

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ciencias Sociales

Escuela de Geografía

**DINÁMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN LORENCITO (RESERVA BIOLÓGICA
ALBERTO MANUEL BRENES) UTILIZANDO SENSORES DE ALTA RESOLUCIÓN TEMPORAL, 2015-2016.**

Vanessa Solano Rivera B06123

Sebastián Granados Bolaños A82814

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

2017

Tribunal Examinador

Director de Tesis

Dr. Christian Birkel

Lector Evaluador

MSc. Luis Guillermo Artavia Rodríguez

Lector Evaluador

MSc. Luis Guillermo Brenes Quesada

Lector Examinador

Dr. Rafael Arce Mesén

Lector Examinador

MSc. Francisco Solano Mata

Agradecimientos

A Christian Birkel, por darnos la oportunidad de ingresar al mundo de la investigación científica.

Su apoyo y confianza en nosotros fue esencial en el progreso de esta investigación.

A Luis Guillermo Artavia y Luis Guillermo Brenes, por sus detalladas revisiones y su acompañamiento en el proceso de Licenciatura.

Al personal de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes;
Lisbeth Ramírez, Olger Campos, Hugo Pérez, Koki Jiménez y Wilberth Villalobos,
por las facilidades y el apoyo que se nos brindó dentro de la Reserva.

A Carlos Méndez y Andrés Chavarría, por toda su ayuda durante las giras de campo.

Al programa Idea Wild y la Sociedad Geomorfológica del Reino Unido,
por el financiamiento necesario para la realización de esta investigación.

A nuestras familias y amigos, por su acompañamiento y apoyo en este extenso proceso.

Índice

Lista de Gráficos	vi
Lista de Cuadros	vi
Abreviaturas Utilizadas	ix
Resumen	x
Capítulo 1. Aspectos Generales	2
1.1 Introducción	2
1.2 Delimitación espacial	2
1.3 Delimitación temporal	4
1.4 Problema de investigación	4
1.5 Justificación	4
1.6 Objetivos	5
Objetivo general:	5
Objetivos específicos:	5
1.7 Hipótesis	6
1.8 Antecedentes	7
Capítulo 2. Marco teórico	10
Capítulo 3. Marco Metodológico	13
3.1 Trabajo de Campo	13
3.2 Trabajo de laboratorio y SIG	17
3.3 Análisis Estadístico	18
Capítulo 4. Caracterización Biofísica de la Cuenca	20
4.1 Ubicación geográfica	20
4.2 Climatología	22
	iv

4.3 Geología	23
4.4 Geomorfología Regional	24
4.5 Geomorfología Local	24
4.6 Morfometría de la cuenca del río San Lorencito	26
4.7 Pedología	26
4.8 Vegetación	28
Capítulo 5. Respuesta del río ante eventos de precipitación	31
5.1 Caracterización del período de estudio	31
5.2 Caracterización de los sedimentos del río San Lorencito.	38
5.3 Respuesta del río ante eventos de precipitación	43
5.3.1 Época lluviosa 2015 (antes del evento extremo)	43
5.3.2 La ocurrencia de un evento extremo dentro del año período de estudio.	44
5.3.3 Época lluviosa 2015 (después de un evento extremo)	45
5.3.4 Época seca 2016	47
5.3.5 Época lluviosa 2016	48
Capítulo 6. El rol de los eventos extremos en el transporte de sedimentos y la geomorfología fluvial	49
6.1 El rol de los eventos extremos en la dinámica temporal del transporte de sedimentos	49
6.2 El rol de los eventos extremos en la Geomorfología Fluvial	52
6.3 Origen de los sedimentos y conectividad ladera-río.	61
6.3.1 Aluviones y material de cauce	64
6.3.2 Material coluvial	65
Conclusiones	66
Recomendaciones	69
Bibliografía	71

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Morfología de las partículas de cuarzo de los sedimentos del río San Lorencito.....	40
Gráfico 2. Oxidación de las partículas de cuarzo de los sedimentos del río San Lorencito.....	40

Lista de Cuadros

Cuadro I. Eventos seleccionados para el año de estudio, principales características hidro-meteorológicas (10 variables) e índice de histéresis de Zuecco et al. (2016) y su clasificación (se omitieron las variables co-lineales).....	33
Cuadro II. Eventos seleccionados para el año de estudio, principales características hidro-meteorológicas (10 variables) e índice de histéresis de Zuecco et al. (2016) y su clasificación (se omitieron las variables co-lineales) (continuación Cuadro I).....	34
Cuadro III. Eventos seleccionados para el año de estudio, principales características hidro-meteorológicas (10 variables) e índice de histéresis de Zuecco et al. (2016) y su clasificación (se omitieron las variables co-lineales) (continuación Cuadro II).....	35

Lista de Figuras

Figura 1. a) Ubicación de la cuenca con b) detalle de la red hídrica y una imagen satelital que muestra la cobertura de la cuenca de interés. c) Fotografía viendo aguas arriba del río San Lorencito.....	3
Figura 2. Pendientes de la cuenca de interés y ubicación del equipo de monitoreo, de los sitios de muestreo y caracterización de suelos, erosión y sedimentos.	16
Figura 3. a)y b) Geología y estratigrafía de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes y la cuenca del río San Lorencito, y c) un modelo de elevación detallado de la cuenca; d) Régimen climático mensual basado en mediciones realizadas entre 2015 y 2016, y e) una imagen aérea de la cuenca.	21
Figura 4. Precipitación media anual.	22

Figura 5. Distribución espacial y textural de las muestras de suelos.	27
Figura 6. Horizonte superficial orgánico del suelo observado en la parte alta de la ladera A, muestra un profundo horizonte O y A, se puede apreciar la erosión por flujos de agua superficiales.	27
Figura 7. Perfil de suelo observado a un costado del cauce del río San Lorencito, en una terraza aluvial con pedogenésis incipiente. Se puede observar en la parte inferior de la imagen la presencia de cantos rodados, heterométricos y heteromórficos distribuidos caóticamente.	28
Figura 8. Altura de la vegetación e índice masa foliar (Saito, et al., 2001) de la cuenca del río San Lorencito.	30
Figura 9. Variación temporal registrada en una parcela de sedimentos dentro del cauce del río San Lorencito.	32
Figura 10. Serie de tiempo del año estudiado. a) Temperatura y evapotranspiración potencial de la serie de tiempo. b) Nivel de agua en metros y precipitación de la serie de tiempo. 1) Evento anterior al evento extremo, 2) evento extremo, 3) evento posterior al evento extremo 4) evento de época seca.	36
Figura 11. Movimiento de suelo detectado usando las varillas de erosión para el período de estudio, con la numeración de los puntos (ver Figura 1), principales características físicas (pendiente y altitud) y la precipitación acumulada entre mediciones. Los valores negativos representan erosión y los valores positivos representan deposición (acumulación de material)..	37
Figura 12. Distribución granulométrica anterior (izquierda) y posterior (derecha) a un evento extremo en el río San Lorencito y algunos de sus tributarios.	39
Figura 13. Índices para la determinación del tamaño medio de partícula de los sedimentos del río San Lorencito.	39
Figura 14. Valores de turbidez contra el tamaño de partícula para 23 muestras.	42
Figura 15. Concentraciones de arena con tamaños de partículas de arena finas (T70 y T80) y medias (T60) y limo grueso (T100). Nótese la poca capacidad de disolución y suspensión de las arenas.	42
Figura 16. Matriz de correlación que muestra histogramas, coeficientes de correlación (gris para negativos y negros para correlación positiva) y niveles de significancia (* p <0,9, ** p <0,95 e *** p <0,99) y gráfico xy punteados con una línea de tendencia Kernel del núcleo que indica posibles relaciones lineales y no lineales a) antes y b) después del evento extremo.	51

