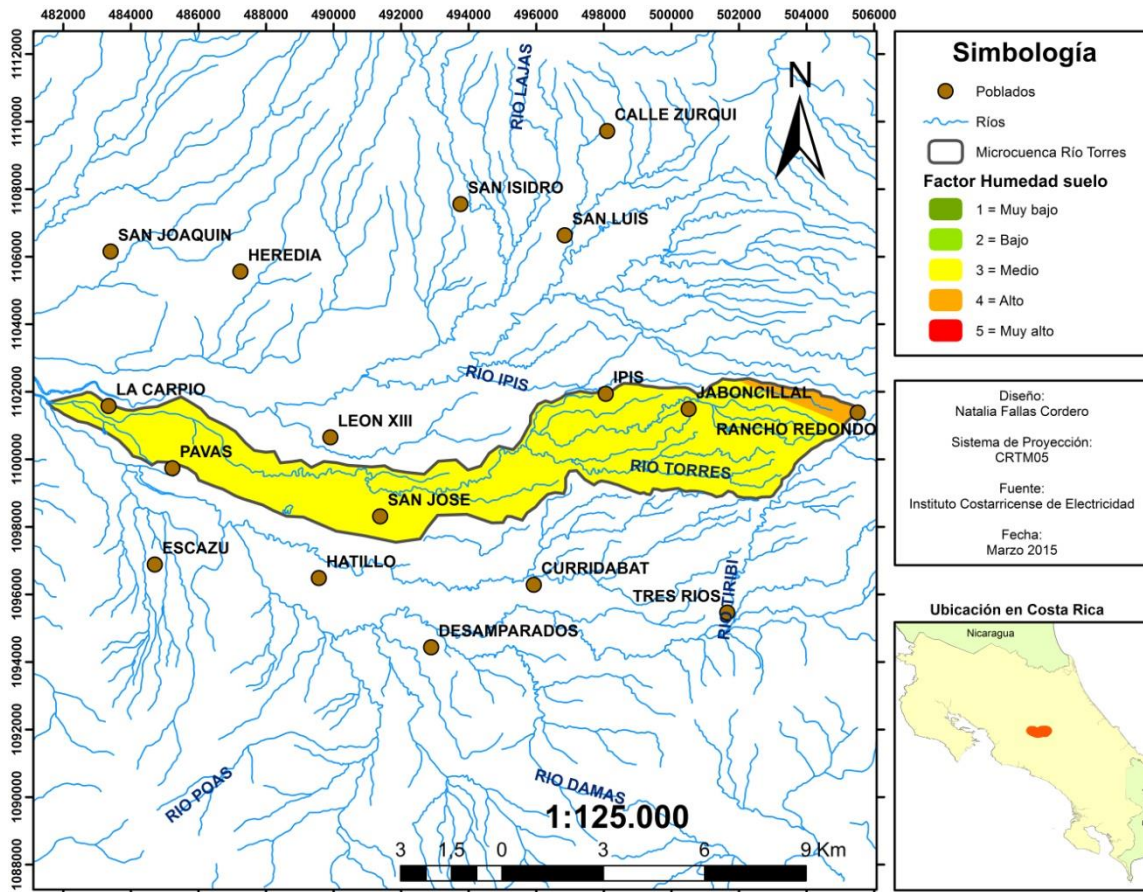


Figura 4. Humedad del suelo en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

En la microcuenca del río Tibás se observaron los valores medio, alto y muy alto de humedad del suelo con áreas de 48,62%, 40,65% y 10,73% respectivamente (figura 5). En la parte alta de la microcuenca la humedad del suelo tomó el valor de muy alto y se encuentra sobre los cantones de San Rafael y San Isidro de Heredia. La estación meteorológica que se encontró en el sitio con factor muy alto, presentó una precipitación media anual de 6978,90 mm (ICE, 2014). Herrera y Hernández (1993) mencionan que esta zona alta, presenta bosques que albergan gran diversidad de vegetación y forma parte del territorio meridional del Parque Nacional Braulio Carrillo, siendo una cobertura boscosa fundamental en el ciclo hidrológico de la cuenca, pues intercepta la humedad producto de nieblas orográficas que la convierte en una zona altamente húmeda.

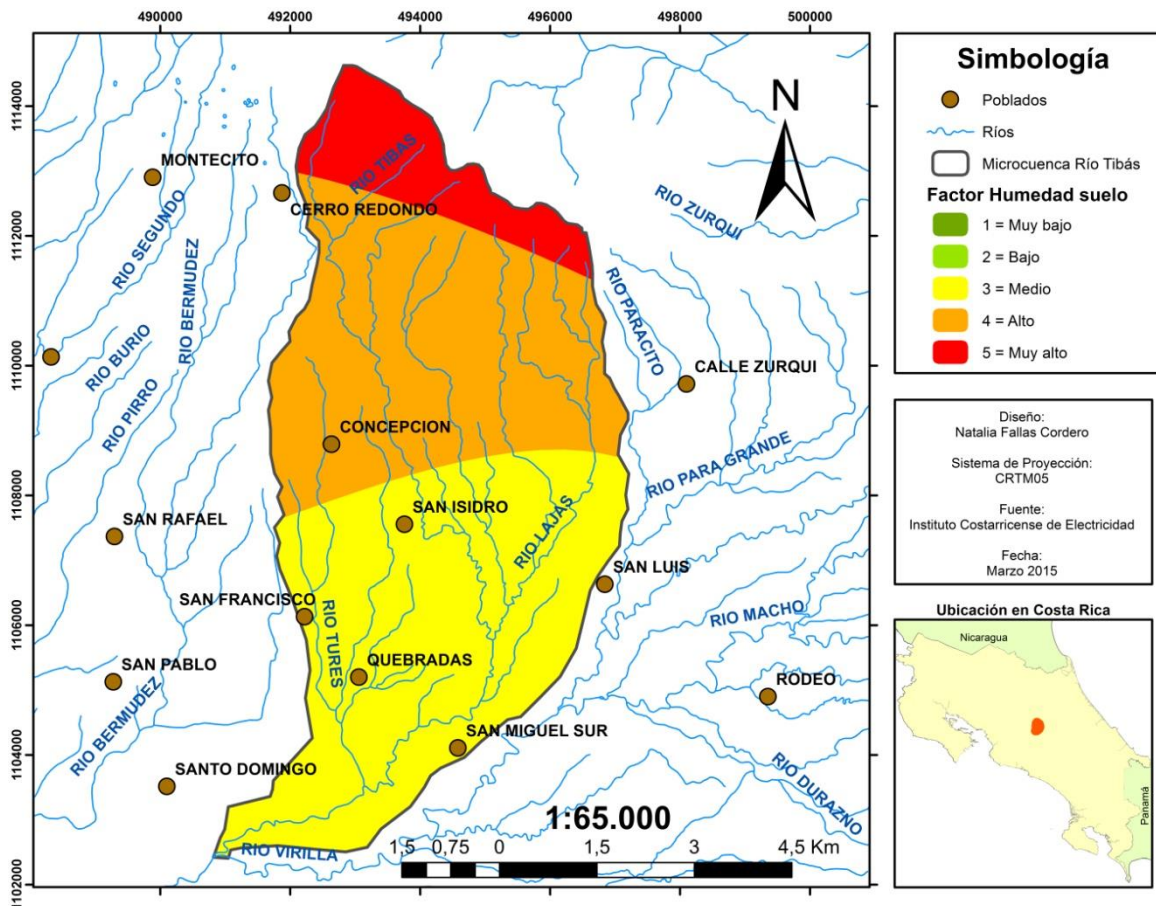


Figura 5. Humedad del suelo en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Pendiente

La pendiente en la microcuenca del río Torres presentó gran variación, desde el factor muy bajo hasta muy alto (figura 6). La microcuenca tuvo elevaciones que oscilan entre los 880 y los 2040 m sobre el nivel del mar, con inclinaciones del terreno que van entre los 0° y 49° (ITCR, 2014). Las pendientes de clase alta (> 35°) presentaron mayor densidad hacia la parte alta de la microcuenca pues en esta zona se encuentran las mayores gradientes, se localizan específicamente en algunos sectores hacia el este de los cantones de Goicoechea y Montes de Oca. Cuanto mayor sea el grado de la pendiente mayor será la posibilidad de un deslizamiento y según Suárez (1998), las altas inclinaciones del terreno desfavorecen la infiltración del agua de lluvia, lo que provoca una mayor erosión del terreno e incide en la absorción del factor pasivo humedad del suelo.

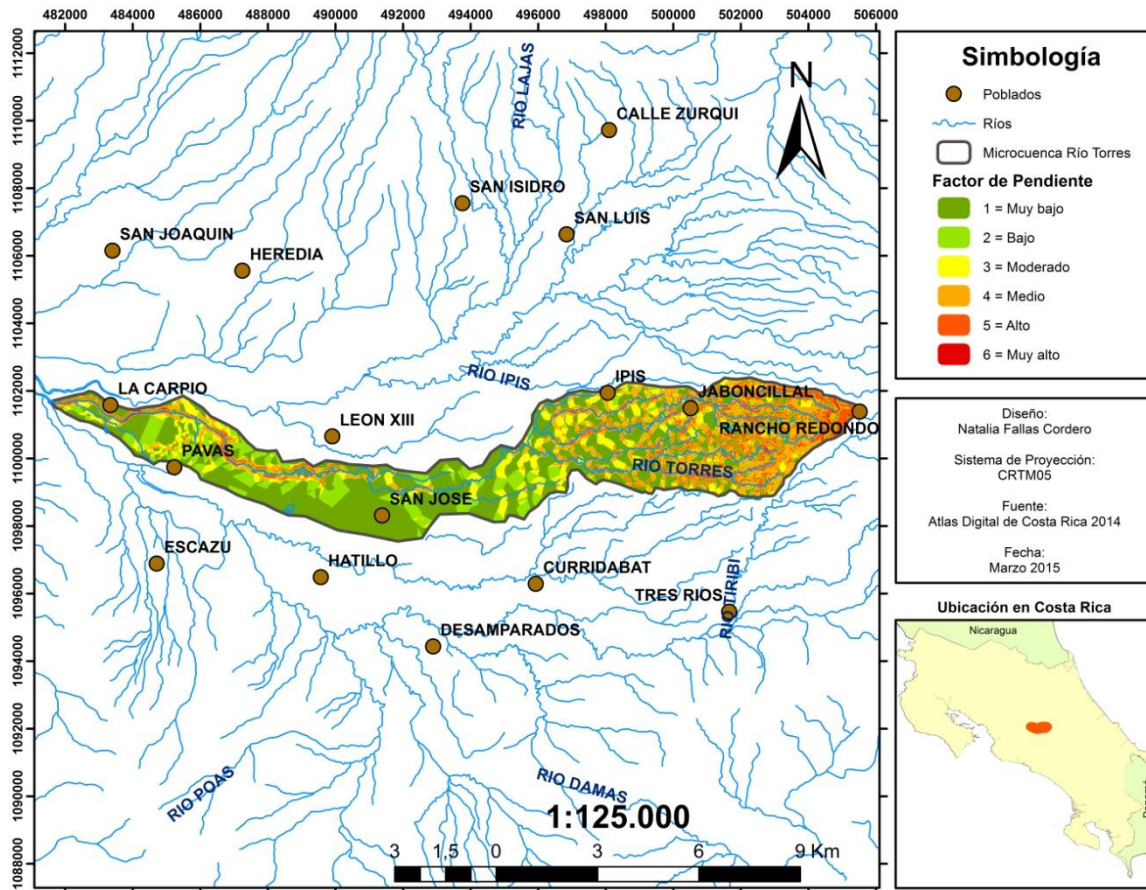


Figura 6. Nivel de pendiente en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

En el cuadro 10 se puede apreciar los porcentajes de área con respecto a los rangos de pendientes en la microcuenca del río Torres, en esta microcuenca predominaron las categorías de pendientes muy bajas, bajas y moderadas, pues representan aproximadamente un 72 % del total del área.

Cuadro 10. Porcentaje de área por clase de pendiente en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

Clase de pendiente	Área (ha)	Porcentaje (%)
Muy bajo	2261,41	45,03
Bajo	665,68	13,26
Moderado	699,34	13,93
Medio	890,45	17,73
Alto	495,32	9,86
Muy alto	9,39	0,19
Total	5021,59	100

La microcuenca del río Tibás (figura 7), presentó elevaciones entre 1080 y 2247 m sobre el nivel del mar, con inclinaciones del terreno que oscilan entre los 0° y 61° (ITCR, 2014). A diferencia de la microcuenca del río Torres, Tibás presentó todas las categorías de pendientes. Esta microcuenca mostró en toda su longitud alta variabilidad de pendientes, desde la parte más alta donde abundan pendientes muy pronunciadas, la parte media de la microcuenca donde las pendientes son más moderadas, hasta llegar a la parte baja de la cuenca donde se observan pendientes menores. Las pendientes de clase alta (35°-55°) y muy alta (> 55°) se concentraron mayormente en la parte alta de la microcuenca en los cantones de San Rafael y San Isidro de Heredia y menormente en el cantón de Santo Domingo, en estas zonas se logró observar que se ubican en su mayoría en las laderas de los ríos. Según Mujica y Pacheco (2013), en pendientes planas o con inclinación suave se pueden dar movimientos de masa a baja velocidad; en las pendientes más inclinadas se presenta severa erosión del suelo; en las de moderado escarpado se pueden presentar movimientos de masa de todo tipo con peligro de erosión y deslizamiento del suelo y en terreno muy escarpado se presenta mayor susceptibilidad a deslizamiento.

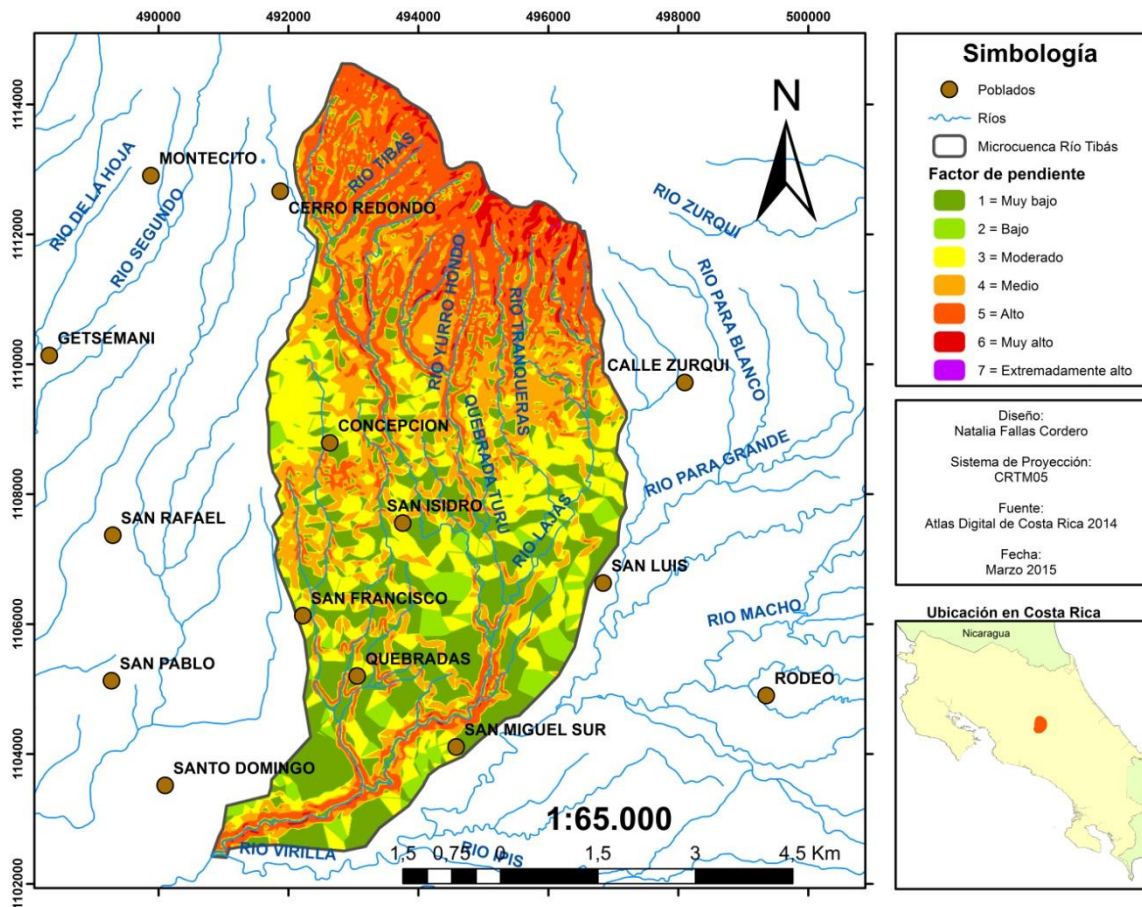


Figura 7. Nivel de pendiente en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

El cuadro 11, presenta el área que ocupa cada clasificación de pendiente en la microcuenca del río Tibás, se tuvo que las clases de pendientes que predominan en esta zona corresponden a las categorías de moderado a alto, pues aproximadamente ocupan un 66,78% del área en estudio. Según Herrera y Hernández (1993) esta zona presenta un estado juvenil modelado en un relieve volcánico donde predominan fuertes pendientes y pequeños valles, las pendientes dominantes oscilan de 10° a 20° (medio y alto) en las partes más suaves y de 30° a 50° (alto) en los puntos más empinados.