Figura 17. Flujo de retorno controlado por un plano de falla sobre brecha.....	53
Figura 18. Diaclasamiento sobre andesitas en una margen del río San Lorencito, estas recientemente impactas por el evento extremo.	54
Figura 19. Diaclasamiento expansivo sobre brecha meteorizada en las márgenes del río San Lorencito.....	54
Figura 20. Geomorfología 1:5000 de la cuenca del río San Lorencito.....	57
Figura 21. Horizonte de una terraza aluvial recientemente erosionada con evidencia de gran cantidad de material coluvial angular sobre su superficie e una incipiente pedogenesis en su superficie, la base de dicho perfil está compuesta por material aluvial heterogénico, heterolítico y caótico.	58
Figura 22. A la izquierda: perfil erosionado de una terraza aluvial compuesta por material caótico posiblemente depositado por una avenida aluvial pasada. Sobre su superficie un bloque posiblemente coluvial y vegetación de bosque. A la derecha: Perfil de terraza aluvial intensamente erosionado por el evento extremo. Nótese la vegetación sobre su superficie y una incipiente pedogenesis en su superficie.....	58
Figura 23. Depósito aluvial formado posterior al evento extremo.	59
Figura 24. Derrumbe de la formación superficial de ladera. Material coluvial ingresando directamente en el cauce posterior al evento extremo, el río al no tener suficiente competencia para transportar el depósito es forzado a desviarse y cambiar su cauce parcialmente. La longitud de dicho depósito es de aproximadamente 15 metros.....	59
Figura 25. Cambio en el cauce del río principal por incorporación de aluviones del tributario 2A tomada con un vehículo aéreo no tripulado a 120 metros de altitud.....	60
Figura 26. Sitio de ubicación de los sensores automatizados a la izquierda antes y a la derecha después del evento extremo. Nótese que el río modificó su cauce debido a la acumulación de aluviones tras ocurrido el evento extremo.....	61
Figura 27. Fuentes potenciales de sedimentos en la cuenca del río San Lorencito.	62
Figura 28. Fotografía que muestra la vista a través de un estereoscopio de arenas medias y finas con oxidación limonítica sesquióxidos de hierro y aluminio. A la izquierda arenas finas y medias de una muestra de suelo, a la derecha una muestra de arenas finas y medias del tributario 1B. Dicha muestra de arenas de suelo fue recolectada en una ladera de la cuenca del tributario 1B.	63

Abreviaturas Utilizadas

AWI3d	Humedad antecedente de 3 días en milímetros
AWI7d	Humedad antecedente de 7 días en milímetros
D	Duración de la precipitación en minutos
I _{max}	Intensidad máxima de la precipitación en mm/h
Hyst Class	Clase según el índice de Histéresis
Hyst Index	Índice de Histéresis
M	Magnitud de la precipitación en milímetros
NTU	Unidades Nefelométricas
P_TUlag	Tiempo en horas entre los picos máximos de precipitación y turbidez
P_WLlag	Tiempo en horas entre los picos máximos de precipitación y nivel de agua
ReBAMB	Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes
Tdry	Tiempo seco previo en horas
Tfmax	Tiempo desde el pico máximo hasta el final del evento lluvioso en horas
Timax	Tiempo desde el inicio del evento lluvioso hasta el pico máximo del en horas
Trec	Tiempo de recesión en horas
Trise	Tiempo de crecimiento máximo en horas
TUi	Turbidez inicial en NTU
TUmin	Turbidez mínima en NTU
TUmax	Turbidez máxima en NTU
TU_WLlag	Tiempo en horas entre los picos de turbidez y nivel de agua
WLi	Nivel inicial de agua en metros
WLmax	Nivel máximo de agua en metros
WLtmin	Nivel mínimo de agua en metros

Resumen

La formación geológica de Costa Rica está directamente relacionada con procesos volcánicos en muchas de sus regiones, dichas áreas están sometidas a intensos y constantes procesos climáticos y tectónicos que moldean y forman el relieve. La denudación, los procesos de erosión y transporte de sedimentos en cuencas volcánicas tropicales han sido poco investigados local e internacionalmente. Para generar conocimiento sobre la erosión y transporte de sedimentos en cuencas de origen volcánico se llevó a cabo una exhaustiva investigación que involucró el monitoreo por un lapso de un año (de junio 2015 a junio 2016) en la cuenca del río San Lorencito -una cuenca prístina sin intervención antrópica y protegida por la legislación costarricense (se ubica dentro de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes) con un tamaño de 3.2 km²- localizada en la Cordillera de Tilarán.

Se cuantificaron, utilizando sensores remotos de alta resolución temporal (5 min), variables meteorológicas y la respuesta del río ante eventos de precipitación. Se estudió la geomorfología de la cuenca y las características de los tributarios que forman la red de drenaje de la cuenca. Se analizó la composición granulométrica de los sedimentos y se hicieron análisis de suelos en laboratorio. Se pudo demostrar que hay una estrecha relación entre la estacionalidad climática, y la generación y transporte de sedimentos. Los eventos de precipitación con intensidades superiores a 30 mm/h activaron procesos de erosión laminar en las laderas que transportan sedimentos compuestos por arenas de diversas fracciones, limos y materia orgánica, los cuales se mueven a través de caminos preferenciales en ladera. Los patrones de histéresis mostraron que la respuesta de la cuenca es compleja y variable a lo largo del año, además de que difiere con comportamientos descubiertos en cuencas de otras regiones del mundo.

Durante el tiempo de estudio ocurrió un evento extremo, con un periodo estimado de retorno de 50 años, que cambió drásticamente la geometría del río principal y sus tributarios. Dicho evento generó y transportó más sedimentos que la totalidad del lapso de observación. El evento extremo cambió la dinámica temporal de transporte de sedimentos, sin embargo, esta regresó a su estado habitual después de tres meses; esto indica una alta resiliencia por parte de la cuenca y la normalidad de la ocurrencia de dichos eventos en períodos de tiempo muy largos. Análisis de

campo, fotointerpretación y procesamiento de imágenes satelitales mostraron contundentes evidencias de eventos extremos pasados, perfiles analizados de terrazas y profundas cicatrices de deslizamientos en laderas son evidencias de avenidas torrenciales holocénicas. A pesar de la gran cantidad de información generada en campo se determinó que la turbidez no es la mejor aproximación para determinar un flujo de masa de sedimentos, debido a la composición sedimentológica del material que transporta el río San Lorencito. Concluimos que el uso de sensores de alta resolución para el monitoreo de cuencas brinda nuevas formas de aproximación para el entendimiento de la geomorfología fluvial y la hidrología tropical bajo substrato volcánico.

Capítulo 1. Aspectos Generales

1.1 Introducción

Las zonas tropicales húmedas se caracterizan por presentar precipitaciones muy intensas, que incluso bajo bosques primarios pueden resultar en procesos rápidos de meteorización, desgaste y erosión desencadenados por el flujo superficial y consecuentemente en altas cargas sedimentarias. En estas cuencas, la dinámica de erosión-transporte-deposición tiende a ser rápida y variable debido a la heterogeneidad del clima, y las propiedades de los suelos y roca madre. Sin embargo estudios en zonas tropicales son escasos, principalmente en cuencas con un origen volcánico (Muñoz-Villers & McDonnell, 2012).

El estudio de estas dinámicas, en espacios poco o nada intervenidos por el ser humano, permite comprender la respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación y el reflejo de esta respuesta en el río, el papel de la cobertura boscosa en la generación de escorrentía o la intercepción de la lluvia y la evolución geomorfológica de la cuenca.

Mediante el uso de sensores de calidad de agua de alta resolución temporal automatizados y desplegados en campo se realizó, en la presente investigación, un análisis de la dinámica espacio-temporal del transporte de sedimentos en suspensión en la cuenca del río San Lorencito; una cuenca montañosa en estado natural. Los resultados, presentados más adelante, muestran relaciones y patrones que permitan caracterizar la dinámica del transporte de sedimentos y la influencia de variables geomorfológicas y pedológicas sobre la erosión en la cuenca de interés.

1.2 Delimitación espacial

El sitio de estudio corresponde a la cuenca del río San Lorencito, esta se ubica en el distrito Los Ángeles de San Ramón de Alajuela (ver Figura 1). La cuenca posee un área total de 3,21 km² y se encuentra en la Cordillera de Tilarán. Se caracteriza por poseer un relieve de origen volcánico terciario con modelado cuaternario. La totalidad de la cuenca se encuentra cubierta por bosque pluvial premontano (bp-P) con una vasta variedad de flora y fauna. En general, el promedio anual de precipitación es de 3461 mm, la temperatura media anual es de 21°C y la humedad relativa es

de 98% (UCR, ACCVC, Onca Natural, 2008).

La cuenca del río San Lorencito está circunscrita dentro de la cuenca del río San Lorenzo, éste último desfoga en el río San Carlos que es parte de la macrocuenca del río San Juan. El recurso hídrico generado en la cuenca del río San Lorencito se utiliza para la producción de energía hidroeléctrica y para el riego de plantas de exportación.

La cuenca del río San Lorencito se encuentra dentro de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes (ReBAMB), por tanto posee la categoría máxima de protección otorgada a las áreas de conservación dentro de la legislación costarricense; permitiendo únicamente actividades de investigación y educación ambiental dentro del área. Los bosques tropicales húmedos por lo general son remotos e inaccesibles para investigaciones hidrológicas de campo (Muñoz-Villers & McDonnell, 2012). Sin embargo, la ReBAMB ofrece facilidades de infraestructura y apoyo logístico para desarrollar investigaciones científicas. Una caracterización física detallada del sitio de estudio se presenta en el Capítulo III.