Cuadro 11. Porcentaje de área por clase de pendiente en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Clase de pendiente	Área (ha)	Porcentaje (%)
Muy bajo	1086,08	23,20
Bajo	381,84	8,16
Moderado	1025,87	21,92
Medio	1035,69	22,13
Alto	1063,99	22,73
Muy alto	86,62	1,85
Extremadamente alto	0,41	0,01
Total	4680,52	100,00

Intensidad sísmica

El parámetro de intensidad sísmica en la microcuenca del río Torres presentó una clasificación media (55,80% del área) y considerable (44,20% del área), siendo en la escala de Mercalli Modificada intensidades de VII y VIII respectivamente (figura 8). Arce (2011) realizó una simulación con varios escenarios sísmicos, donde obtuvo valores de VII y VIII de intensidad Mercalli Modificada (5 y 6 factor Ts) en los cantones de San José y Goicoechea. La ocurrencia de deslizamientos relacionados a sismos, depende de la intensidad del sismo y adquiere mayor criticidad cuando se combina con factores topográficos, geológicos y climáticos (Suárez, 1998).

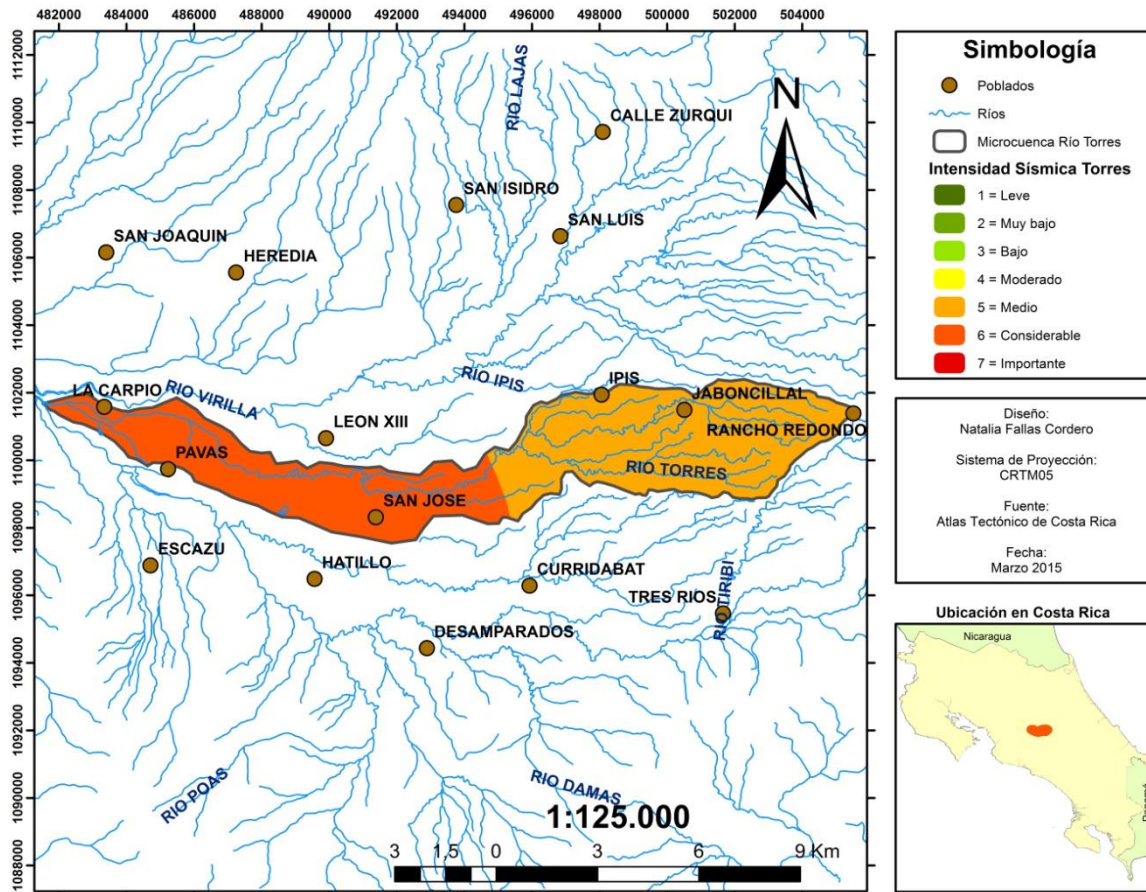


Figura 8. Nivel de intensidad sísmica en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

Con respecto a la microcuenca del río Tibás, la clasificación por intensidad sísmica correspondió a media (95,80% del área) y considerable (4,20% del área) como se observa en la figura 9, en la escala de Mercalli Modificada representa intensidades de VII y VIII respectivamente. La parte baja de la microcuenca corresponde mayoritariamente al cantón de Santo Domingo de Heredia, según un estudio realizado por Reyes et al (2014), esta zona podría alcanzar intensidades sísmicas entre VIII y IX en la escala de Mercalli Modificada.

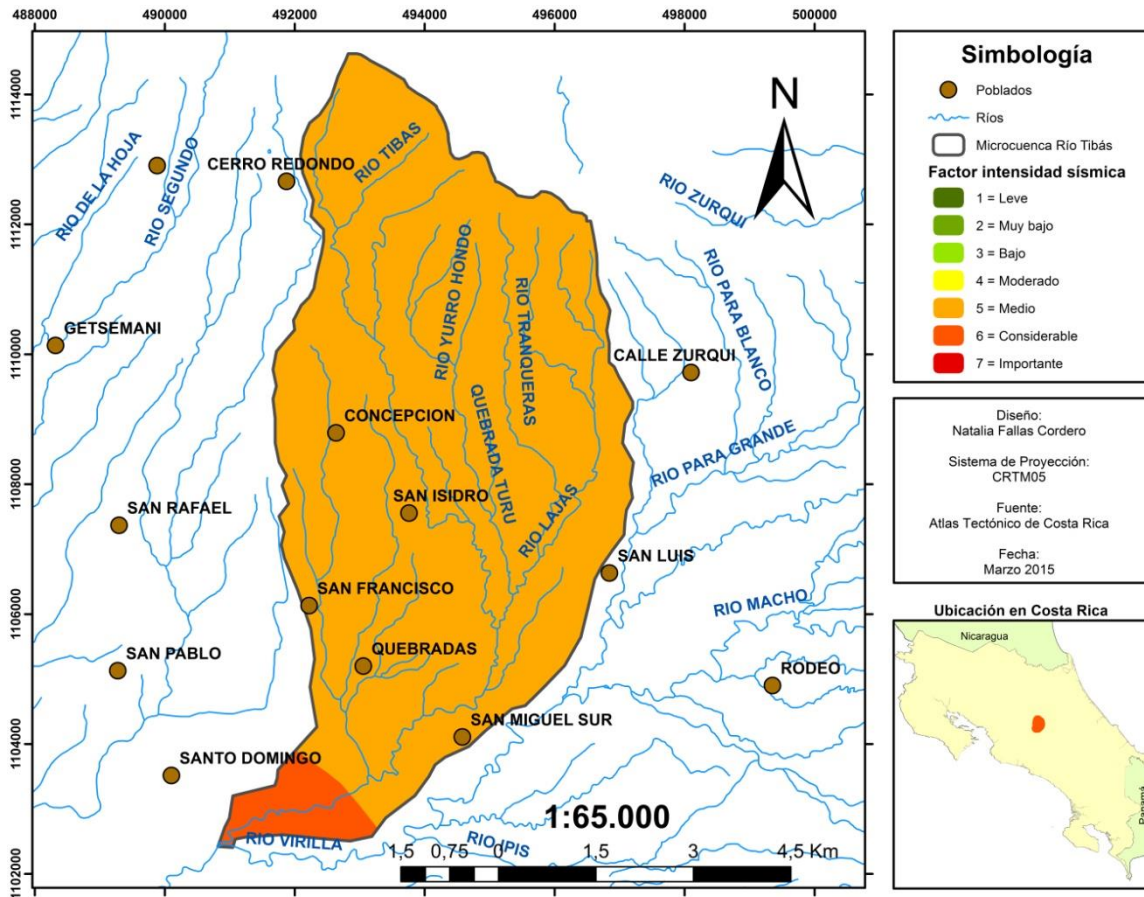


Figura 9. Nivel de intensidad sísmica en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Intensidad de lluvia

La clasificación final del factor de disparo por intensidad de lluvia en la microcuenca del río Torres fue constante en toda el área de estudio, con un valor de dos (figura 10), lo que indica una influencia baja de este parámetro en lo que respecta a la susceptibilidad al deslizamiento. Mora (2004) en un estudio de susceptibilidad al deslizamiento que efectuó en el cantón de San José obtuvo también un factor de dos. En movimientos de suelos la intensidad de lluvia se relaciona con la infiltración, pues si se presentan fuertes precipitaciones el suelo es saturado y puede generar la desestabilización del terreno, pues la lluvia es quizás el factor más frecuente en causar deslizamientos en los países tropicales (Suárez, 1998).

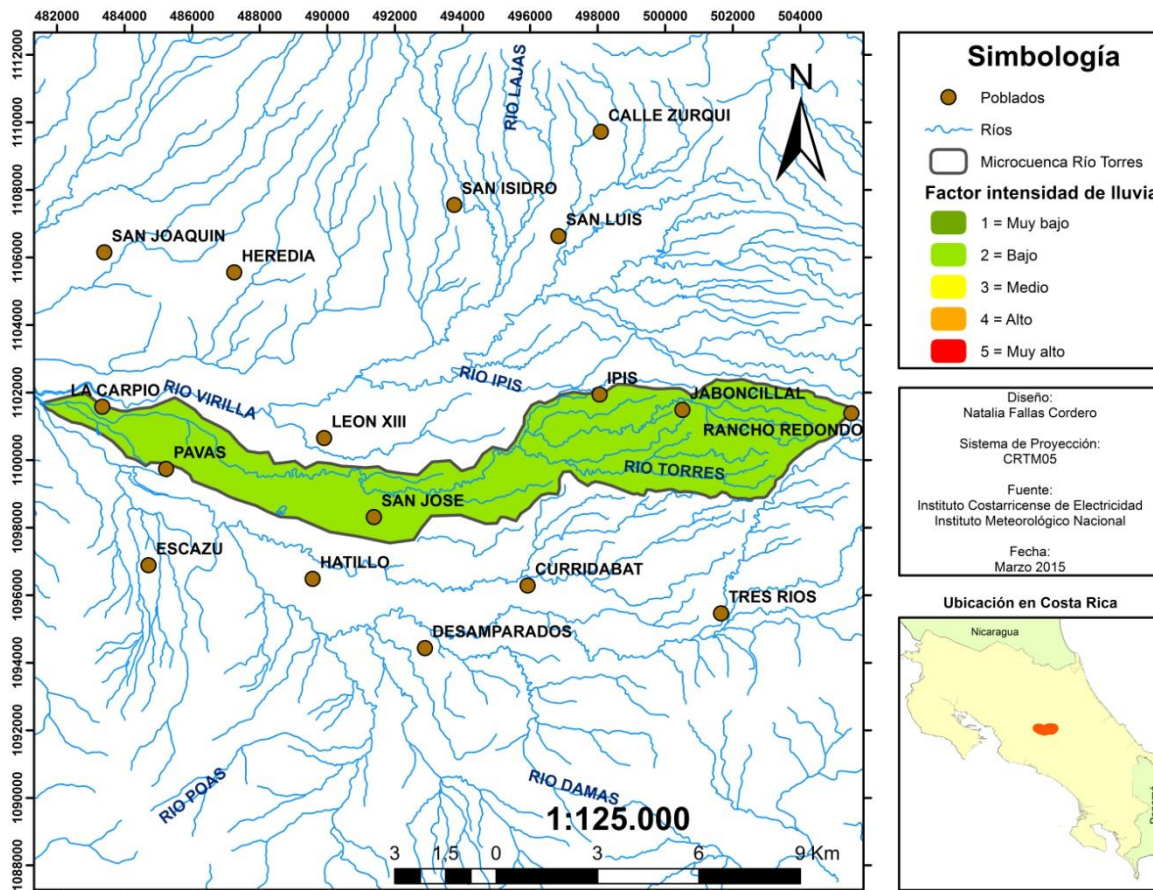


Figura 10. Nivel de intensidad de lluvias en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

En la microcuenca del río Tibás el factor de intensidad de lluvia tuvo mayormente influencia baja con un 48,89% con respecto al área total, media con 40,29% e influencia muy alta con un 10,82%, siendo ésta área localizada sobre el Parque Nacional Braulio Carrillo (figura 11). Según Suárez (1998) es común que en áreas de mayor precipitación anual se presenten mayores problemas de estabilidad de laderas. Generalmente, en zonas montañosas ocurren fuertes lluvias en un período de tiempo de pocas horas y en estos sitios con precipitación alta permanente, donde el nivel freático es alto y constante es habitual la falla de la ladera, al igual en casos donde se presentan lluvias intensas antecedidas de períodos muy secos donde el terreno no saturado es saturado en un instante (CNE, 2013).

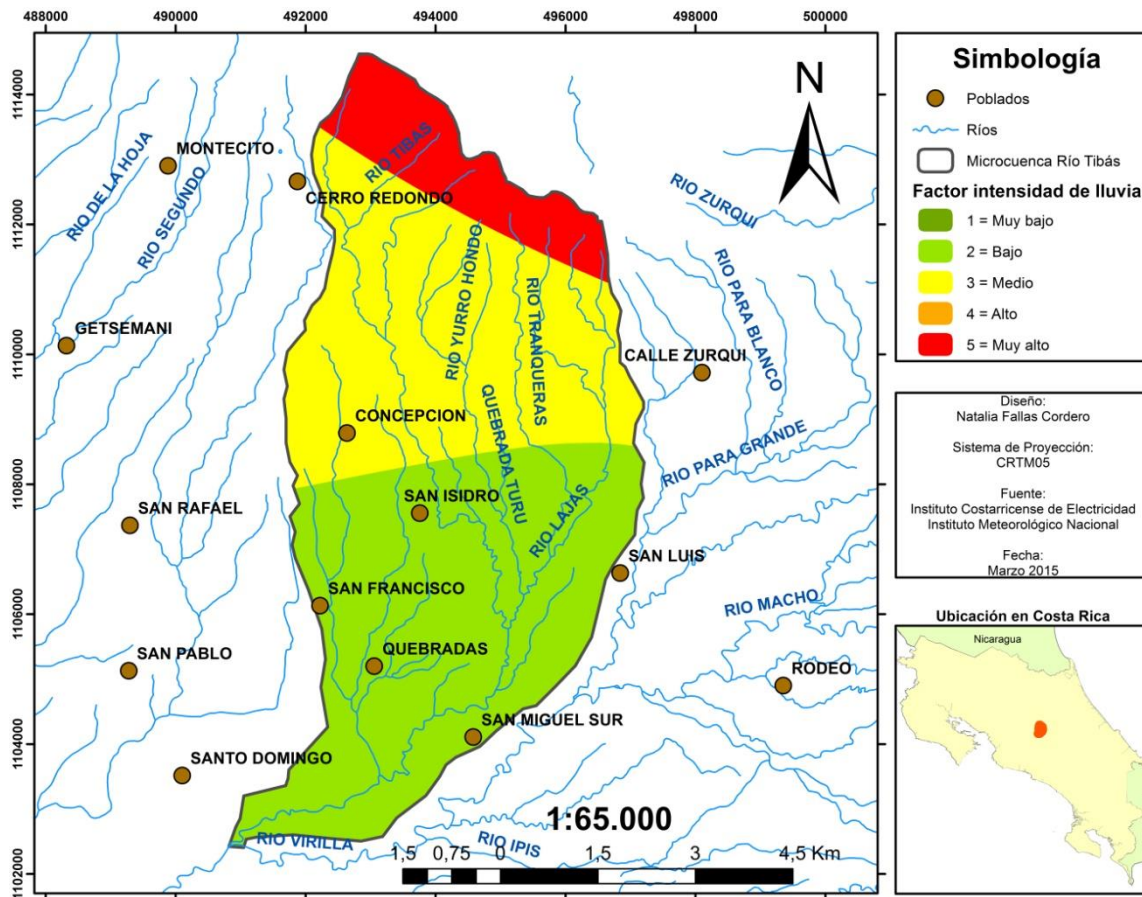


Figura 11. Nivel de intensidad de lluvias en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Susceptibilidad por elementos pasivos

Las figuras 12 y 13 muestran la multiplicación de los factores de litología, humedad del suelo y pendiente en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás respectivamente. Según Suárez (1998) el mecanismo de falla de los deslizamientos es más complejo en los medios tropicales como Costa Rica, esto por los suelos residuales, régimen hidrológico, geología y topografía escarpada.