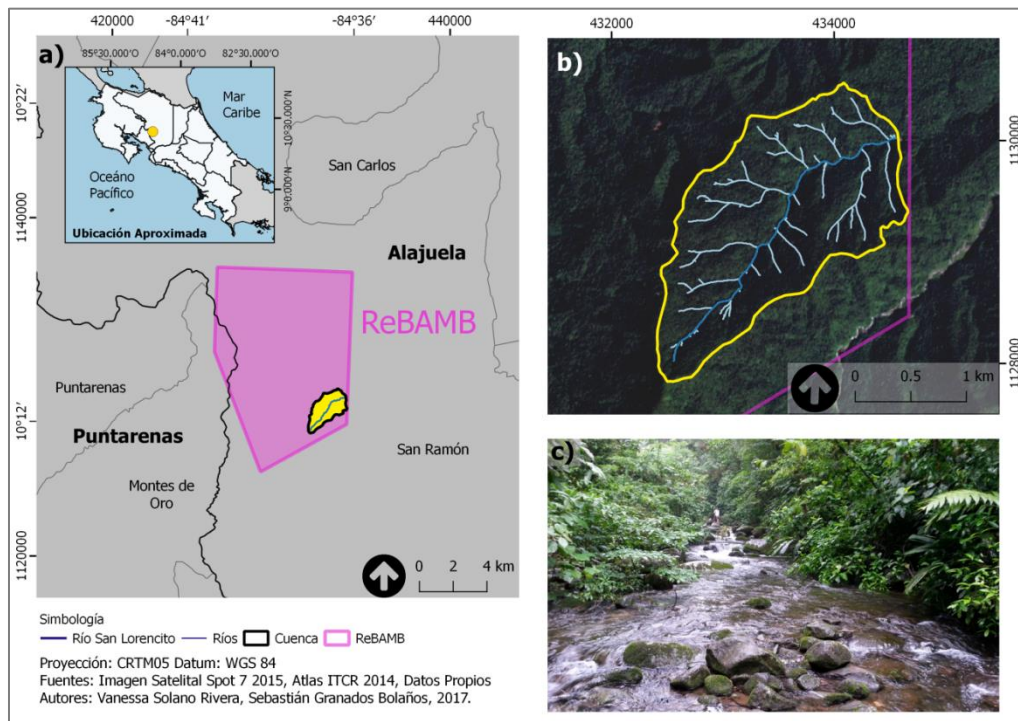


Figura 1. a) Ubicación de la cuenca con b) detalle de la red hídrica y una imagen satelital que muestra la cobertura de la cuenca de interés. c) Fotografía viendo aguas arriba del río San Lorencito.

1.3 Delimitación temporal

El año de estudio corresponde al período comprendido entre el 13 de Junio 2015 y el 13 de Junio 2016.

1.4 Problema de investigación

No existe información suficiente acerca del transporte de sedimentos en cuencas tropicales de origen volcánico en estado prístino para la gestión del recurso hídrico en términos de calidad del agua, manejo para actividades productivas y la gestión del riesgo.

1.5 Justificación

El conocimiento y la cuantificación del transporte y origen de sedimentos son limitados. Esto se debe, entre otras cosas, a la ausencia de equipo tecnológico que permita obtener bases de datos de calidad necesaria para la simulación y predicción de la variabilidad temporal de los procesos de erosión que interactúan en la formación de los relieves volcánicos. La mayoría de los estudios utilizando sensores remotos de alta resolución temporal se han llevado a cabo en zonas templadas y en cuencas urbanizadas (Shanley, McDowell, & Stallard, 2011), donde la generación de los sedimentos se ve influenciada por la actividad antrópica y la estacionalidad climática (Julien, 1998). En el caso costarricense, no existen publicaciones acerca de la caracterización del transporte de sedimentos utilizando dicha tecnología.

Conocer la dinámica de transporte de los sedimentos contribuye a la comprensión sobre el movimiento de los contaminantes y los nutrientes en ecosistemas donde predomina la morfogénesis fluvial. Los sedimentos por sí solos son una fuente de contaminación y reducen la calidad del agua; además, actúa como un catalizador y un medio de transporte y almacenamiento de otras formas de contaminación. Químicos nocivos y contaminantes tienen la capacidad de adherirse sobre y dentro de los sedimentos. Por ende, las partículas de sedimentos se han convertido en un tema de relevancia para la gestión ambiental (Julien, 1998). La cantidad de contaminantes disueltos que transporta un sistema fluvial está condicionada por la cantidad de sedimentos suspendidos y depositados en el río (Hudson-Edwards, 2007).

Altas tasas de generación de sedimentos ocasionan consecuencias negativas para la producción de energía hidroeléctrica. Los depósitos de sedimentos reducen el volumen de almacenamiento disponible para el agua, lo que se traduce en pérdidas económicas inmediatas y, posteriormente, en daños ambientales mediante soluciones poco amigables (Corrales, 2007). La falta de comprensión del transporte de sedimentos y la carencia de estadísticas al respecto ha generado que operen, en la región Latinoamericana, muchas obras hidráulicas que fueron construidas sin la información necesaria para el manejo adecuado de los sedimentos que entran al sistema (Jiménez, Farias, & Rodríguez, 2005). Conocer mejor la dinámica de transporte de sedimentos permite diseñar con mejor efectividad obras civiles como presas hidroeléctricas o proyectos de riego, entre otros.

En esta investigación se analiza el comportamiento de los sedimentos en suspensión en un bosque tropical prístino, ubicado en una zona de origen volcánico del período terciario; además, podría ser base teórica para futuras investigaciones relacionadas con la movilidad de contaminantes y nutrientes sobre geomorfología volcánica con condiciones climáticas similares.

1.6 Objetivos

Objetivo general:

Analizar la dinámica espacio-temporal del transporte de sedimentos en la cuenca del río San Lorencito.

Objetivos específicos:

1. Realizar una caracterización biofísica de la cuenca del río San Lorencito tomando en cuenta factores geológicos, geomorfológicos, suelo y la estructura de la vegetación.
2. Analizar la dinámica espacio-temporal de los sedimentos mediante la correlación entre precipitación, caudal, turbidez y masa de sedimentos en suspensión.

3. Identificar el origen de los sedimentos transportados por el río San Lorencito en el contexto biogeofísico de la cuenca de interés.

1.7 Hipótesis

- Dinámica temporal y cantidad de sedimentos

Hipótesis nula:

1. No existe relación directa entre la intensidad y duración de los eventos lluviosos y la cantidad de sedimentos transportados por el río.

Hipótesis alternativas:

1.1 En eventos de precipitación de baja intensidad y poca duración se genera una cantidad mínima de sedimentos para ser transportados.

1.2 En eventos de precipitación de baja intensidad y larga duración el río transporta una cantidad baja de sedimentos.

1.3 En eventos de precipitación de alta intensidad y poca duración se genera una cantidad máxima de sedimentos que se transportan por el río.

1.4 En eventos de precipitación de alta intensidad y larga duración la cantidad de sedimentos que se transportan por el río es en promedio intermedia, caracterizándose por ser alta al inicio y disminuir con el pasar del tiempo.

- Origen de los sedimentos:

Hipótesis nula:

2. El origen de los sedimentos transportados por el río San Lorencito no proviene de remoción en masa o desprendimientos de material rocoso en las laderas de la cuenca, erosión laminar generada por escorrentía superficial en las laderas de la cuenca, desgaste en las márgenes del cauce por el flujo hídrico o remoción de los bancos de sedimentos preexistentes en el cauce.

Hipótesis alternativa:

2.1 Los sedimentos que transporta el río San Lorencito provienen de eventos con relevancia diferenciada de remoción en masa y desprendimientos de material rocoso en las laderas de la cuenca, erosión laminar causada por escorrentía superficial en sus laderas, desgaste en las márgenes del cauce por erosión fluvial, la remoción de bancos de sedimentos preexistentes en el cauce.

1.8 Antecedentes

Con el pasar de los años, se ha notado un incremento en el interés por comprender las dinámicas de generación y transporte de sedimentos. La aparición de nuevas tecnologías ha permitido avances cuantiosos en este ámbito, como lo reconocen Kirchner, et al. (2004) al demostrar las ventajas de los muestreos con alta resolución temporal, que evitan el acumulamiento de muestras y reducen el tiempo de trabajo en laboratorio; además de generar nuevos hallazgos en la evolución de procesos a una resolución temporal mucho más fina que la utilizada con anterioridad. Al respecto, destacan la relevancia de los estudios hidroquímicos de alta precisión temporal para comprender la correlación existente entre las dinámicas químicas e hidrológicas de una cuenca y mencionan que entre los principales beneficios de esta clase de análisis se encuentra la comprensión de los procesos a diferentes escalas haciendo énfasis en las oscilaciones por evento, por día y por época climática.