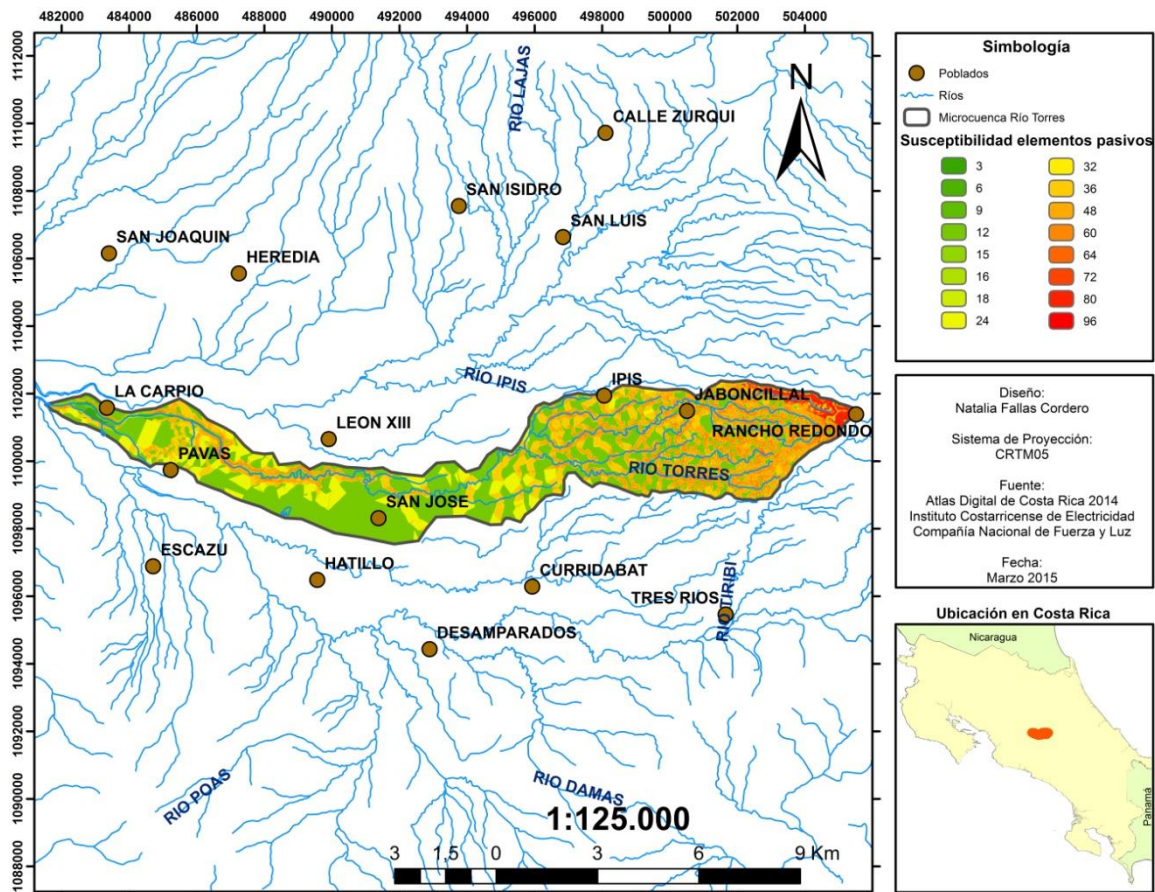


Figura 12. Nivel de susceptibilidad por elementos pasivos en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

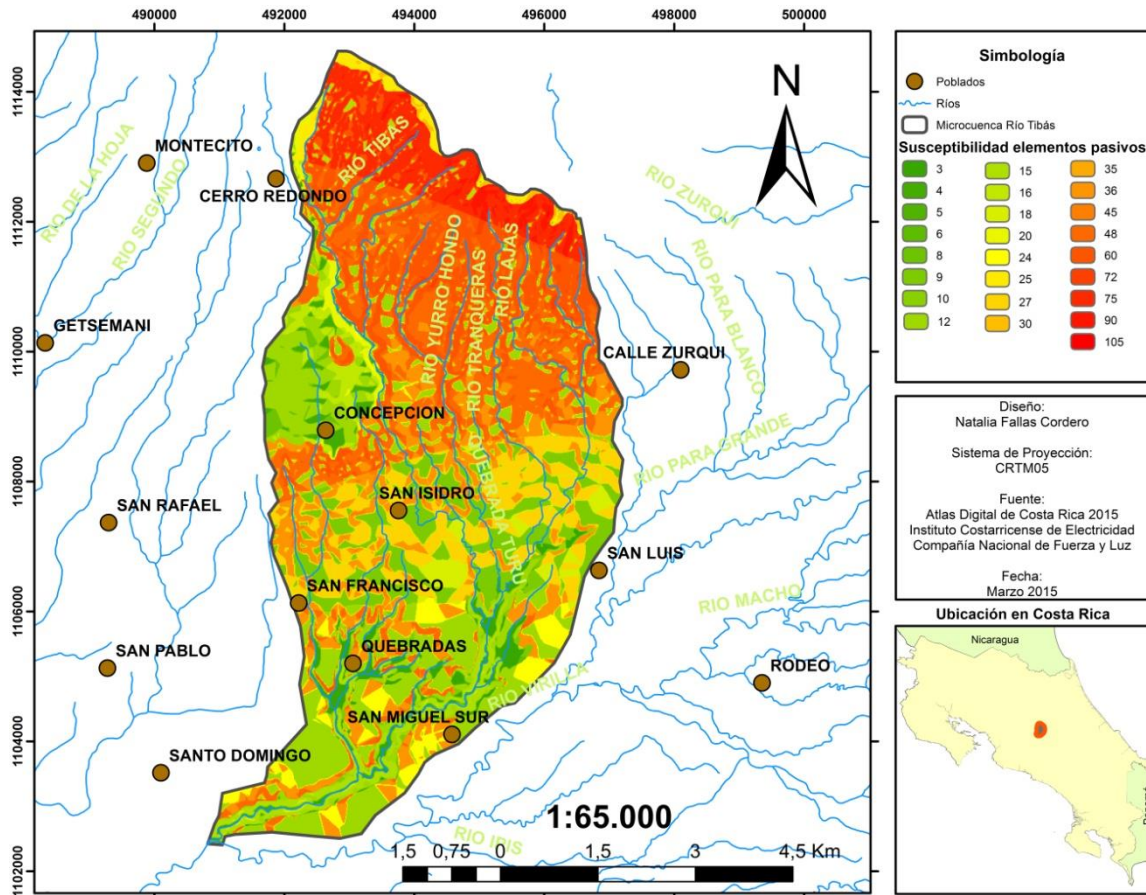


Figura 13. Nivel de susceptibilidad por elementos pasivos en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Susceptibilidad por elementos activos

En las figuras 14 y 15 se observa la susceptibilidad por elementos activos para las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, respectivamente. Estos mapas se obtuvieron al sumar los factores de intensidad sísmica e intensidad de lluvias. El área con valor de susceptibilidad ocho en la microcuenca representa los sitios con mayor posibilidad a presentar un posible deslizamiento en comparación con el área de valor siete. Según Barahona, Méndez y Sjöbohm (2013), en un análisis histórico los eventos sísmicos y meteorológicos, que pueden actuar de forma dependiente o conjunta, conforman los principales factores que desencadenan movimientos en masa.

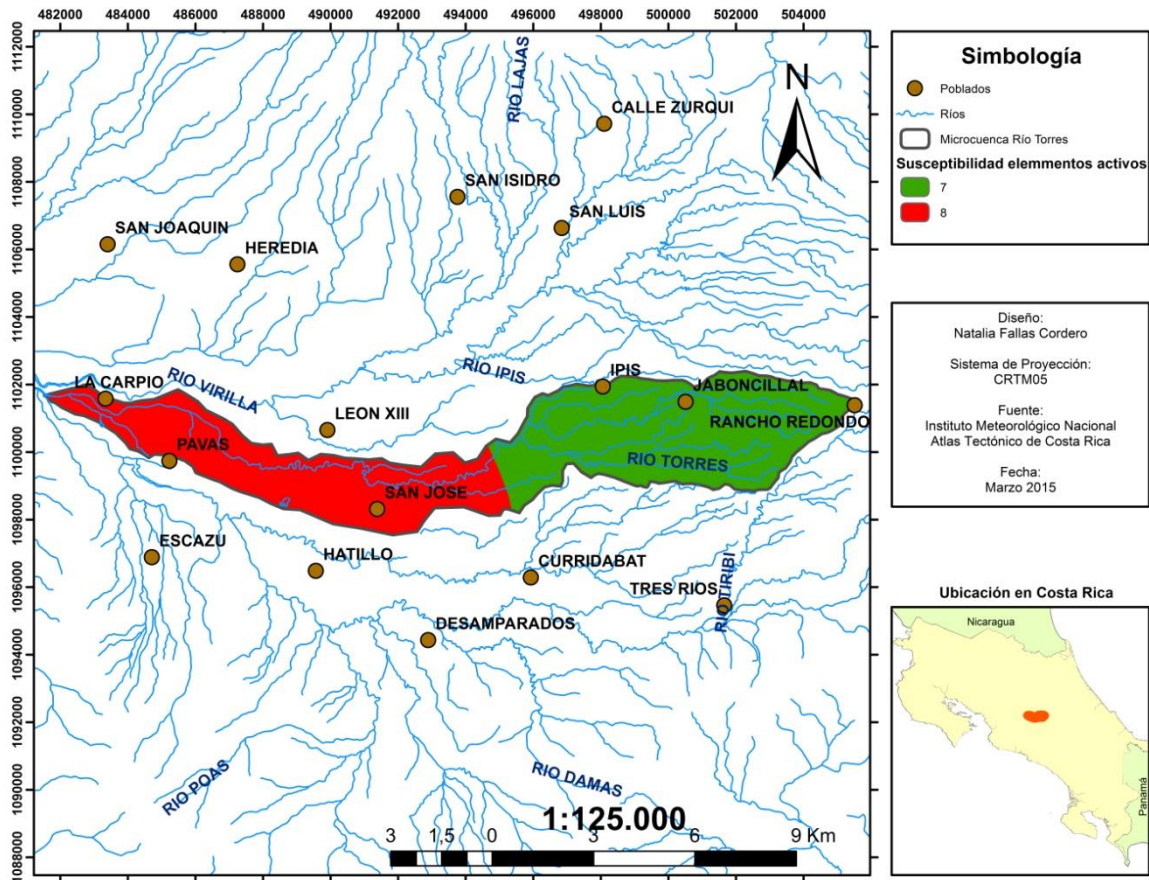


Figura 14. Nivel de susceptibilidad por elementos activos en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

En la microcuenca del río Tibás el área con mayor susceptibilidad a presentar un deslizamiento es la zona con valor 10 (501,89 ha), este sitio corresponde a la parte alta de la microcuenca, seguida de la zona con valor 8 (2064,28 ha) y por último el sitio representado con el número 7 (2073,01 ha) el cual es menos propenso a sufrir movimientos de ladera.

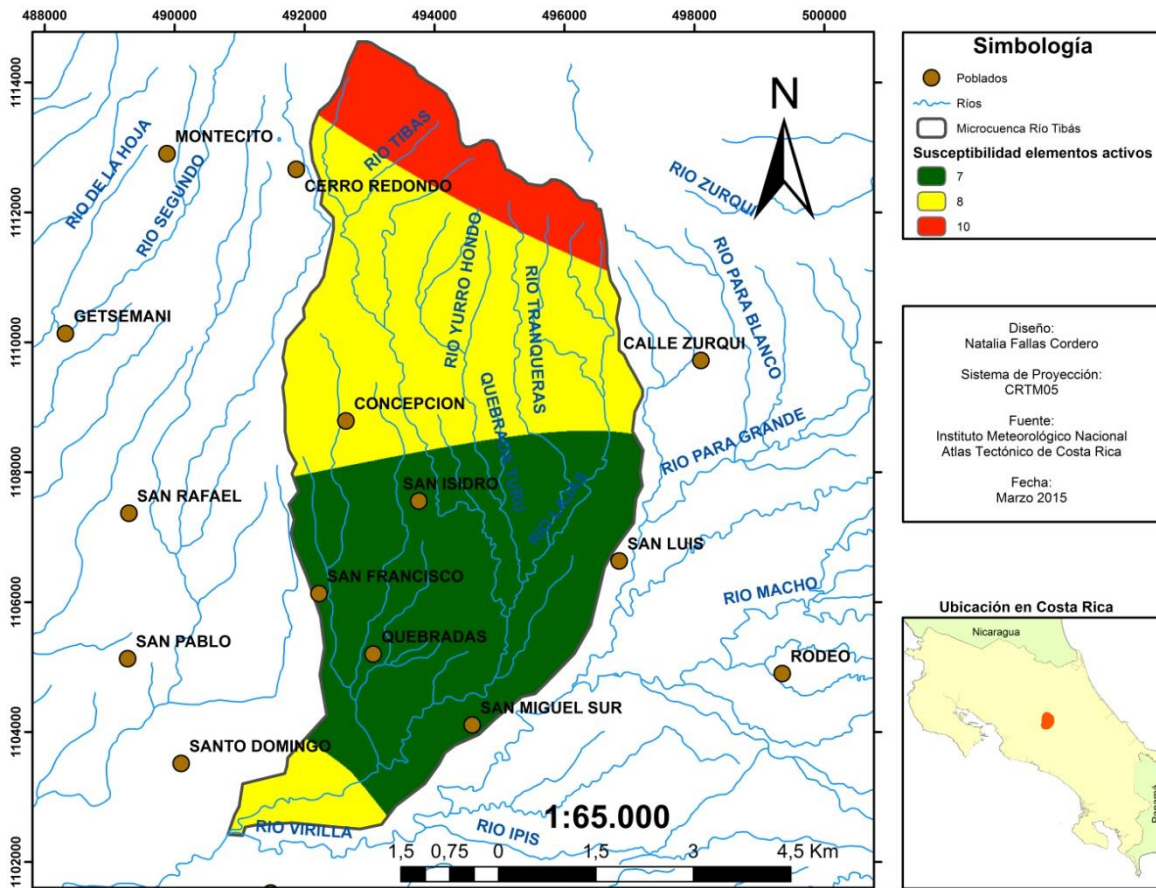


Figura 15. Nivel de susceptibilidad por elementos activos en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Susceptibilidad a deslizamientos

Como resultado final se obtuvo la zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento para las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, como se muestra en las figuras 16 y 17 respectivamente. En ambas microcuencas se observaron cuatro niveles de susceptibilidad al deslizamiento.

En la microcuenca del río Torres las áreas correspondientes a susceptibilidad media abarcaron la mayor parte del área de estudio (52,48%) y se distribuyen a lo largo de la microcuenca. Las áreas correspondientes a susceptibilidad moderada (45,69%) igualmente se distribuyeron en toda el área de estudio. Las áreas correspondientes a susceptibilidad alta (1,34%) se concentraron en la parte alta de la microcuenca, específicamente en las cercanías a Jaboncillal y Rancho Redondo, siendo estas áreas las

de mayor riesgo a presentar deslizamientos; mientras que las áreas correspondientes a susceptibilidad baja (0,49%) se presentaron principalmente en la parte baja de la microcuenca en las cercanías del poblado La Carpio. Según Barillas (2004), en las zonas que presentan mayor grado de susceptibilidad a sufrir deslizamientos, no se debería implementar desarrollo urbanístico o actividades productivas, por lo contrario se debe dar un manejo ambiental que no aumente esta susceptibilidad.

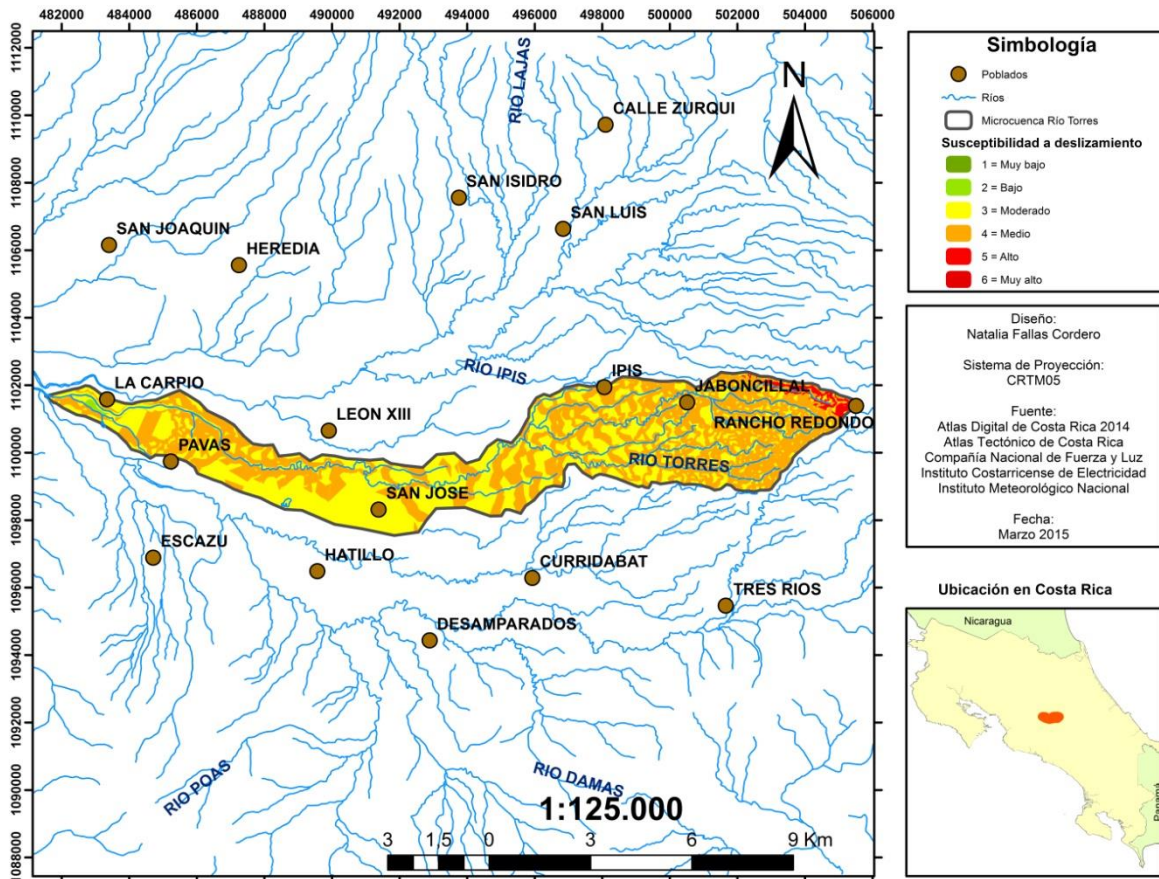


Figura 16. Susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

En la microcuenca del río Tibás las áreas correspondientes a susceptibilidad media abarcaron la mayor parte del área de estudio (52,09%) y se distribuyen a lo largo toda el área. Las áreas correspondientes a susceptibilidad moderada (35,21%) igualmente se presentaron en toda el área de estudio. Las áreas correspondientes a susceptibilidad alta (9,52%) se concentraron en la parte alta de la microcuenca, específicamente en el Parque

Nacional Braulio Carrillo, siendo estas áreas las de mayor riesgo a presentar deslizamientos; mientras que las áreas correspondientes a susceptibilidad baja (3,19%) se presentaron principalmente en la parte media de la microcuenca en las cercanías del poblado Concepción en el cantón de San Rafael de Heredia. Según Mora (2004) las zonas identificadas con bajo nivel de susceptibilidad a deslizamientos representan sectores estables que no requieren medidas correctivas, son sectores aptos para usos urbanos y construcción de edificios, en los sitios con calificación media o moderada no se debe permitir la construcción de infraestructura sin antes realizar estudios geotécnicos y mejoras, estas pueden ser movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, entre otras, por último en las zonas con mayor probabilidad a presentar deslizamientos se deben realizar estudios de estabilidad que favorezcan la seguridad del sector, de no ser así se deben de mantener como áreas de protección.

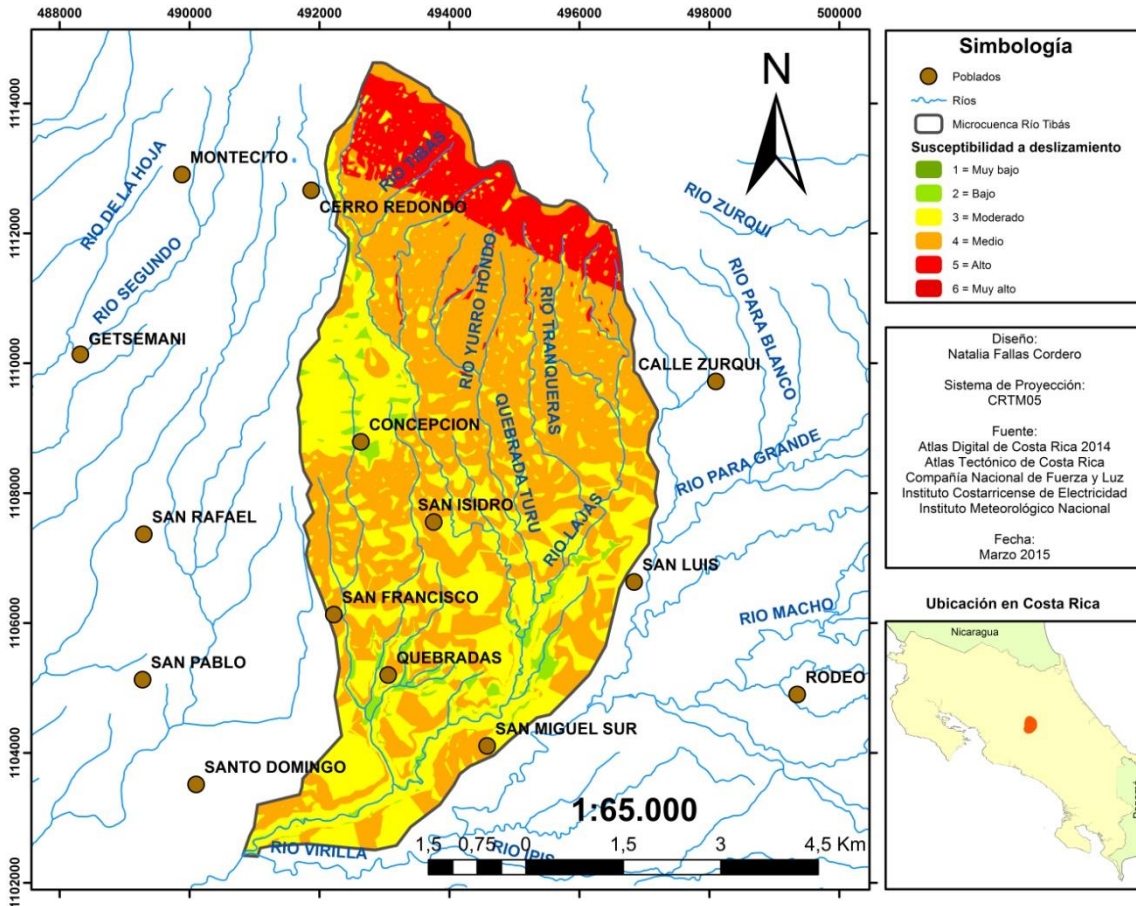


Figura 17. Susceptibilidad a deslizamientos en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Uso del suelo

En la figura 18 se muestran las categorías de uso del suelo presentes en la microcuenca del río Torres. Esta figura se complementa con el cuadro 12, puesto que en este se puede apreciar el área y porcentaje de cada categoría. En el mapa del uso del suelo se observa que en esta zona de estudio la clase dominante fue urbano (46%), la cual se ubica con mayor extensión en la parte baja y media de la microcuenca; bosque secundario (13,39%) y pastos arbolados (10,19%). Al comparar con la figura 16, se nota que el factor alto correspondió en uso de suelo mayormente a bosques secundarios (35,28 ha), pastos arbolados (21,31 ha) y urbano (2,42 ha), ubicadas estas áreas entre los poblados de Jaboncillal y Rancho Redondo. En estas zonas se observó que se desarrolla principalmente la ganadería vacuna y se presenta establecimiento de infraestructura en pendientes pronunciadas. Según la CNE (2013) la presencia de ganado puede generar

efectos negativos en la estabilidad del suelo y las laderas por su peso y densidad corporal, ya que el pisoteo genera un fuerte impacto sobre el terreno y con el transcurrir del tiempo pueden desencadenar inestabilidad en los terrenos. En factor medio se presentó principalmente las clases de urbano, bosque secundario y pastos arbolados, con 1004,87 ha, 422,69 ha y 351,46 ha respectivamente. En factor moderado se presentó las categorías de urbano (1267,35 ha), bosque secundario (193,55 ha) y pastos arbolados (128,34 ha). El factor bajo es el que representó menor cantidad de área a lo largo del sitio en estudio y mayormente se localiza sobre la categoría de bosque secundario con una cobertura de 24,24 ha.

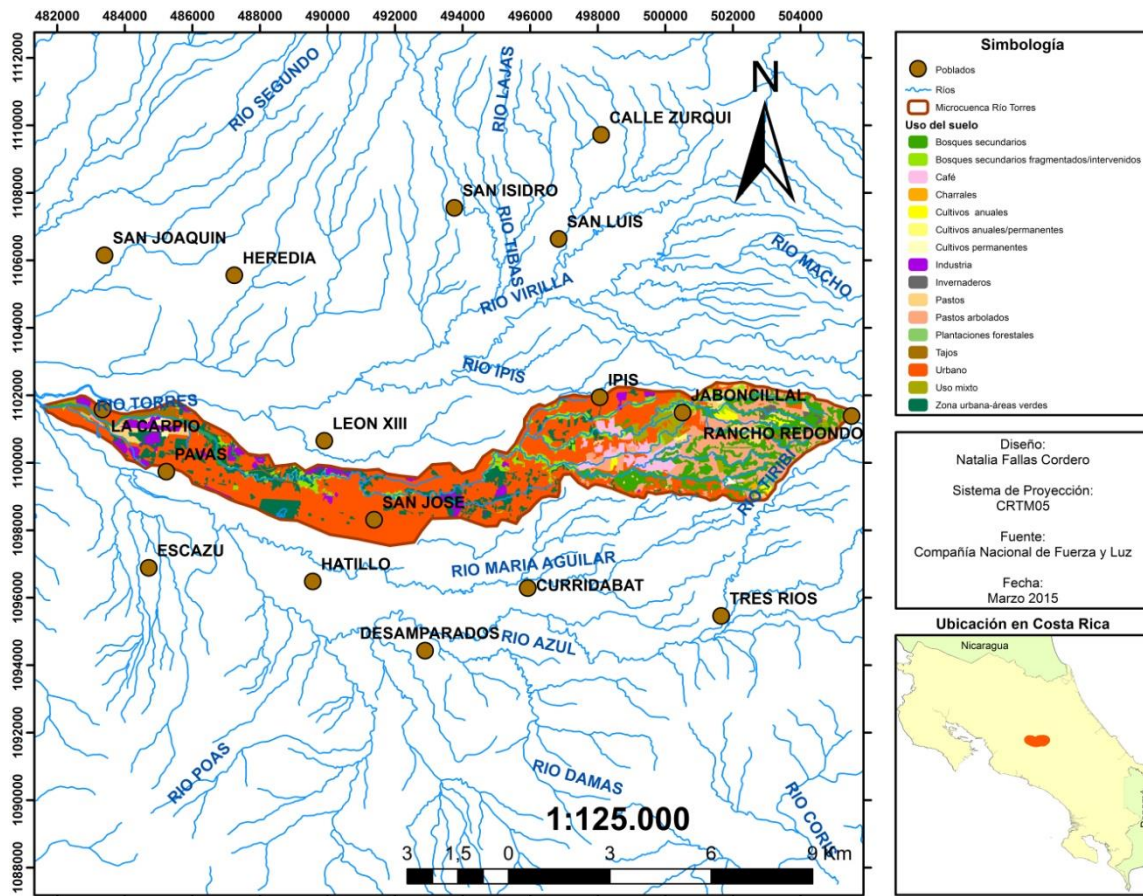


Figura 18. Uso del suelo en la microcuenca del río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

La microcuenca del río Tibás, en lo que respecta a las categorías de uso del suelo se pueden observar en la figura 19, mientras que en el cuadro 12 se presentan las áreas y porcentajes correspondientes a cada categoría. En el mapa de uso del suelo se puede apreciar que las clases con mayor dominancia con respecto al área total de la microcuenca fueron el cultivo de café (29,98 %); bosque primario (16,01 %), la zona más extensa de este bosque se localiza en el sector norte de los cantones de San Rafael y San Isidro de Heredia y se encuentra bajo regímenes de protección; pastos arbolados (13,67 %) y urbano (13,03 %). Al comparar con la figura 17, se puede decir que el área representada por el factor alto se concentra en las clases de bosque primario (402,16 ha) y pastos arbolados (30,68 ha), al obtener estos resultados se pudo observar que estos sitios coinciden con altas pendientes y gran cantidad de precipitaciones lo que los vuelve más susceptibles a sufrir deslizamientos. El factor medio se presentó principalmente en las clases de cultivo de café (687,66 ha), pastos arbolados (448,35 ha) y bosque primario (307,49 ha). El factor moderado se presentó principalmente en las clases del cultivo de café (650,54 ha), urbano (287,68 ha) y uso mixto (161,88 ha). El factor bajo es el que representó menor cantidad de área a lo largo del sitio en estudio y mayormente se localiza sobre la categoría de cultivo de café con una cobertura de 54,93 ha.

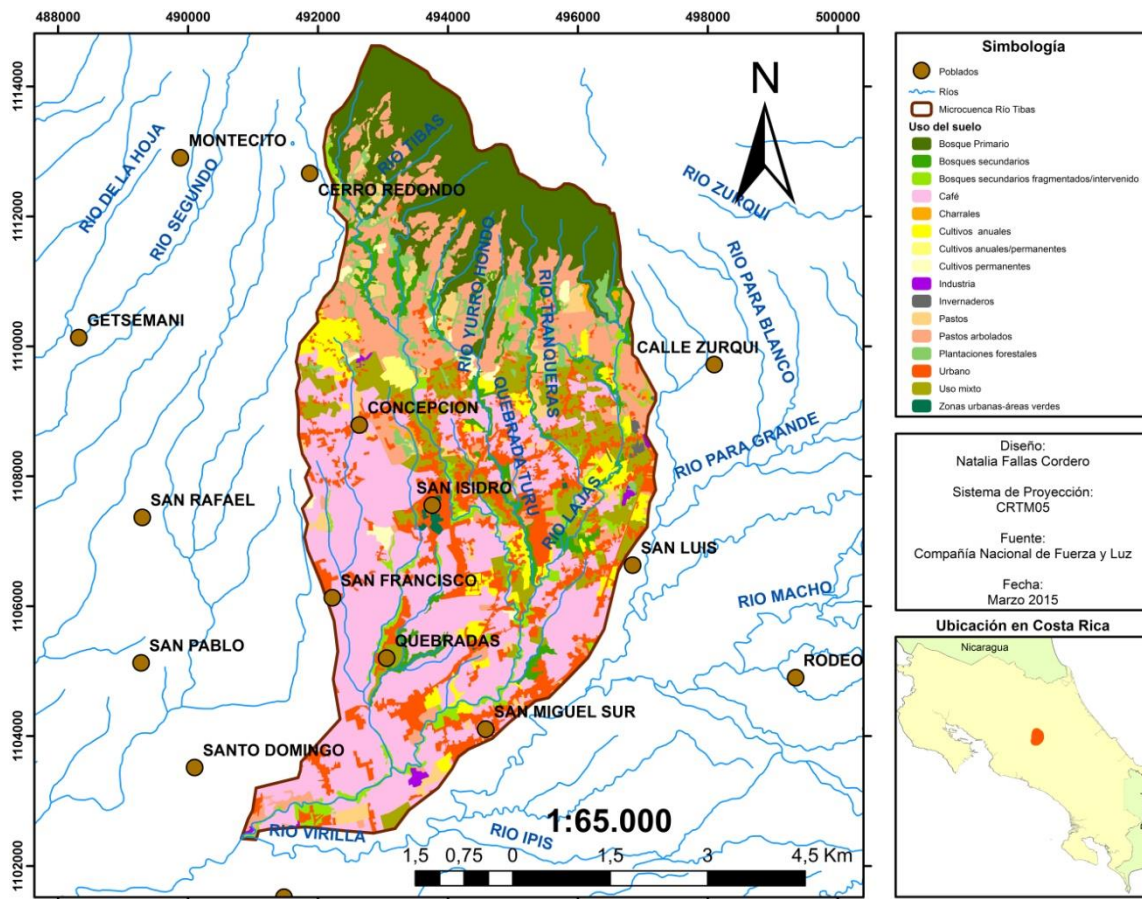


Figura 19. Uso del suelo en la microcuenca del río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Cuadro 12. Área y porcentaje por clase de uso de suelo en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago y río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.