A nivel internacional se han realizado investigaciones utilizando sensores de alta resolución temporal que comprueban lo expuesto por Kirchner, et al. (2004). No obstante, la mayoría de las experiencias se han desarrollado en zonas templadas, en cuencas intervenidas, donde la

perturbación humana acelera el proceso natural de erosión-transporte-deposición (Walsh et al., 2011). Las investigaciones realizadas en áreas boscosas no perturbadas son limitadas (Ver Zhang et al., 2010 como una excepción y revisión global por Zimmermann et al., 2012), pero demuestran la alta heterogeneidad y variabilidad en el comportamiento de las cuencas boscosas tropicales (Krishnaswamy, et al., 2001b).

Hudson (2003) realizó una investigación sobre la dinámica de sedimentos en la cuenca baja del río Panuco en México desde finales de la década de 1950 hasta inicios de los 90s. Los resultados de este estudio indican que las relaciones entre el caudal y los sedimentos en suspensión se encuentran dominadas por patrones de histéresis positivos (sentido horario), pero también muestran picos coincidentes y en menor medida patrones de histéresis negativos. Los análisis realizados indican, además, que cambios en la litología pueden resultar en cambios en la cantidad y tipo de sedimentos suspendidos. Esta investigación se vuelve clave en el entendimiento de los procesos de transporte de sedimentos en un drenaje tropical de gran tamaño.

En 2010, Duvert, et al. publican los resultados de una investigación anual sobre erosión y transporte de sedimentos en tres cuencas altas ubicadas en la zona montañosa central de México (cuencas Cointzio, Huertitas y La Cortina). Estos drenajes presentan algunas características comunes y proveen información sobre ambientes volcánicos cuaternarios, con una importante cobertura boscosa. Los resultados del estudio indican un comportamiento estacional del transporte de sedimentos, donde la salida de sedimentos se vio limitada, reiteradamente, por la capacidad de transporte del río durante la primera parte de la época lluviosa, mientras que un umbral mínimo de erosión del cauce se alcanzó usualmente al final de la temporada. Los autores recalcan la importancia de que se realicen nuevas investigaciones que busquen un mayor entendimiento de las dinámicas del transporte de sedimentos y su deposición a un nivel de sub-cuenca con el fin de generar conocimiento sobre el comportamiento de los sedimentos que se pueda aplicar a escala meso.

A nivel nacional, existen diversas publicaciones sobre la caracterización del transporte de sedimentos principalmente asociados a proyectos de generación hidroeléctrica (ver Jansson,

1992; Brandt, 1999; Brandt & Swenning, 1999). Sin embargo, estos se realizaron mayoritariamente con métodos robustos de muestreo; por tanto los datos generados no permiten un análisis detallado a una escala temporal oscilante entre eventos de precipitación y años hidrológicos. Algunas de las excepciones se mencionan a continuación.

Krishnaswamy, et al. (2001a, 2001b) analizaron los patrones espaciales de los sedimentos suspendidos de diferentes secciones de la cuenca del río Terraba en función de las características de los suelos, datos climáticos y aspectos geomorfológicos. Los autores determinaron la dinámica de flujo de sedimentos en relación con el uso del suelo y la hidro-climatología de la cuenca. Establecieron, además, que la oscilación del sur es la responsable de la variabilidad climática de la cuenca y, por ende, de la capacidad erosiva de los fenómenos hidro-meteorológicos (2001b). Concluyen, además, que para esta cuenca cambios en el uso del suelo y diferencias en la cobertura del suelo son responsables del 50-90% de la variabilidad anual en la generación de sedimentos (2001a).

Jansson (2002) realizó un estudio en la cuenca del río Pejibaye con el fin de determinar la fuente de los sedimentos que alcanzaron el río en cuatro eventos de precipitación. La autora encuentra que la relación entre la concentración de sedimentos y el caudal presenta una curva con sentido horario en tres de los cuatro eventos estudiados, y concluye que no es posible determinar el origen de los sedimentos analizando únicamente la forma de las curvas con sentido horario.

En la cuenca del río San Lorencito, área de interés en esta investigación, solamente se ha realizado un estudio relacionado con el proceso de generación-transporte de sedimentos. Veas (2009) aplicó un modelo para la estimación de la erosión laminar en las laderas de la cuenca. En este estudio se cuantificó la cantidad de sedimentos que se movilizan anualmente y se presenta un panorama general de los procesos de erosión. Sin embargo, el modelo hidrológico utilizado es difícilmente aplicable a resoluciones detalladas para comprender el movimiento de sedimentos a escalas temporales finas. Los resultados finales indican que anualmente la cuenca sufre una erosión aproximada de 35-40 ton/ha.

Capítulo 2. Marco teórico

A continuación una revisión de conceptos básicos necesarios para la comprensión de los resultados de esta investigación.

El ciclo global del agua puede ser descrito con nueve grandes procesos físicos que mantienen en constante movimiento el agua del planeta. Estos procesos corresponden a la evaporación, condensación, precipitación, interceptación, infiltración, percolación, transpiración, escorrentía y almacenamiento (NOAA, 2015). Tras sucedido gran parte del proceso el agua que se evaporó y condensó regresa a la superficie terrestre mediante la precipitación.

Las constantes precipitaciones incrementan la disponibilidad de agua, con lo que se promueven los procesos de meteorización y erosión del suelo, modelando paulatinamente el relieve y condicionando la cantidad de partículas de sedimentos que se encuentran en un río. La meteorización es el proceso de desintegración física y descomposición química de las rocas y sus minerales por agentes naturales (Arias, 2007). En los trópicos dominan las transformaciones químicas sobre las físicas en los materiales formadores de suelo, destacándose la hidratación, hidrólisis, oxidación, reducción y solución (Alvarado, 1985).

La erosión, en cambio, hace referencia al proceso de desgaste del suelo por efectos del viento, del agua y la gravedad, primordialmente. Las partículas de suelo son removidas de la superficie, trasladadas y posteriormente depositadas. Los agentes erosivos como el agua y la gravedad poseen energía potencial y/o cinética disponible que permiten llevar a cabo este proceso (García-Chevesich, 2008).

La erosión causada por el agua es conocida como erosión hídrica y se puede presentar superficialmente (erosión en ladera: laminar o difusa) o en profundidad (erosión en canales o cursos de agua: concentrada o lineal) (Csermák & Rákóczi, 1980). Los efectos de ambos tipos de erosión son muy diferentes entre sí, por el tipo de transformaciones que provocan.

Por otro lado, la erosión por gravedad hace referencia a la inestabilidad de una masa de suelo

pendientes pronunciadas y es desencadenada por el peso de las partículas de suelo. Usualmente la erosión gravitacional sucede en conjunto con la erosión hídrica durante eventos lluviosos, pero son mecanismos y dinámicas distintas los que las caracterizan (Xu et al., 2014). La erosión por gravedad se puede dividir en erosión por arrastre y remoción en masa.

Las partículas resultantes de la meteorización y erosión de los materiales al sufrir un proceso de transporte se convierten en sedimentos. Estos abarcan un gran rango de tamaños que cubre desde diminutas partículas hasta grandes rocas (MacArthur et al., 2008); y pueden transportarse por medio del agua, el viento y por efecto de la fuerza gravitatoria.

El transporte de las partículas se ve condicionado por las propiedades físicas y químicas de los sedimentos, y por la capacidad y competencia del río o quebrada. Entendiéndose capacidad como la cantidad total de material que puede llevar un río (Córdova, 2002); y competencia como el tamaño máximo de sedimentos que puede transportar un río (Waugh, 2002). Ambos conceptos están condicionados por el caudal disponible.

El transporte de sedimentos se puede clasificar en: movimiento en suspensión, movimiento de fondo y movimiento por disolución. En todos los casos la fuerza motriz para el transporte de sedimentos es la acción de la gravedad en la fase líquida, esta fuerza se transmite a las partículas a través de la fricción (García, 2008).

En el caso del movimiento en suspensión, las partículas se transportan por acción de la turbulencia del fluido que lleva las partículas a la parte alta de la columna de agua. Esta categoría se subdivide en dos: carga de lavado y carga de sedimentos de fondo. En esta ocasión, el término fondo hace referencia al fondo de la zona donde la suspensión es posible, de manera que no corresponde al lecho del río (García, 2008).

El movimiento de fondo se refiere al transporte de partículas de sedimento en una capa delgada por encima del lecho del río. Las partículas se movilizan deslizándose, rodando o saltando. Se considera que el lecho del río corresponde a una capa donde la turbulencia tiene un efecto muy bajo, por lo que la suspensión de los materiales en esta zona es imposible (García, 2008).