Uso del suelo	Microcuenca Río Tibás		Microcuenca Río Torres	
	Área	%	Área	%
Bosque primario	744,44	16,01	-	-
Bosque secundario	184,71	3,97	663,35	13,39
Bosques secundarios fragmentados/intervenidos	160,80	3,46	279,87	5,65
Café	1393,99	29,98	141,73	2,86
Charrales	16,40	0,35	9,28	0,19
Cultivos anuales	171,13	3,68	32,57	0,66
Cultivos anuales/permanentes	19,23	0,41	4,78	0,10
Cultivos permanentes	34,88	0,75	13,37	0,27
Industria	13,17	0,28	199,36	4,02

Invernaderos	6,62	0,14	24,99	0,50
Pastos	148,54	3,19	152,01	3,07
Pastos arbolados	635,72	13,67	504,89	10,19
Plantaciones forestales	152,27	3,27	17,22	0,35
Urbano	605,90	13,03	2279,29	46,00
Uso mixto	353,01	7,59	126,52	2,55
Zonas urbanas-áreas verdes	9,51	0,20	466,64	9,42
Tajos	-	-	39,57	0,80
Total	4650,31	100,00	4955,42	100,00

CONCLUSIONES

La clasificación final del factor litológico en la microcuenca del río Torres presenta una predominancia del factor alto (98,10% del área). El cual representa un mayor grado de meteorización y fuertes fracturas en las rocas (Mora y Vahrson, 1994).

En la clasificación final del factor litológico en la microcuenca del río Tibás predomina el factor medio (66,28% del área), seguido del bajo (17,33% del área) y en menor porcentaje el factor alto (16,39% del área).

La microcuenca del río Torres presenta con respecto a su área total un 96,93% correspondiente al factor medio y un 3,07% de factor alto. Las estaciones meteorológicas utilizadas en este sitio muestran que en el área de factor medio la precipitación media anual oscila entre 1715,13 a 2216,37 mm y el área con valor alto va de 2754,69 a 2875,34 mm (ICE, 2014).

La microcuenca del río Tibás presenta valores medio, alto y muy alto de humedad del suelo con áreas de 48,62%, 40,65% y 10,73% respectivamente. La estación meteorológica que se encontró en el sitio con factor muy alto, presenta una precipitación media anual de 6978,90 mm (ICE, 2014).

La microcuenca del río Torres se caracteriza por presentar una predominancia de pendientes bajas, muy bajas y moderadas (72% del área), según la clasificación de van Zuidam (1986).

La microcuenca del río Tibás presenta alta variabilidad de pendientes y se caracteriza por presentar una predominancia de pendientes de moderado a alto (66,78% del área), según la clasificación de van Zuidam (1986).

El parámetro de intensidad sísmica en la microcuenca del río Torres presenta una clasificación media (55,80% del área) y considerable (44,20% del área), siendo en la escala de Mercalli Modificada intensidades de VII y VIII respectivamente.

En la microcuenca del río Tibás, la clasificación por intensidad sísmica corresponde a media (95,80% del área) y considerable (4,20% del área) y en la escala de Mercalli Modificada representa intensidades de VII y VIII respectivamente.

La clasificación final del factor de disparo por intensidad de lluvia en la microcuenca del río Torres fue constante en toda el área de estudio, con un valor de dos lo que indica una influencia baja de este parámetro en lo que respecta a la susceptibilidad al deslizamiento.

En la microcuenca del río Tibás el factor intensidad de lluvia tiene mayormente influencia baja con un 48,89% con respecto al área total e influencia media con 40,29% y muy alta con un 10,82%, estando localizada sobre el Parque Nacional Braulio Carrillo.

El mapa de susceptibilidad al deslizamiento en la microcuenca del río Torres presenta susceptibilidad media (52,48% del área), moderada (45,69% del área), alta (1,34% del área) y baja (0,49% del área).

El mapa de susceptibilidad al deslizamiento en la microcuenca del río Torres presenta susceptibilidad media (52,09% del área), moderada (35,21% del área), alta (9,52% del área) y baja (3,19% del área).

El mapa de uso de suelo de la microcuenca del río Torres muestra que la clase dominante es urbana con un 46% del área.

El mapa de uso de suelo de la microcuenca del río Tibás muestra que la clase dominante es el cultivo de café con un 29,98 % del área.

En la microcuenca del río Torres la categoría de uso de suelo que presenta más alta susceptibilidad a sufrir un deslizamiento es bosques secundarios (35,28 ha).

En la microcuenca del río Tibás la categoría de uso de suelo que presenta más alta susceptibilidad a sufrir un deslizamiento es bosque primario (402,16 ha).

El resultado de este estudio es una herramienta para identificar las posibles zonas susceptibles a deslizamiento, sin embargo no sustituye los estudios geotécnicos.

Los sitios con alta susceptibilidad al deslizamiento no pueden ser utilizados para la construcción de infraestructura o actividades productivas, estos deben ser destinados a sitios de reforestación o manejo ambiental.

Los sitios con niveles medios de susceptibilidad al deslizamiento se pueden utilizar para el desarrollo de infraestructura o producción, sin embargo se deben tener estudios geotécnicos más detallados que señalen posibles medidas de mitigación para implementar en estas áreas.

Los sitios con baja susceptibilidad a deslizamientos se pueden utilizar para cualquier actividad, solo y sí cumplen con las leyes de ordenamiento territorial.

RECOMENDACIONES

Evitar la construcción de viviendas o desarrollo de cualquier actividad comercial en las zonas con susceptibilidad alta a deslizamiento que puedan provocar presión en el terreno.

Es necesario regular el crecimiento urbano en las zonas altas y medias de susceptibilidad al deslizamiento y en las orillas de los ríos.

Se debe reubicar edificaciones sobre zonas con alta susceptibilidad a deslizamientos para evitar futuros desastres.

En las zonas con alta susceptibilidad a deslizamientos se deben implementar programas de restauración ecológica, con el fin de fijar el terreno y evitar la erosión.

En los sitios con alta susceptibilidad a deslizamientos se debe disminuir la actividad ganadera o mejorar las técnicas de producción, pues aumenta la probabilidad a deslizamientos.

Los sitios de baja susceptibilidad a deslizamientos pueden ser utilizados para actividades productivas y proyectos urbanísticos.

Se recomienda que en los sitios donde se desarrolla la agricultura los productores apliquen técnicas de cultivo de manera que se pueda disminuir la erosión e implementar la reforestación en aquellos sitios donde no es apto el desarrollo de sus cultivos.

Se debe dar un adecuado manejo de aguas residuales, para evitar el lavado de los suelos en los sitios con altas pendientes.

Se debe tomar en cuenta los mapas de susceptibilidad a deslizamiento para planes de ordenamiento territorial, respetando la legislación existente.

Agregar la variable de cobertura vegetal al modelo de Vharson y Mora, con el fin de identificar que tanto incide en la susceptibilidad a deslizamientos.

Hacer una validación de los mapas con información de campo. Puede ser mediante la fotointerpretación de fotografías aéreas o con visitas de campo.

REFERENCIAS

- Alcántara Ayala, I. (2000). Landslides:¿ Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, (41), 7-25. Consultado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci_arttext
- Arce, S. (2011). *Aplicación de la metodología HAZUS MH en análisis de riesgo sísmico en la infraestructura del anillo metropolitano de transporte de electricidad*. (Informe final). San José, Costa Rica: Consultado de: <http://www.observatoriageograficoamericalatina.org.mx/egal13/Procesosambientales/Proteccioncivil/02.pdf>
- Arroyo González, L. N., Salgado Duarte, D., y Moraga Umaña, C. V. (2011). Costa Rica: Análisis de la incidencia relacionada con inundaciones y deslizamientos por provincias y cantones, década 1999 al 2009. *Revista Geográfica de América Central.*, 2(47E).
- Barahona, D., Méndez, J., y Sjöbohm, L. (2013). *Análisis de la susceptibilidad a deslizamientos en el distrito de Tres Equis: Una base para la gestión del riesgo y ordenamiento territorial, Turrialba, Costa Rica*.
- Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., y Núñez Román, 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. Consultado de <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/viewFile/3970/3812>
- Barillas, E. M. (2004). Guía metodológica para la evaluación de zonas susceptibles a deslizamientos disparados por lluvias. *Documento Técnico "Programa Descentralización y Fortalecimiento Municipal" Unión Europea*.
- Comisión Nacional de Emergencias (CNE). (2013). *Desarrollo de escenarios por inestabilidad a laderas para la implementación de restricciones, en el uso de la tierra en las áreas de influencia de los deslizamientos de Tapezco y Chitaría, Santa Ana, San José*.

- Denyer, P., y Kussmaul, S. (1994). *Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana, Costa Rica*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
- Denyer, P., Kussmaul, S., y Arias, O. (1994). Estratigrafía de las rocas ígneas. In P. Denyer, & S. Kussmaul (Comp.), *Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana, Costa Rica* (pp. 61-70). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Denyer, P., Montero, W., y Alvarado, G. (2003). *Atlas Tectónico de Costa Rica* (2da edición ed.). San José: Universidad de Costa Rica.
- FAO. (2007). *Más vale prevenir que lamentar: Las cuencas y la gestión de riesgos a los desastres naturales en Guatemala*. Consultado de: <http://coin.fao.org/coin-static/cms/media/5/12820628912320/fao20manejo20de20cuencas.pdf>
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). En Capella I. (Ed.), *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Ferrer Gijon, M. (1988). Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas. En Instituto Geológico y Minero de España (Coord.). *Riesgos geológicos*. (pp. 175-196). Madrid, España. Consultado de: http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=BhIDV88yvzWC&oi=fnd&pg=PA175&dq=deslizamientos&ots=FZEJPizP9w&sig=93BGKZTY5ZF_K2mG-ueHPrx0J_s#v=onepage&q=deslizamientos&f=false
- Herrera, W., y Hernández, G. (1993). Análisis de los recursos hídricos en la cuenca del río Tibás. *Revista Geológica De América Central*, (27), 33-52.
- Hidalgo, P., Alvarado, G., y Linkimer, L. (2004). La lavina del Valle Central (Costa Rica): ¿Lahar o debris avalanche? *Revista Geológica De América Central*, 30, 101-109.
- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2014). *Base de datos estaciones meteorológicas*.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). 2014. Atlas Digital de Costa Rica 2014. (CD-ROM). Cartago, CR, ITCR. 1 CD-ROM.
- Noji, E. (2000). Naturaleza de los desastres: Sus características generales y sus efectos en la salud pública. En E. Noji (Ed.) *Impacto de los desastres en la salud pública*.

(pp. 3-20). Bogotá, Colombia: Organización Panamericana de la Salud Consultado en: <http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=bAUCQjJ-TqsC&oi=fnd&pg=PT13&dq=impacto+de+los+desastres+en+la+salud+publica&ots=8T13junzYp&sig=weoVN9L4bGk-oa-2ZL2dZNFMeI0#v=onepage&q=impacto%20de%20los%20desastres%20en%20la%20salud%20publica&f=false>

- Mora, R. (1992). La susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en la zona norte de Alajuela y el terremoto de Fraijanes de 1888. Efectos y previsión. *Revista Geográfica De América Central*, 1(25-26), 311-322. Consultado de <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2919>
- Mora C., S., Alvarado, G., y Morales, L. D. (1992). Mapa preliminar sintético de amenazas geológicas de Costa Rica: Su importancia en el desarrollo de la infraestructura civil. *Revista Geográfica de América Central*. vol. 1 no. 25-26 (1992).
- Mora, R. Y Mora, S. (1994). Deslizamientos. En Denyer, P. Y Kussmaul, S. (Ed), *Atlas geológico del la Gran Área Metropolitana*. (pp. 245-257). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Mora, R. (2004). Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica. *Escuela Centroamericana De Geología. Universidad De Costa Rica*
- Mora, S. y Vahrson, W. (1993). Determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología ICE* 3(1), 32.
- Mora, S., y Vahrson, W. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bolettin of the Association of Engineering Geologists*. 31(1), 49-58.
- Mujica, S., y Pacheco, H. (2013). Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela. *Revista De Investigación*, 37(80), 215-244.
- Mulas, J. (2010). *Microzonación sísmica de las inestabilidades de ladera*. España: Instituto Geológico y Minero de España.

- Programa IPGARAMSS. (2008). *Manual metodológico para la evaluación de movimientos de ladera en el AMSS (El Salvador, CA)*. San Salvador, El Salvador.
- Ramakrishnan, B. (1997). Manejo integrado de los recursos naturales: el problema a nivel de cuencas. *Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias*. (pp. 1-34). San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Reyes, J., Fernández, M., Grineski, S., & Collins, T. (2014). Natural hazards in Santo Domingo de Heredia, Costa Rica, Central America. *Natural Science*, 6(3), 121-129. doi:10.4236/ns.2014.63017
- Rodríguez, J., Quintana, C., Rivera, H., y Mosquera, J. (2013). Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y Vharson: Estudio de caso. *Revista Ambiental, Agua, Aire y Suelo*, 4(1), 13-22.
- Romero, G., y Maskrey, A. (1983). Cómo entender los desastres naturales. En A. Maskrey (Comp.) *Los desastres no son naturales*. (pp. 1-7). Colombia: Tercer Mundo Editores. Consultado en: <http://www.eap.df.gob.mx/sii/images/2.pdf>.
- Salazar, L. (2007). *Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfico-ILWIS-, utilizando el método Mora y Vahrson, 1991*. Consultado de <http://hercules.cedex.es/hidraulica/PROHIMET/Br07/Comunicaciones/Salazar.pdf>
- Sánchez, V. (2003). *Gestión ambiental participativa de microcuencas*. Heredia, Costa Rica: Editorial EUNA.
- Suarez, J. (1998). Ingeniería de suelos Ltda. (Ed.), *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas Tropicales*. Colombia: Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos.
- Vahrson, W., Cartín Herrera, N., y Patterson Casanova, O. (1992). Las avalanchas e inundaciones de julio de 1987 en las cuencas del río grande de Orosi y río Pejibaye: Un estudio de caso. *Revista Geográfica De América Central*, 1(25-26),

323-340.

Consultado

de

<http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2923>

Vallejos., S., Esquivel., L., y Hidalgo., M. (2012). Histórico de desastres en Costa Rica (Febrero 1723 – Setiembre 2012). San José, Costa Rica: CNE.

Vargas, R. (2002). *Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos Municipio de La Celia, Departamento de Risaralda*. (Informe final). Pereira, Colombia:

Vega Araya, E., y Vega Araya, M. (2005). *Vulnerabilidad ante desastres naturales. ¿Cómo actuar?*. Consultado en:

www.cieco.org/docs/Informe%20Vulnerabilidad%20Final.pdf.

ANEXOS

Anexo 1. Valores asignados por estación y mes para el cálculo de la humedad del suelo en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2015.

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Sumatoria	Valor asignado	Calificativo
Cerro Zurquí	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	24	5	Muy alto
Sabana Norte	0	0	0	0	2	1	1	1	2	2	1	0	10	3	Medio
San Ramón de Tres Ríos	0	0	0	0	2	2	1	2	2	2	1	0	12	3	Medio
Barva	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	0	15	4	Alto
Cerro Escazú	0	0	0	0	2	2	1	1	2	2	1	0	11	3	Medio
San Luis de Santo Domingo	0	0	0	0	2	2	1	1	2	2	2	1	13	3	Medio
San Pedro de Coronado	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	1	16	4	Alto
Colima	0	0	0	0	2	2	1	1	2	2	1	0	11	3	Medio

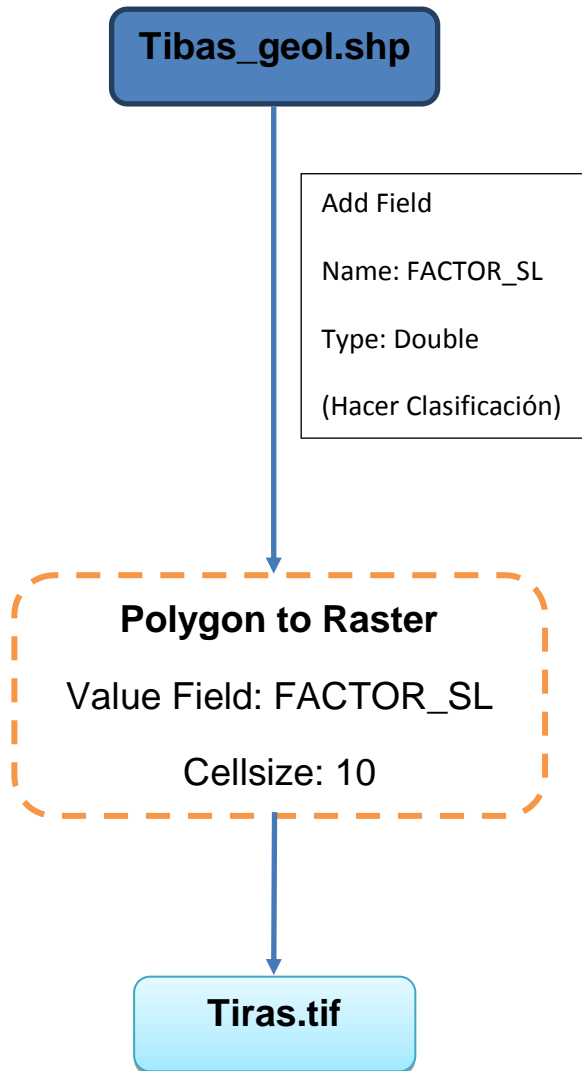
Anexo 2. Precipitación máxima diaria para diferentes períodos de retorno en años, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2015.

Estación	Período de retorno (mm)			
	5	25	50	100
Avance Tres Ríos	107,2046	141,5683	155,7988	169,9241
Hacienda Concepción	111,2455	155,2467	173,4682	191,5551
Hacienda La Laguna	95,9171	124,3667	136,1481	147,8424
Desamparados	102,5296	132,3418	144,6874	156,9418
San José	81,6487	108,0198	118,9404	129,7803
Cigefi	89,3790	120,4614	133,3330	146,1095
Cerro Zurquí	273,6553	374,9595	416,9110	458,5523
Sabana Norte	88,6725	114,4981	125,1928	135,8084
San Ramón de Tres Ríos	105,7449	137,8648	151,1660	164,3690
Barva	130,5125	175,9815	194,8109	213,5010
Cerro Escazú	97,6136	129,9840	143,3890	156,6949
San Luis de Santo Domingo	116,6006	161,4288	179,9928	198,4196
San Pedro de Coronado	119,8801	161,4265	178,6315	195,7092
Colima	88,2089	111,6488	121,3556	130,9907

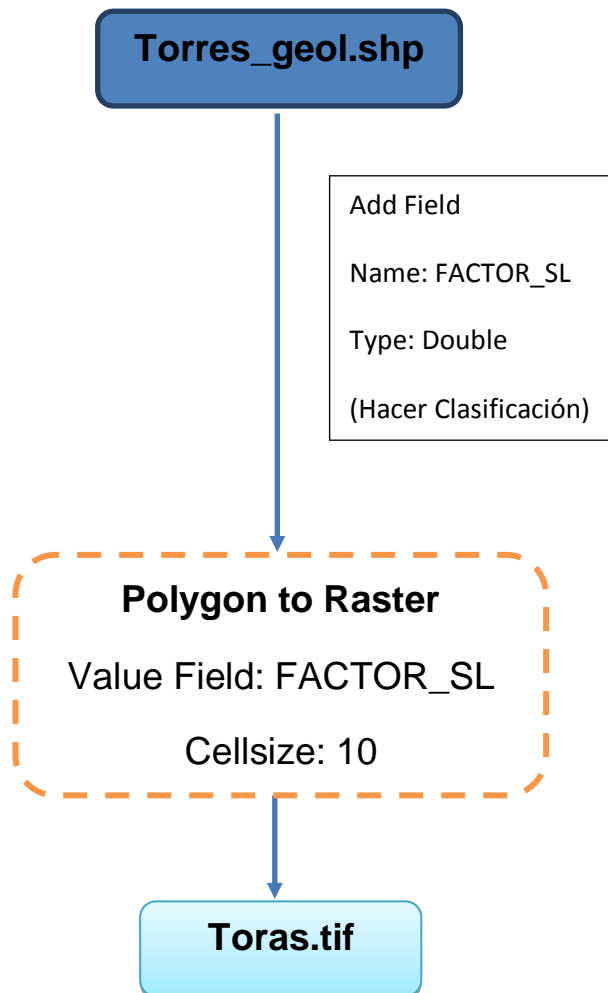
Anexo 3. Factor asignado por estación para un período de retorno de 100 años de la intensidad de lluvias en las microcuencas de los ríos Torres y Tibás, Gran Área Metropolitana, Costa Rica, 2015.

Estación	Período de retorno (mm) 100 años	Factor Tp	Clasificación
Avance Tres Ríos	169,9241	2	Bajo
Hacienda Concepción	191,5551	2	Bajo
Hacienda La Laguna	147,8424	2	Bajo
Desamparados	156,9418	2	Bajo
San José	129,7803	2	Bajo
Cigefi	146,1095	2	Bajo
Cerro Zurquí	458,5523	5	Muy alto
Sabana Norte	135,8084	2	Bajo
San Ramón de Tres Ríos	164,3690	2	Bajo
Barva	213,5010	3	Medio
Cerro Escazú	156,6949	2	Bajo
San Luis de Santo Domingo	198,4196	2	Bajo
San Pedro de Coronado	195,7092	2	Bajo
Colima	130,9907	2	Bajo

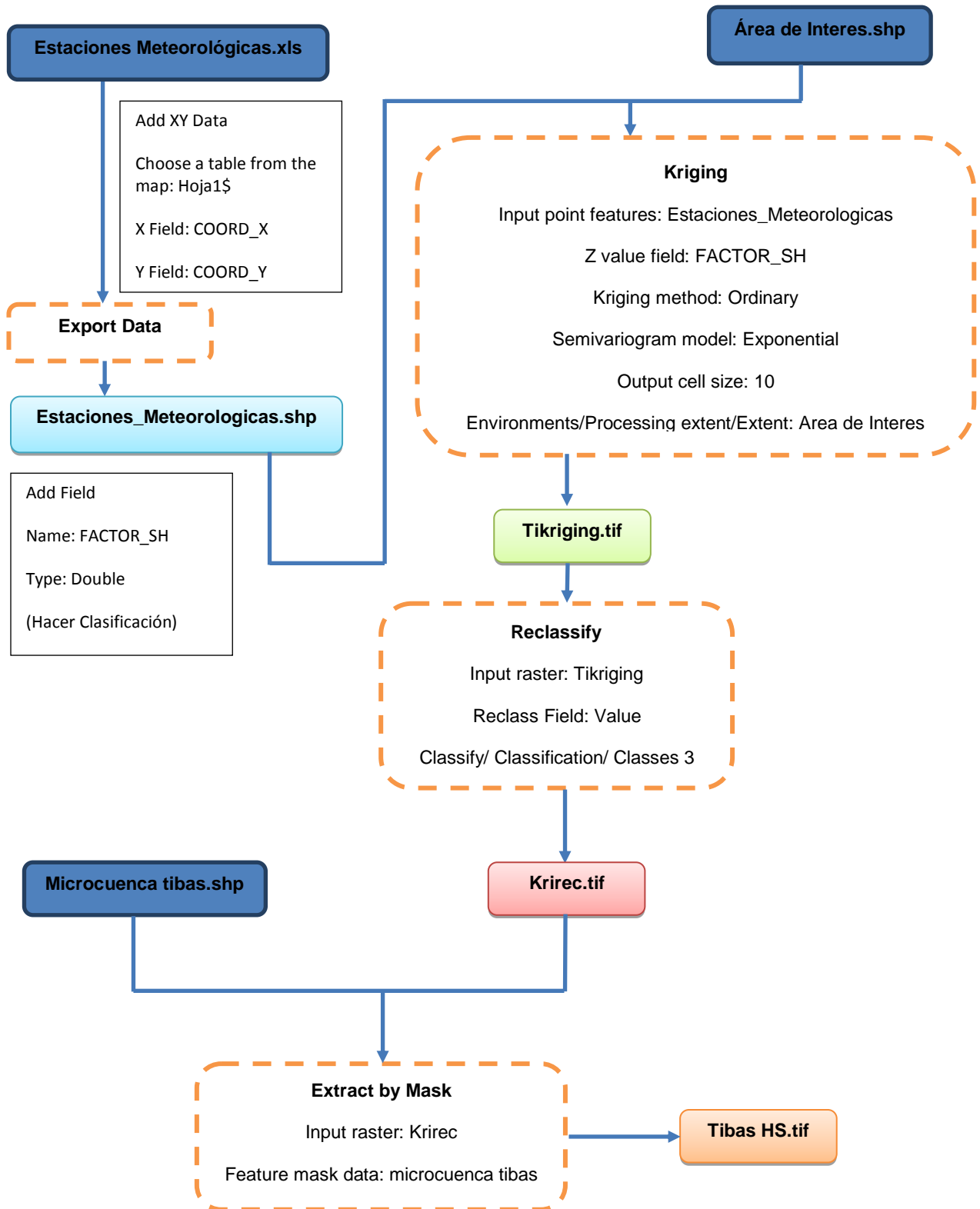
Anexo 4. Confección del modelo del factor litológico en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.



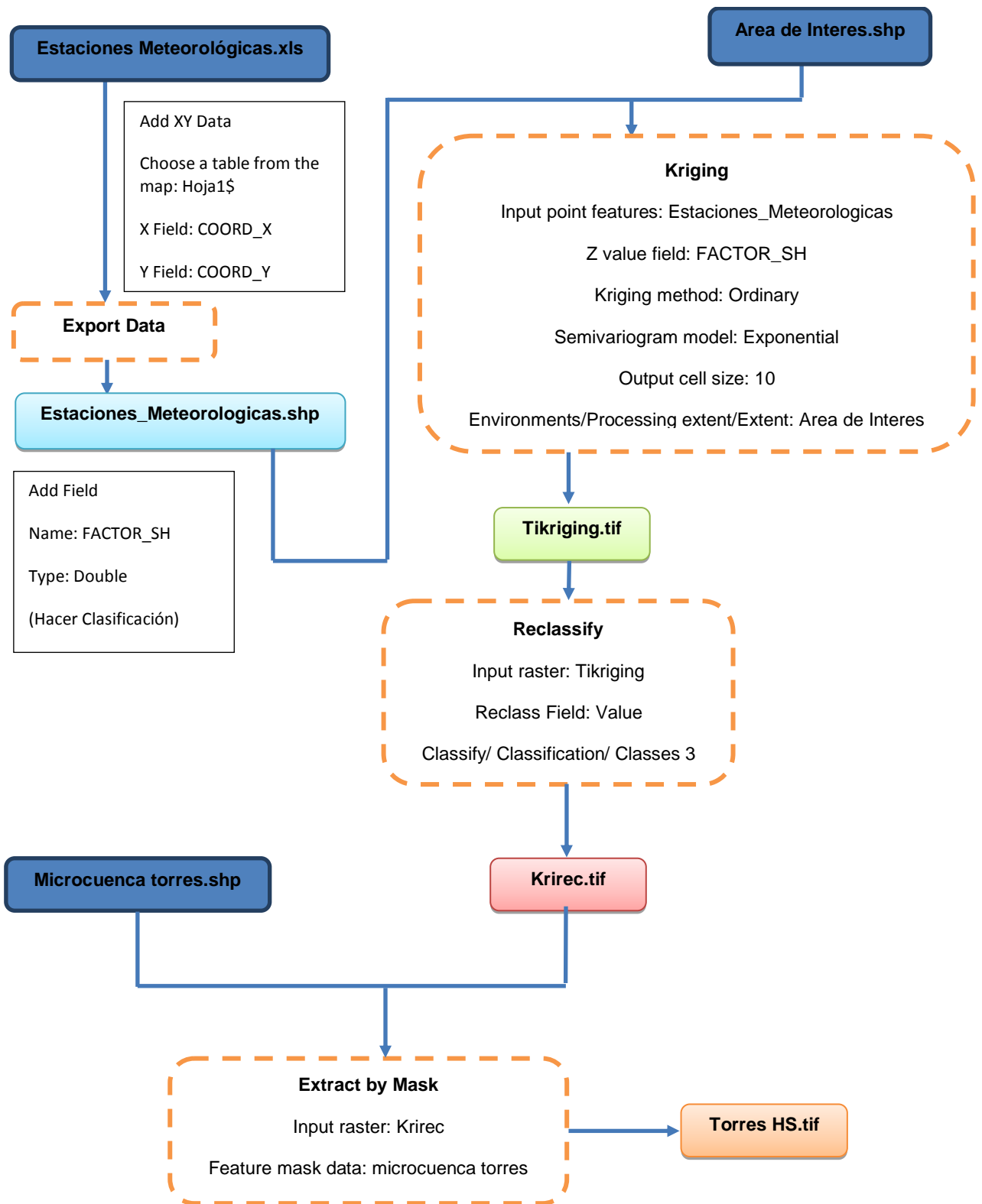
Anexo 5. Confección del modelo del factor litológico en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.



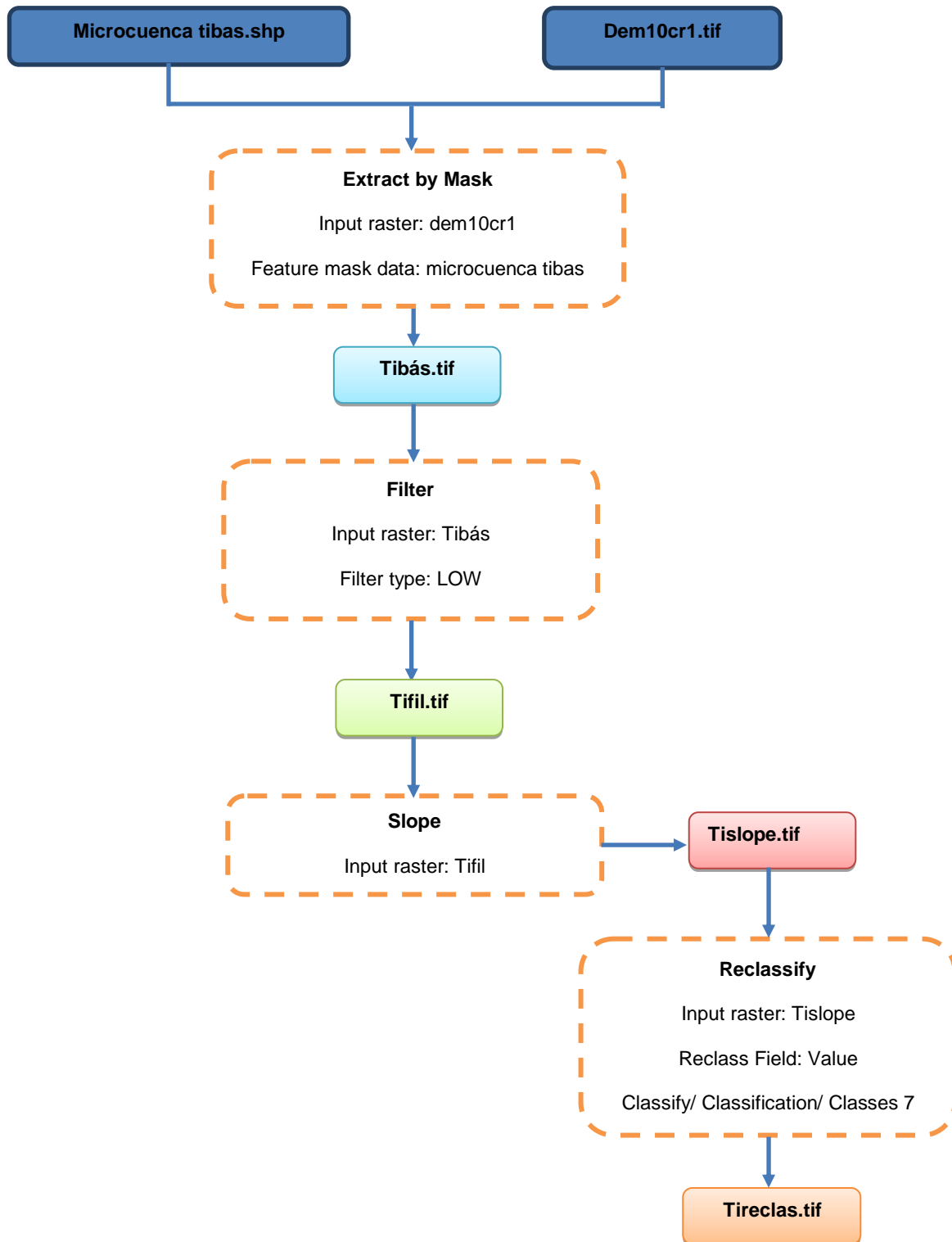
Anexo 6. Confección del modelo del factor humedad del suelo en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.