Al disminuir la energía de transporte y las fuerzas motrices que movilizan las partículas, estas se depositan y paulatinamente forman bancos móviles de sedimentos denominados depósitos de sustitución de carga. Estos pueden tener formas diversas, por ejemplo pueden ser planos, ondulados, presentar dunas y antidunas, e incluso los bancos pueden encontrarse en transición entre una y otra forma (Julien, 1998).

La presencia de sedimentos de diverso origen que se transportan y depositan dentro de un río afecta el estado del agua. La variabilidad de los indicadores de calidad del agua antes, durante y después de un evento lluvioso muestra los efectos del transporte de sedimentos en la dinámica usual de un río.

Los indicadores de calidad de agua corresponden a parámetros físicos, químicos y biológicos que determinan la pureza, la potabilidad, la presencia de contaminantes y otras características que permiten evaluar la calidad del agua para diversos usos. Los parámetros físico-químicos generan información específica de la naturaleza química y las propiedades físicas del agua, mientras que los factores biológicos aportan información sobre la vida acuática y las condiciones que determinan su relación con el medio acuoso (Samboni, Carvajal, & Escobar, 2007).

Algunos de los principales indicadores de calidad y contaminación del agua son la acidez, alcalinidad, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, sólidos (se refiere a la materia disuelta o en suspensión en un medio acuoso) (American Public Health Association. American Water Works Association. Water Environment Federation, 1999), temperatura y turbidez.

Debe destacarse que la turbidez *es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea remitida y no transmitida a través de la suspensión* (Romero, 1999). La turbidez en los cuerpos de agua es causada por material coloidal, en suspensión y disuelto como arcillas, limos, materia orgánica finamente dividida, plancton y otros microorganismos (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1999). El método más utilizado para medir la turbidez es el nefelométrico, en el cual se compara la intensidad de la luz dispersada por la muestra con la intensidad de la luz dispersada por una

suspensión estándar de referencia. Los resultados se expresan en unidades de turbidez nefelométrica (NTU por sus siglas en inglés) (Romero, 1999).

La turbidez presenta un comportamiento diferencial tanto a nivel de cuenca como de evento de precipitación; y depende entre otras variables del suelo y el material rocoso de la cuenca, de la cobertura del suelo y las dinámicas de respuesta de un río ante eventos de precipitación. Con el fin de facilitar la comprensión de este fenómeno óptico, que se encuentra ligado a procesos muy complejos, se utiliza un índice de histéresis. La histéresis, en sistemas geomorfológicos, corresponde a un fenómeno en donde dos o más valores de una variable dependiente están relacionados a un único valor de una variable independiente (Phillips, 2003 citado en Zuecco, et al., 2016). Los resultados del índice de histéresis se reflejan gráficamente en forma de curvas con direcciones positivas (sentido horario), negativas (sentido antihorario), o bien, con un patrón direccional poco claro que se refleja en forma de ocho. La interpretación de las curvas es variada, dependiendo entre otras cosas, del objetivo de su aplicación y de las variables utilizadas (Zuecco, et al., 2016).

Capítulo 3. Marco Metodológico

La realización de la investigación implicó la colocación de equipo especializado en la medición de variables relacionadas con la calidad del agua; trabajo de campo y de laboratorio, el análisis riguroso de series de tiempo, y la correlación e interpretación de los datos obtenidos durante los meses de recolección de datos y muestras.

3.1 Trabajo de Campo

Se establecieron diferentes acciones a seguir con el fin de lograr los objetivos planteados:

1. Se realizó, en la medida de lo posible, una gira por mes durante el período de estudio, con propósitos generales de monitoreo, caracterización y documentación de los fenómenos observados. Durante las giras se plantearon objetivos específicos de manera tal que se lograra cumplir con el estudio todos los parámetros que debían valorarse.

2. Se colocaron sensores de turbidez, temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y nivel de agua de marca Global Water, cuyos datos se registraron por el Global Logger GL500-7-2 cada cinco minutos. Estos sensores se ubicaron en una zona estratégica donde no se comprometió la calidad de los datos y al mismo tiempo se aseguró la integridad del equipo durante el tiempo de estudio (Mediciones hidrométricas en Figura 2).
3. Se obtuvieron datos climáticos cada 15 minutos durante el año de estudio de la estación climática Davis Vantage Pro 2 del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica. La estación se ubica aproximadamente 1 km noreste fuera de la cuenca de interés.
4. Se definió una sección de aforo y durante todas las giras se realizaron aforos en diferentes momentos para documentar la variabilidad temporal del caudal. Esta sección fue redefinida a los dos meses de iniciado el período de estudio, debido a la ocurrencia de un evento extremo en Agosto de 2015.
5. Se recolectaron muestras de agua del centro de la sección de aforo durante las giras de campo principalmente bajo eventos lluviosos y en algunas ocasiones se utilizó un muestreador automático (ISCO 3500) programado para obtener una muestra cada 24 h.
6. Se recolectaron muestras de sedimentos del cauce principal del río San Lorencito y algunos tributarios del mismo provenientes de ambas laderas (Figura 1).
10. Se realizó una descripción morfológica detallada de una sección del cauce principal y de algunos tributarios antes y después de un evento extremo ocurrido en Agosto 2015 (Figura 2), con el fin de observar cambios y diferencias debidas al evento lluvioso.
7. Se tomaron muestras de suelo en ambas laderas de la cuenca y a diferentes altitudes (Figura 2). El muestreo fue aleatorio y se fundamentó en las características particulares y el acceso a cada sitio.
8. Se colocaron varillas perpendiculares al suelo para medir los cambios en la superficie por erosión laminar en las laderas de la cuenca (García-Chevesich, 2008; Hancock & Lowry, 2015) (Figura 2). Estas tienen un diámetro aproximado de 0.64 cm y 60 cm de longitud. Se colocaron a una profundidad menor a los 20 cm en el suelo sin utilizar ningún tipo de mazo o martillo. En cada visita de campo se midió la longitud de las varillas para determinar la pérdida o ganancia de suelo se determinó según los valores obtenidos en las mediciones anteriores, además se obtuvo el valor neto de deposición o erosión en cada punto (Hancock

& Lowry, 2015). Se colocaron varillas del mismo diámetro y a la misma profundidad en bancos de sedimentos a las orillas del cauce, con el fin determinar variaciones en el nivel de los sedimentos y cuantificar el movimiento de los sedimentos en algunos sitios.

9. Se delimitó una parcela de observación de sedimentos en un margen del río para determinar la movilidad de las arenas y la morfología de los bancos de sedimentos. Se midieron los bancos de sedimentos emergidos para calcular su área y se analizó la evolución de los bancos de sedimentos con ayuda del software CivilCAD 2014. Además, se marcaron rocas dentro del cauce del río de distintos diámetros con pintura para determinar la movilidad de los bloques en el tiempo y determinar la relación del nivel de agua con la capacidad para transportar bloques.

10. Se realizó un levantamiento de campo de algunos deslizamientos y derrumbes observados luego del evento extremo de Agosto 2015 para estimar su volumen y analizar la composición de materiales (Figura 2).

11. Se analizaron 12 perfiles de terrazas aluviales fueron para determinar la ocurrencia de eventos extremos pasados.

12. Mediante el uso de un drone DJI Phantom 4 Pro se realizó un vuelo a 120 m de altitud sobre varios sectores de interés particular para hacer comprobaciones en estructuras geomorfológicas y observar a mayor escala la cobertura vegetal, el cauce y las características morfológicas de algunas secciones del río San Lorencito.