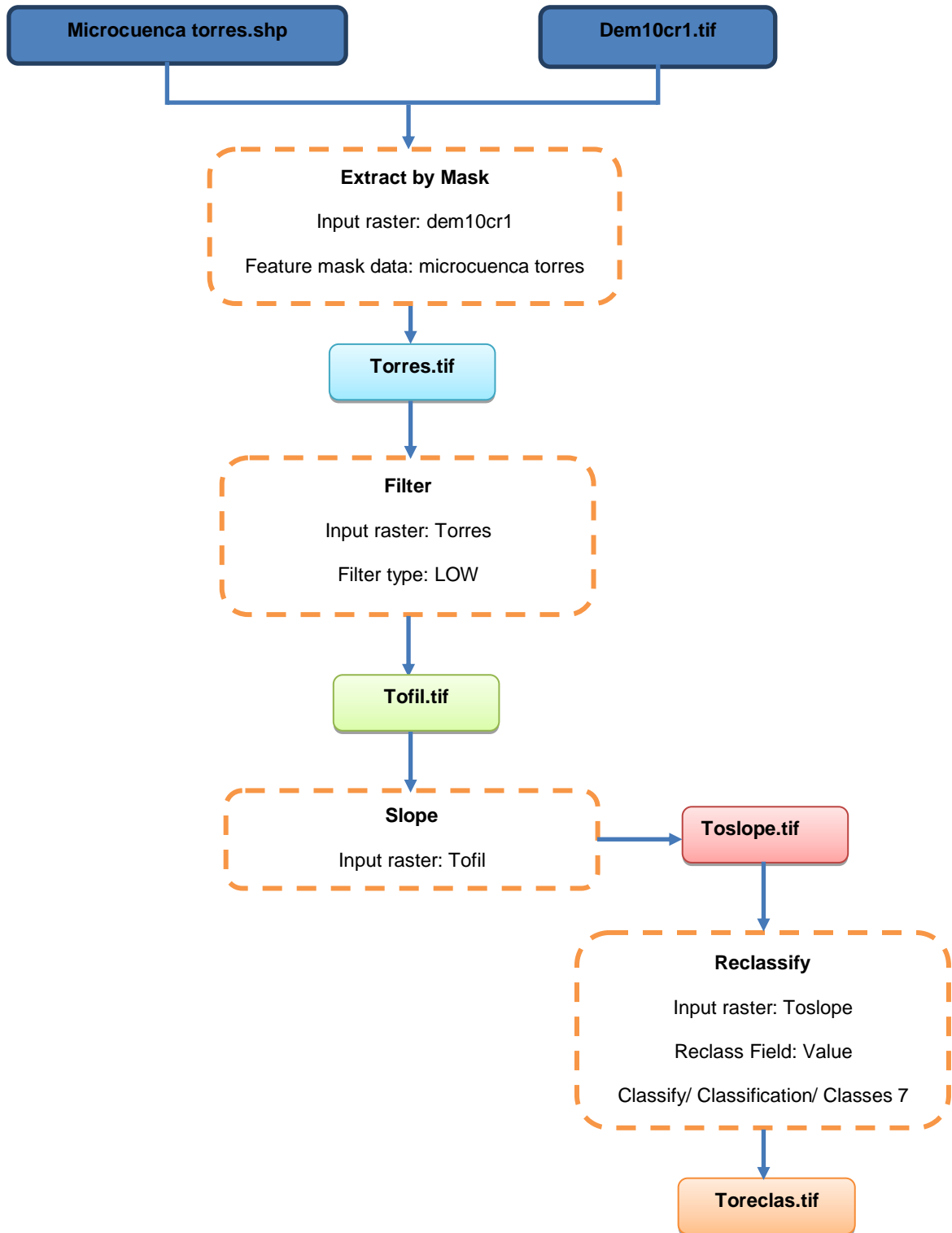
Anexo 7. Confección del modelo del factor humedad del suelo en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.



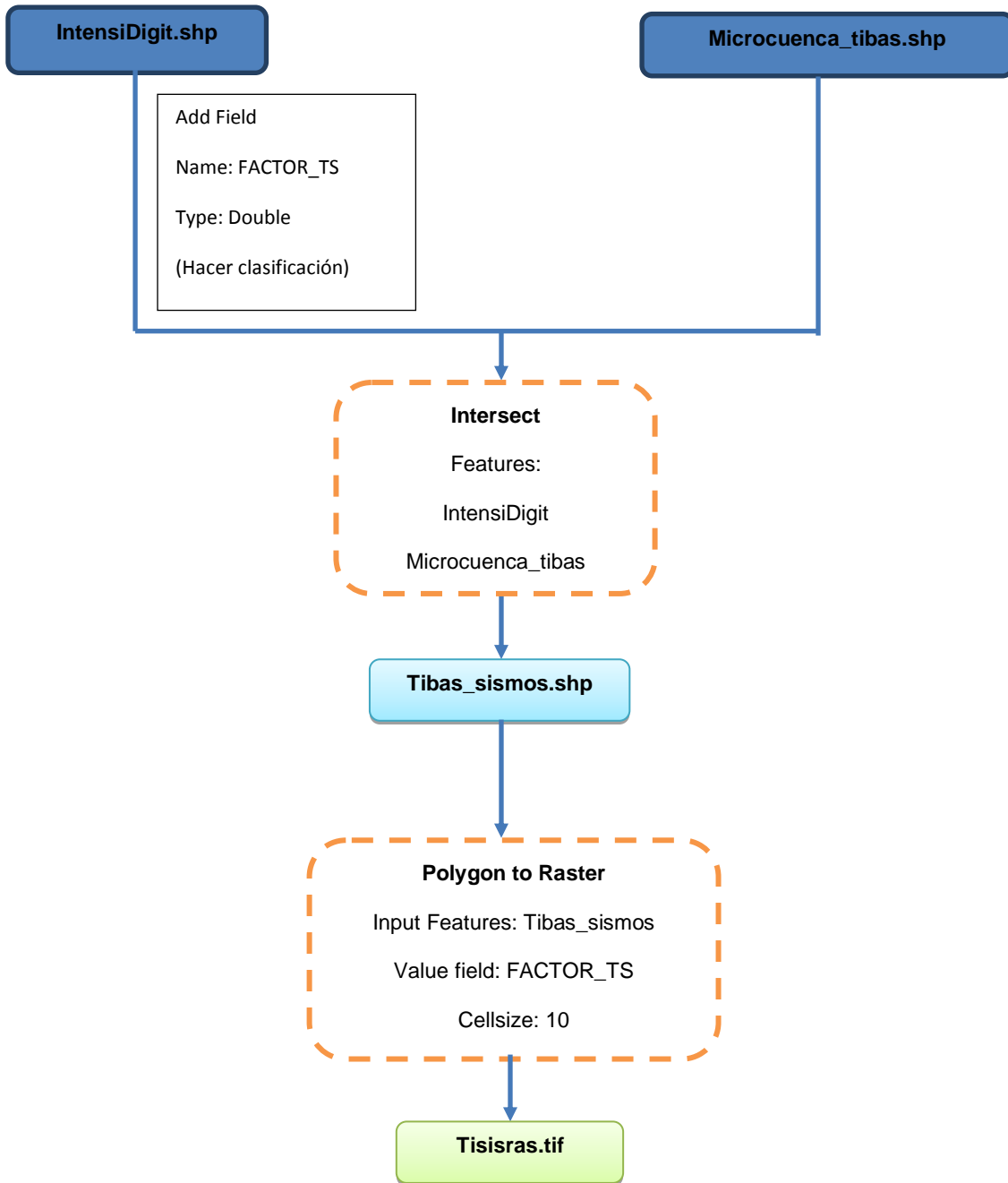
Anexo 8. Confección del modelo del factor pendiente en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.



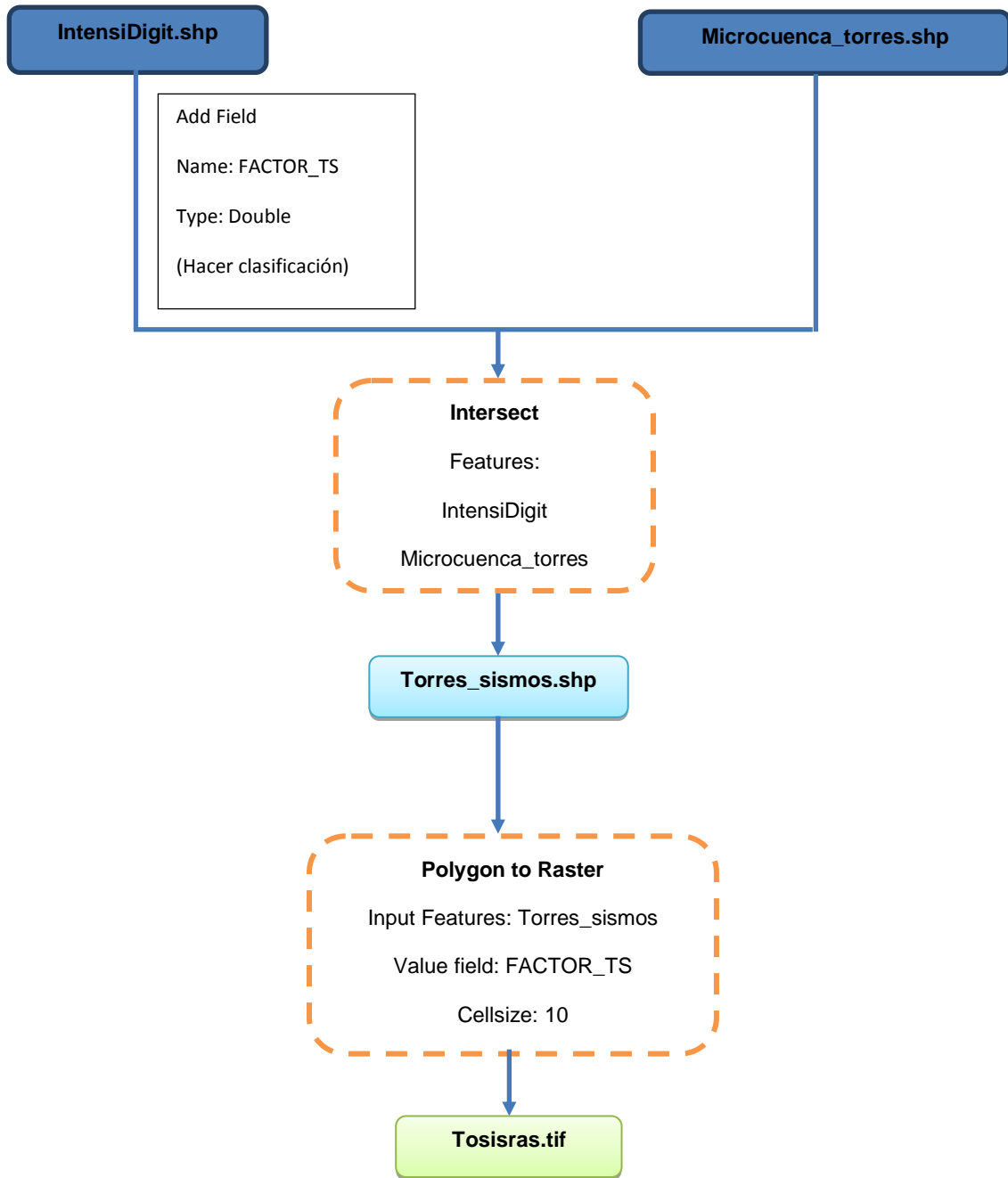
Anexo 9. Confección del modelo del factor pendiente en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.



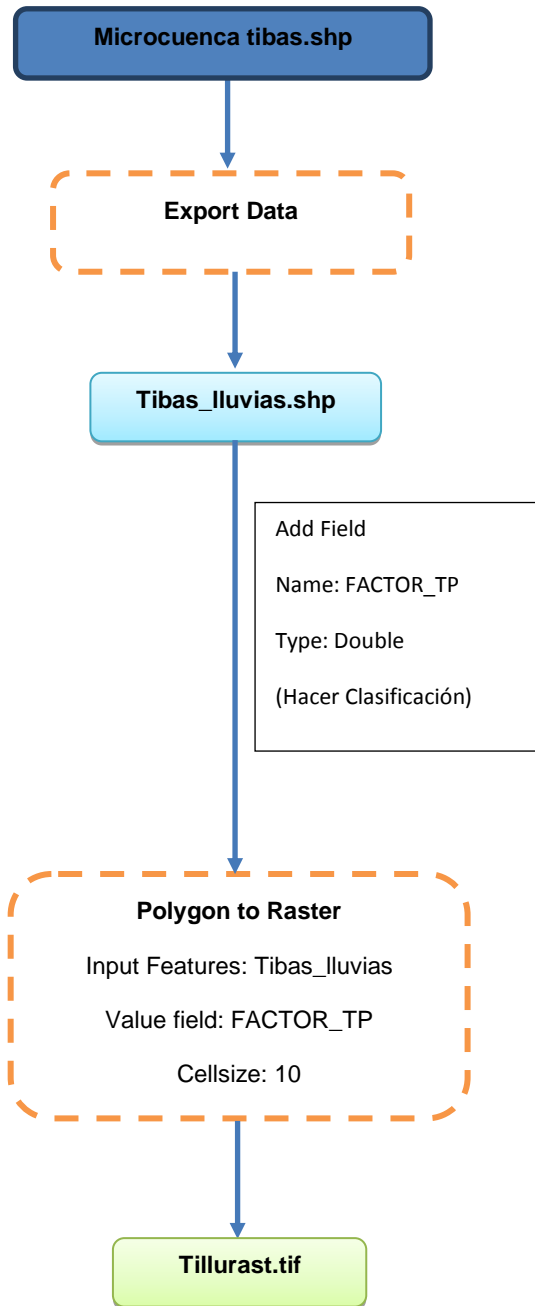
Anexo 10. Confección del modelo del factor intensidad sísmica en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.