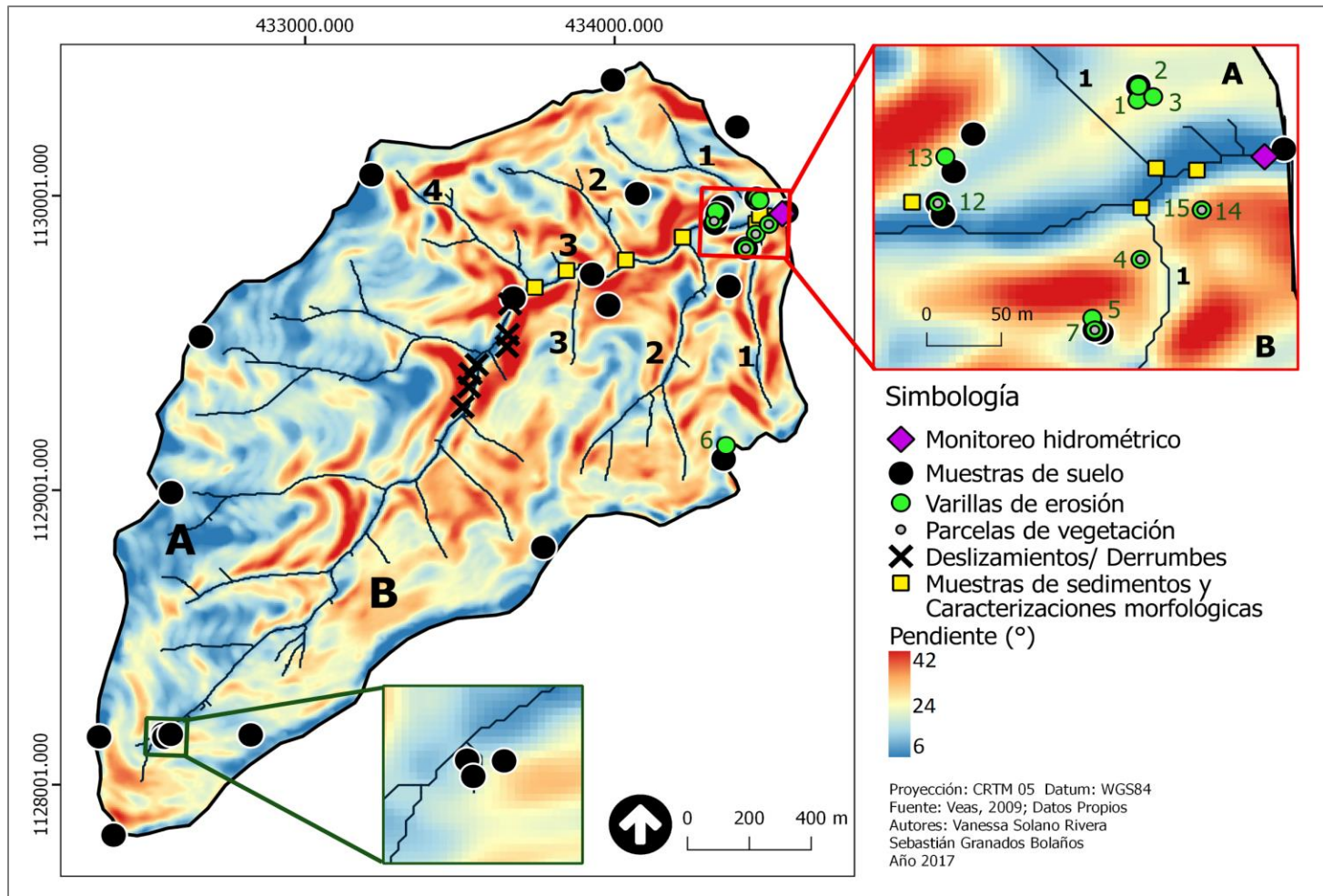


Figura 2. Pendientes de la cuenca de interés y ubicación del equipo de monitoreo, de los sitios de muestreo y caracterización de suelos, erosión y sedimentos.

3.2 Trabajo de laboratorio y SIG

1. Se generó una curva de desgaste con el fin de relacionar el caudal con el nivel de agua del río; sin embargo, el resultado mostró una incertidumbre muy grande ocasionada por un evento extremo ocurrido en Agosto de 2015 y el cambio en la ubicación de la sección de aforo a los dos meses de iniciado el estudio. La curva de desgaste al no mostrar la precisión deseada fue descartada, pues los datos crudos de nivel de agua presentaban una similitud mayor con el comportamiento real del río.
2. Se determinó el total de sólidos suspendidos y sólidos disueltos, y el porcentaje de materia orgánica que se encuentra en dichos sedimentos para cada una de las muestras de agua recolectadas en el centro del río, en la sección de aforo (American Public Health Association. American Water Works Association. Water Environment Federation, 1999). Esto con el fin de establecer una curva de calibración que permitiera convertir de manera automática los valores de turbidez en magnitudes de masa, volumen y concentración. Sin embargo la escasez de sedimentos en las muestras recolectadas no permitió generar un curva de calibración con la precisión deseada, por lo que se descartó.
3. Se realizó un experimento en el laboratorio para relacionar los valores de turbidez con los diferentes tamaños partícula. Para ello se separaron 23 muestras de sedimentos por tamaño de partícula, de 0.045 a 8 mm, usando un grupo de 19 tamices marca Fisher Scientific Company. Se colocó un gramo de cada muestra en un beaker con 1 L de agua destilada. Las muestras se mantuvieron en constante agitación a 180 rpm durante 15 minutos y se midió su turbidez cada 5 segundos.
4. Se determinó la distribución granulométrica de los sedimentos del cauce principal y algunos tributarios (ver tributarios numerados en Figura 2) y se realizó una morfoscopía de los cuarzos con el fin de determinar morfología y niveles de oxidación (Solano, 2007). Esto permitió obtener datos sobre el origen y el estado de los sedimentos, analizar su distribución espacial y poder establecer relaciones con la geomorfología, la geología y el suelo de la cuenca de interés.
5. Se realizaron cinco morfoscopías de cuarzos comparativas entre arenas finas (0.063mm) y medias (0.63mm) provenientes de tributarios y de los suelos de las laderas para determinar

similitudes en la morfología y oxidación de sus partículas. Las arenas utilizadas fueron previamente tratadas con H_2O_2 en agitación constante para remover la materia orgánica, luego se lavaron y secaron para que estuviesen listas para las morfoscopías.

6. Las muestras de suelo provenientes de las laderas se sometieron a trabajo de laboratorio y se determinaron las siguientes características: textura (mediante el método Bouyucos), pH, estructura, porcentaje de materia orgánica -mediante el uso de H_2O_2 - y color, con el fin de determinar relaciones de los sedimentos transportados por el río con la erosión laminar de las laderas (Henríquez & Cabalceta, 2012). Los resultados obtenidos para la textura de suelos se complementaron con el muestreo realizado por Néstor Veas (2010), la diferencia metodológica para determinar los porcentajes de arcillas, limos y arenas (Bouyucos vs Pipeta Robinson) no generan errores de importancia (Norambuena, Luzio, Vera, 2002).

7. Haciendo uso de un modelo digital de terreno (WorldDEM DTM), un modelo digital de superficie (WorldDEM DSM) y una imagen satelital SPOT 7 del 25 de Febrero de 2015 se obtuvieron datos de altura de la vegetación y del índice de masa foliar para conocer datos sobre la densidad de vegetación. Además se realizó un mapa geomorfológico, para lo cual también se usaron datos de topografía.

3.3 Análisis Estadístico

Para facilitar el procesamiento de los muestreos realizados y datos obtenidos, se separó la cuenca en ladera A y ladera B, y se enumeraron los tributarios estudiados de 1 a 4 en el caso de la ladera A y de 1 a 3 en la ladera B como se observa en la Figura 2.

Realizado todo el trabajo de campo y laboratorio se entró en una etapa de análisis, correlación e interpretación de los datos obtenidos tanto en el campo como en el laboratorio. Para iniciar dicho análisis el primer paso a seguir correspondió a la creación de una base de datos temporalmente continua que incluyó la información numérica proveniente de los sensores dentro del río y de la estación climática. Posteriormente se realizó la selección de los eventos lluviosos haciendo uso de los datos de precipitación y nivel de agua. El comienzo de la precipitación se definió como el inicio del evento lluvioso y el final de la curva de recesión del nivel de agua significó la culminación del evento. Los eventos seleccionados se separaron

posteriormente por época seca y lluviosa y pre-post evento extremo (evento observado en Agosto 2015).

Inicialmente se establecieron 26 variables para caracterizar cada evento mediante estadística descriptiva: *Humedad Antecedente*: Tiempo seco previo -Tdry (h), Humedad antecedente 3 días -AWI3d (mm), Humedad antecedente 7 días -AWI7d (mm); *Precipitación*: Magnitud -M (mm), Duración -D (h), Intensidad Máxima -Imax (mm/h); *Nivel de agua*: Nivel inicial -WLi (m), Nivel mínimo -WLtmin (m), Nivel Máximo -WLmax (m), Crecimiento máximo (m), Tiempo de crecimiento máximo -Trise (h), Tiempo desde el inicio hasta el pico máximo -Timax (h), Tiempo desde el pico hasta el final -Tfmax (h), Tiempo entre los picos de Precipitación y Nivel de Agua -P_WLlag (h); *Turbidez*: Turbidez inicial -TUi (NTU), Turbidez Mínima -TUmin (NTU), Turbidez Máxima -TUmax (NTU), Crecimiento máximo (NTU), Tiempo de Crecimiento Máximo -Trise (h), Tiempo de Recesión -Trec (h), Tiempo del inicio al pico -TUimax (h), Tiempo del pico al final -TUfmax (h), Tiempo entre los picos de Precipitación y Turbidez -P_TUlag (h), Tiempo entre los picos de Turbidez y Nivel de Agua -TU_WLlag (h). Dentro de las variables no fue posible incluir datos de caudal debido a que la curva de desgaste que se realizó para relacionar el caudal con el nivel de agua presentó incertidumbres significativas generadas por un evento extremo y el cambio de la sección de aforo a los dos meses de iniciado el año de estudio.