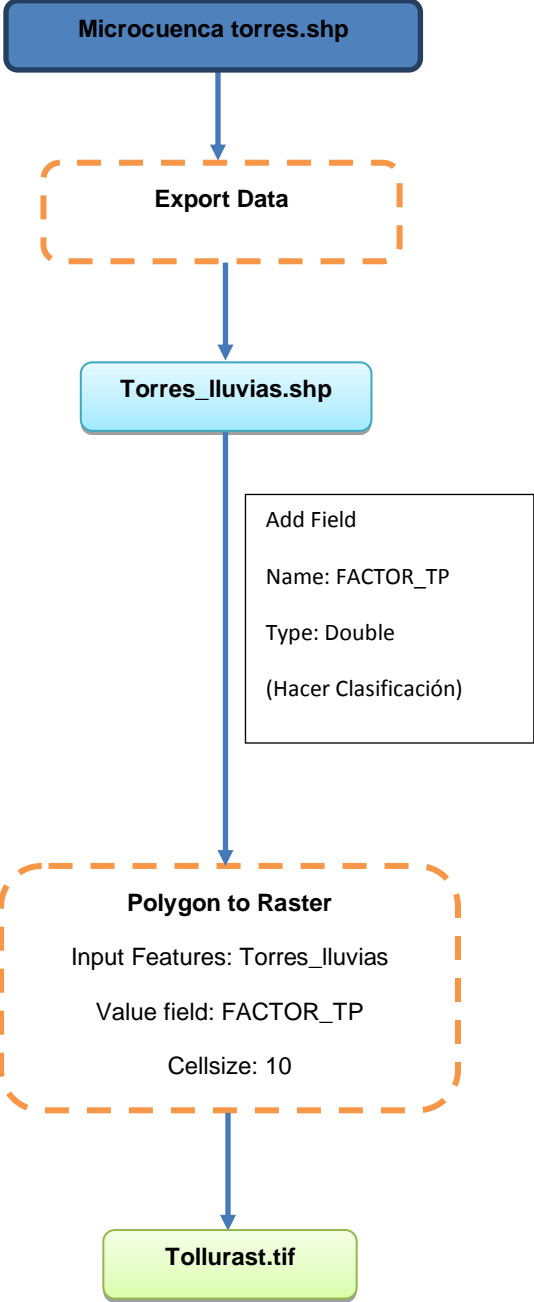
Anexo 11. Confección del modelo del factor intensidad sísmica en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.



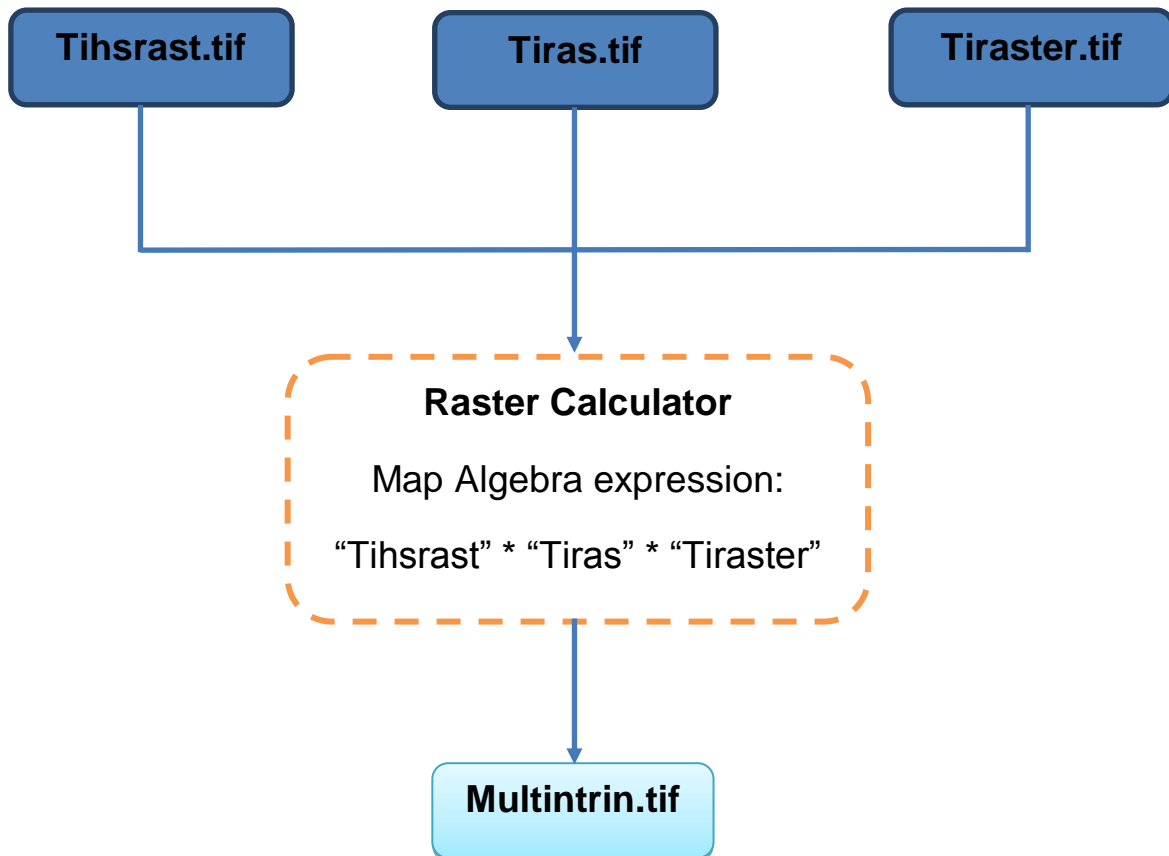
Anexo 12. Confección del modelo del factor intensidad de lluvia en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.



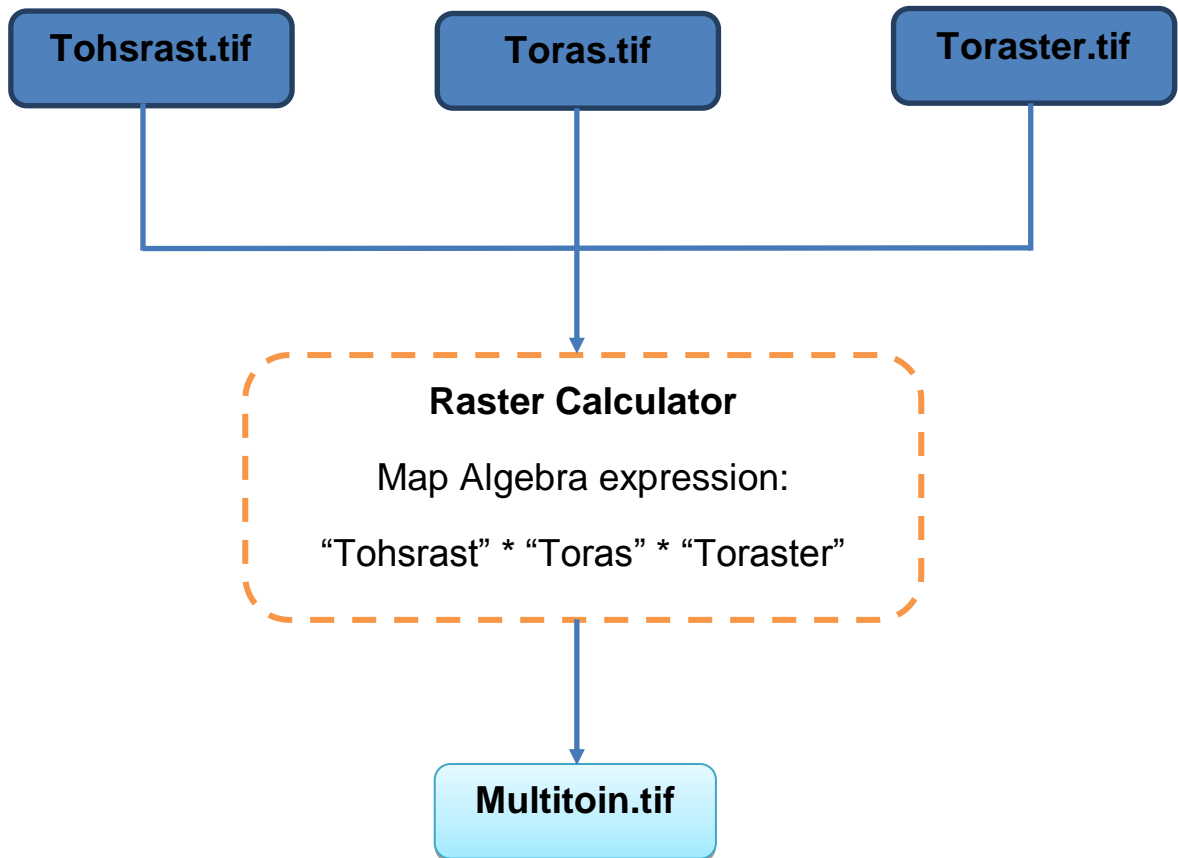
Anexo 13. Confección del modelo del factor intensidad de lluvia en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.



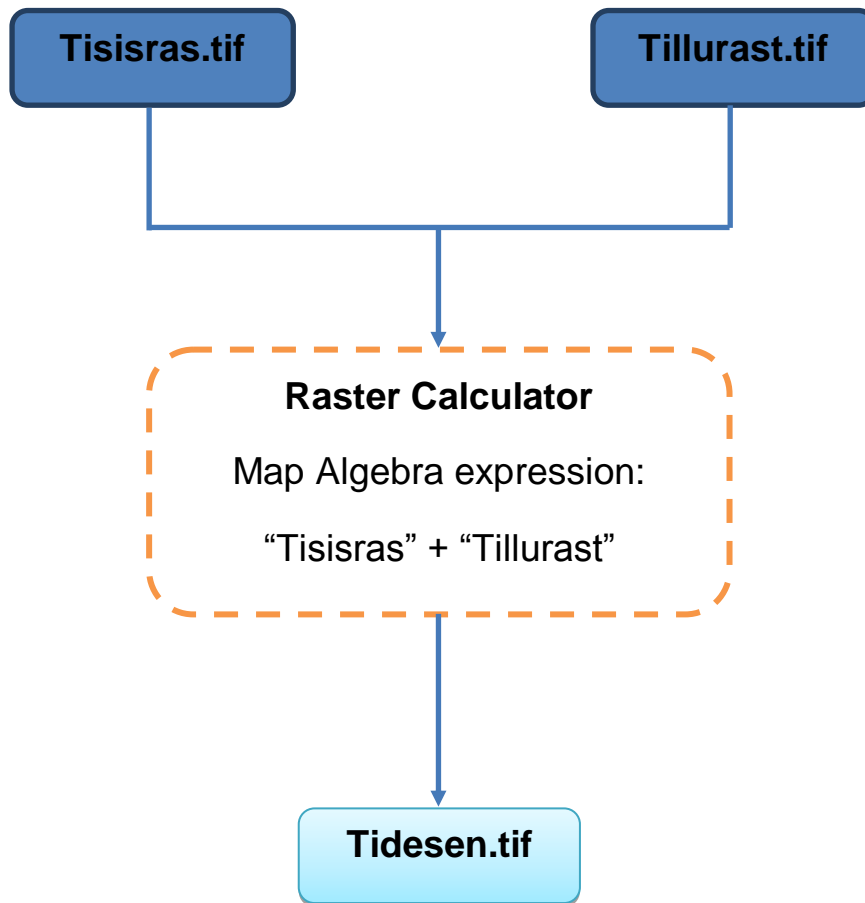
Anexo 14. Confección del modelo del factor intrínseco en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.



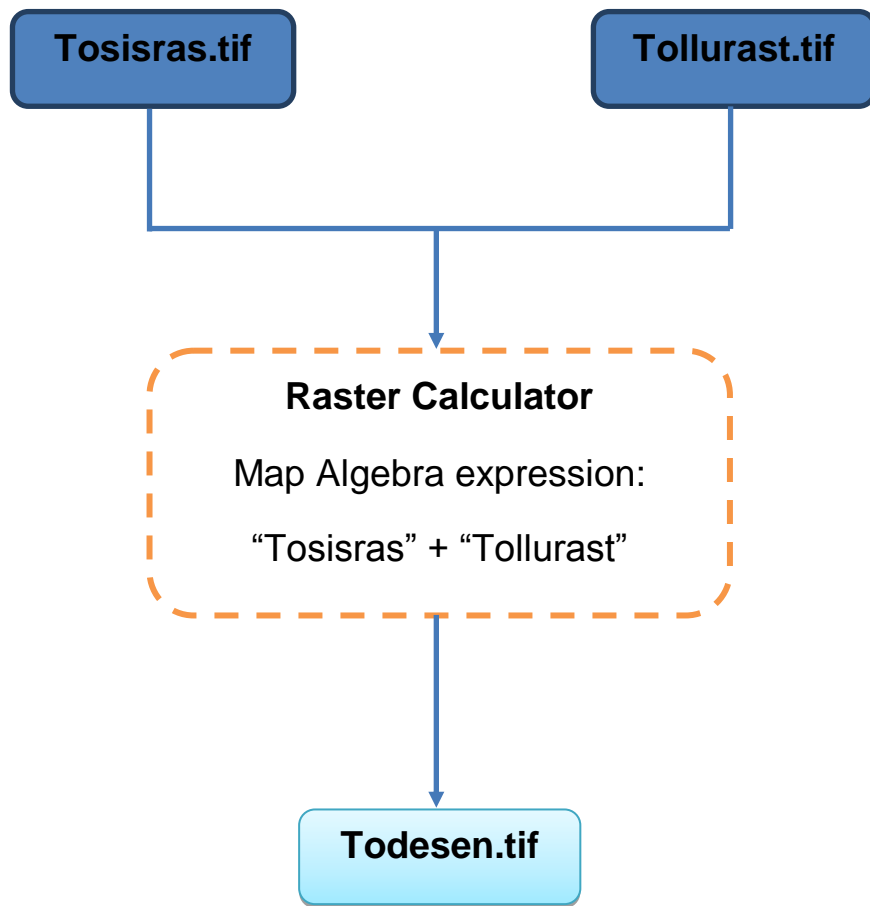
Anexo 15. Confección del modelo del factor intrínseco en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.



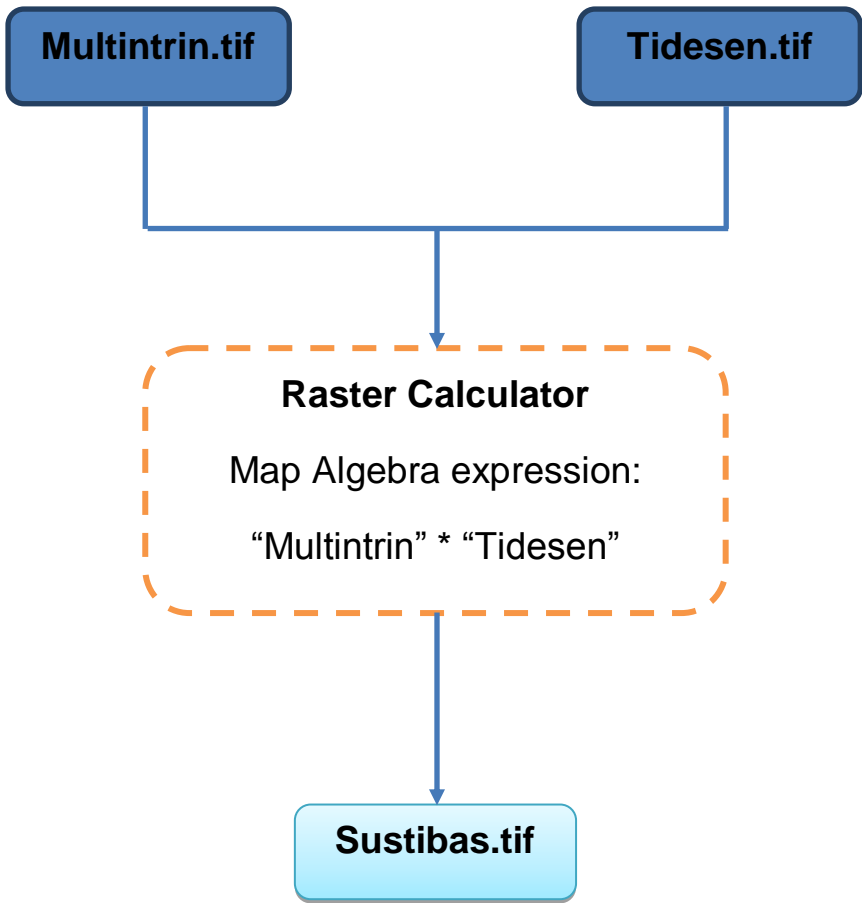
Anexo 16. Confección del modelo del factor desencadenante en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.



Anexo 17. Confección del modelo del factor desencadenante en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.



Anexo 18. Confección del modelo de susceptibilidad al deslizamiento en la microcuenca de río Tibás, Heredia, Costa Rica, 2015.



Anexo 19. Confección del modelo de susceptibilidad al deslizamiento en la microcuenca de río Torres, San José - Cartago, Costa Rica, 2015.