Las dinámicas temporales se visualizaron gráficamente haciendo uso de los datos de precipitación, nivel de agua y turbidez. Se aplicó el índice de histéresis de Zuecco et al. (2016) usando el nivel de agua como la variable independiente y la turbidez como la variable dependiente.

Posteriormente, haciendo uso del índice de correlación de Spearman y el Análisis de Componentes Principales, se disminuyó a 10 el número de variables ambientales (Tdry, AWI7d, M, D, Imax, Range -nivel de agua y turbidez-, P_WLlag, P_TUlag, TU_WLlag) con el fin de reducir la co-linealidad, y para buscar relaciones que pudieran explicar potencialmente la dinámica precipitación-escorrentía-sedimento del sitio del estudio.

Se utilizaron las distribuciones de tamaño de partícula acumulativo, la forma y el nivel de

oxidación de las muestras de sedimento para analizar las diferencias entre el río y los tributarios antes y después del evento mayor en Agosto de 2015. Se aplicó una prueba estadística comparando dos grupos independientes para determinar la existencia estadística de cambios significativos asociados al evento. Se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis a los datos de sedimentos para determinar la evidencia estadística de cambios significativos asociados a los eventos de lluvia y época seca, y el evento extremo.

Se aplicaron los índices de Otto, Folk & Ward y Mac Cammon para la determinación del tamaño de medio de partícula de los sedimentos del río San Lorencito para describir la distribución granulométrica de las partículas.

Capítulo 4. Caracterización Biofísica de la Cuenca

4.1 Ubicación geográfica

La cuenca del río San Lorencito está ubicada en el distrito Los Ángeles de San Ramón de Alajuela, dentro de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes Mesén (ReBAMB) (Figura 3a). La ReBAMB abarca 7800 hectáreas, y existe como área protegida desde el año 1975 en que fue declarada como Reserva Forestal. Mediante el decreto ejecutivo N° 20172-M del 24 de enero de 1991 esta área pasó a ser una Zona Protectora (Salazar-Rodríguez, 2000), y finalmente en 1993 se cambió su categoría de manejo a Reserva Biológica mediante la Ley 7354 (Ley de Creación de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes (San Ramón)).

El acceso y las acciones que se pueden llevar a cabo dentro de una Reserva Biológica son muy limitadas, siendo únicamente la investigación, docencia y conservación permitidas. La ley 7354 (1993) en su artículo 4 *faculta a la Universidad de Costa Rica para que, a través de la Sede Regional de Occidente, lleve a cabo programas de conservación y docencia, así como investigaciones científicas y la administración de la Reserva Biológica* (Sistema Costarricense de Información Jurídica, 2017).

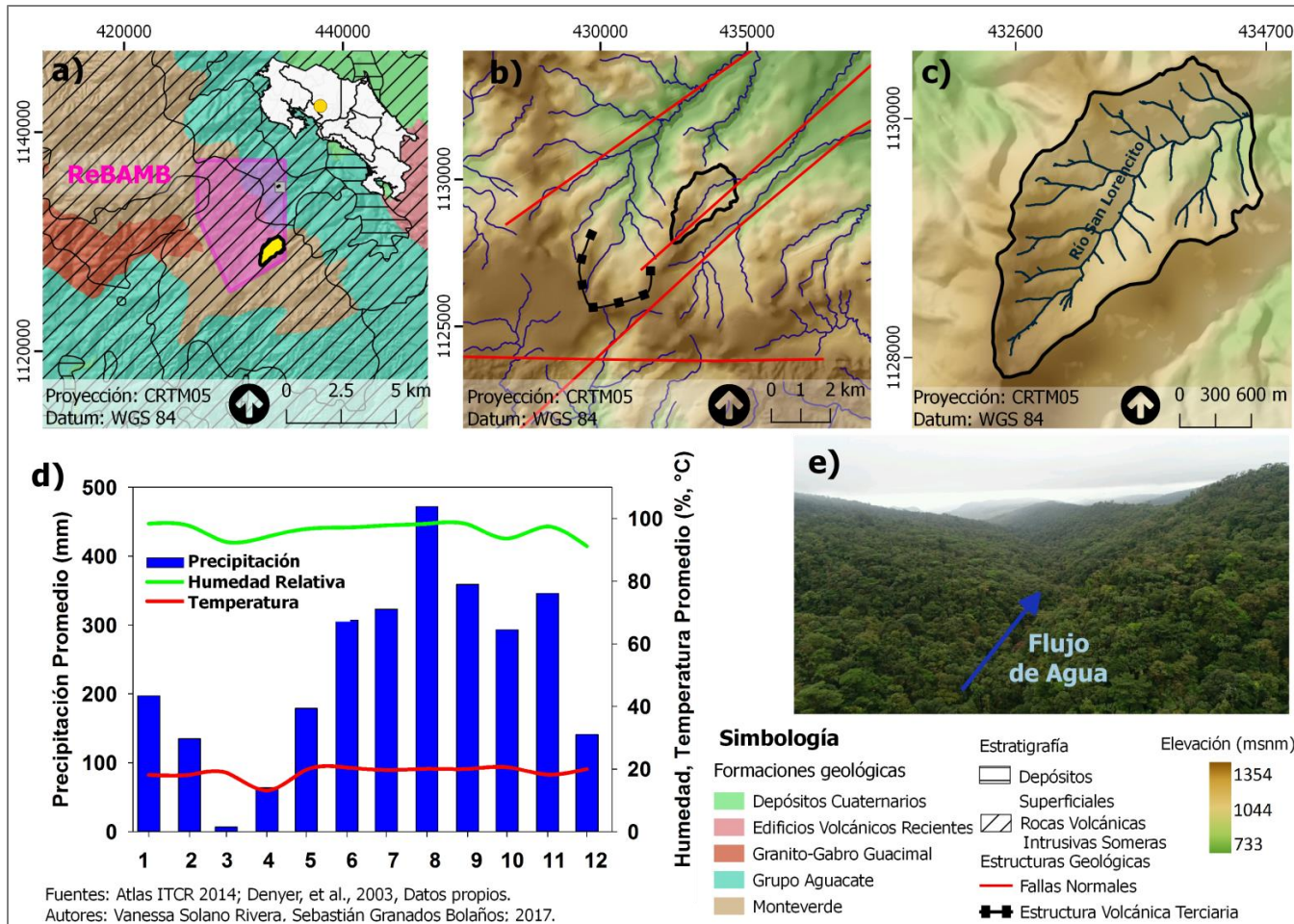


Figura 3. a) y b) Geología y estratigrafía de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes y la cuenca del río San Lorencito, y c) un modelo de elevación detallado de la cuenca; d) Régimen climático mensual basado en mediciones realizadas entre 2015 y 2016, y e) una imagen aérea de la cuenca.

4.2 Climatología

La cuenca tiene una precipitación promedio anual de 4000-5000 mm (Figura 4), una temperatura promedio anual de 20-26 C°. La Evapotranspiración Potencial se mantiene con un promedio anual de 600-800 mm. La época lluviosa está definida de Mayo a Diciembre, mientras que la época seca está va de Enero a Abril.

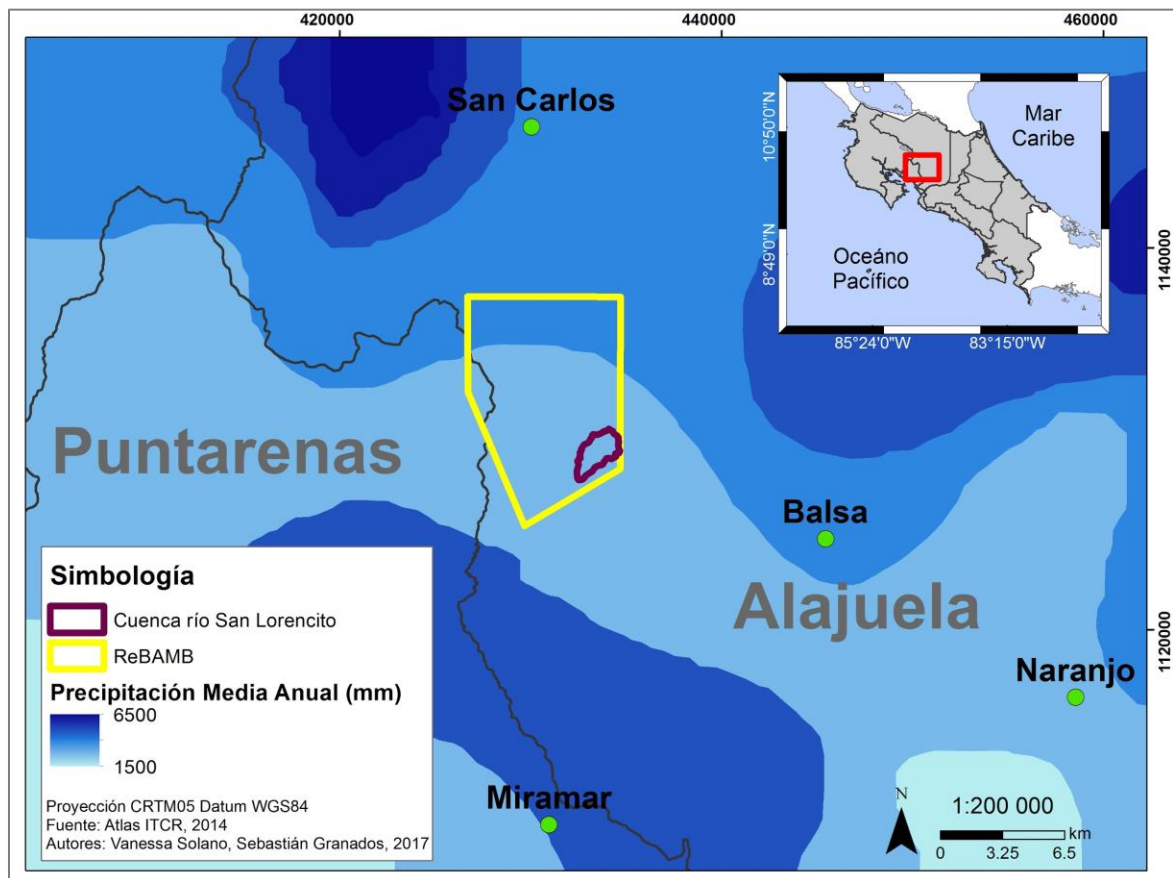


Figura 4. Precipitación media anual.

Por su ubicación geográfica, la cuenca sufre la influencia de las vertientes Pacífico y Caribe. Los vientos alisios provenientes del Caribe aportan una humedad relativamente constante durante todo año generando un promedio de humedad relativa anual superior al 90%. El aporte persistente de humedad del Caribe causa lloviznas y chubascos frecuentes a lo largo del año con intensidades débiles a moderadas (> 2 y ≤ 15 mm/h) según la clasificación de la Organización

Meteorológica Mundial (1993).

La influencia climática del Pacífico está directamente relacionada con las fluctuaciones de la Zona de Convergencia Intertropical, la cual alcanza su posición más septentrional durante el mes de setiembre, influyendo en la producción de lluvias durante la época lluviosa (de mayo a noviembre) (UNESCO 2007). Esta influencia genera lluvias convectivas con intensidades superiores a los >60 mm/h en algunas ocasiones.

En términos generales la climatología de la cuenca se caracteriza por ser muy húmeda durante todo el año, con violentas lluvias torrenciales durante la época lluviosa, y una disminución considerable de la precipitación en la época seca.

4.3 Geología

La cordillera de Tilarán es un viejo macizo volcánico donde los rastros de los antiguos focos son difíciles de identificar (Bergoeing, 2007). Dicha cordillera es el producto casi exclusivo de una actividad volcánica Pliocénica, cuyos depósitos se han reagrupado bajo el nombre de grupo o formación Aguacate (Madrigal, 1972). Éste antiguo arco volcánico, compuesto en su mayor parte por lavas basálticas y andesíticas, depósitos de flujos piroclásticos, brechas, tobas y sedimentos vulcanoclásticos, está cortado por pequeños cuerpos intrusivos y extrusivos y diques basálticos, la mayoría de las rocas están muy alteradas hidrotermalmente (Salazar, 2000). Todas estas rocas han sido agrupadas dentro del Grupo Aguacate (ver Denyer & Arias, 1991), unidad litoestratigráfica que se utilizó para incluir todas las rocas volcánicas post-cretácicas y pre-cuaternarios de Costa Rica. Dentro del Grupo Aguacate se encuentra la Formación Monteverde a la cual pertenece la cuenca del río San Lorencito (Ver Figura 3).

El material de la cuenca está compuesto por lavas frescas andesíticas hasta andesitas traquíticas, compuestas por fenocristales de plagioclasa, augita, hipersteno, magnetita y ocasionalmente horblenda, biotita u olivino; es decir, tiene la misma composición mineralógica como las lavas de los estratovolcanes jóvenes de las cordilleras volcánicas (Kussmaul, 2000).

4.4 Geomorfología Regional

La cordillera de Tilarán presenta un relieve fuerte en toda su extensión; laderas con pendientes cercanas a 30°. Los fondos de valles son angostos, y las cimas de las lomas y cerros también suelen ser angostas, pero redondeadas por la presencia de ceniza y coladas de lava en posición horizontal (Salazar & Madrigal, 1996). Los conos por los cuales se produjo dicha actividad volcánica están muy disectados y es probable que el inicio de la actividad haya sido fisural, hoy en día cubierta por otros depósitos. Las rocas que forman la unidad son de edad Mioceno-Plioceno (Salazar & Madrigal, 1996).

Los ríos de la Cordillera de Tilarán siguen trazos casi rectilíneos. Poseen lechos profundos en sus cursos inferiores debido al material mueble, constituido muchas veces por aluviones de origen volcánico. Siguen un trazado noreste-suroeste y se disponen de forma paralela los unos respecto a los otros (Bergoeing, 2007). Cerca de las cimas de la Cordillera de Tilarán no es raro encontrar formas de mesetas volcánicas disectadas que confieren, a esta región, un aspecto bastante accidentado con cornisas formadas por rocas volcánicas o intrusivas, y barrancos que son producto de la alteración química de rocas y de la gravedad, que unidos a la acción de las lluvias da a menudo desprendimientos de tamaño considerable.

4.5 Geomorfología Local

El río San Lorencito se encuentra en la vertiente noreste o vertiente de San Carlos de la Cordillera de Tilarán, la base de dicha vertiente está compuesta por un formidable relleno, formado por lahares y depósitos de pie de monte que construyeron conos de deyección coalescentes. Los ríos que recorren esta vertiente tienen una gran capacidad y son responsables del importante relleno del sector deprimido. Las crisis climáticas sufridas en el Cuaternario se reflejan sobre esta parte del territorio (Bergoeing, 2007).

Entre los ríos Jaimical y la San Lorenzo (el río San Lorencito se encuentra entre los cursos anteriores), se encuentran conos de deyección, probablemente deformados por la neotectónica cuyos valores de pendientes son superiores a los 20°. Están muy entallados por los ríos

anteriormente citados (Vargas, 1978). Los conos de deyección disectados, están formados por lavas torrenciales, cuya matriz está compuesta por arcillas rojas compactas que encierran bloques rodados y más o menos desgastados de tamaños diversos que van de 20 cm a 1 metro de diámetro. El material rocoso caótico es esencialmente volcánico y muy alterado en superficie (Bergoeing, 2007).

Las pendientes de esta unidad sólo pueden explicarse por la neotectónica. Por otro lado, los ríos corren paralelamente entre ellos, siguiendo una dirección noreste. Como todos son afluentes del San Lorenzo, éste río los recorta en ángulo recto, ya que su talweg se inscribe en una alineación de falla (Bergoeing, 2007).

La geomorfología de la cuenca del río San Lorencito es típica de un curso torrencial o un torrente de montaña. La orientación de dicho curso fluvial está controlado por una serie de fallas normales paralelas en donde su talweg se entalla en dicha fractura. En el lecho del río San Lorencito es posible encontrar gran cantidad de aluviones volcánicos con variaciones de tamaño en un rango de 0.2 a 1 m. También es posible encontrar en áreas de fuertes pendientes lecho fijo compuesto principalmente de brecha y rocas basalto-andesíticas con un alto grado de alteración hidrotermal y diaclasamiento. En algunos sectores hay terrazas fluviales muy consolidadas con indicios de una incipiente pedogenesis y formaciones boscosas en su superficie. Dichas terrazas aluviales, que están a las márgenes del río, están sujetas a constantes procesos de crecidas que erosionan o depositan material en su superficie. Estas formaciones aluviales también tienen evidencia de contribución coluvial desde las laderas por procesos de remoción en masa.

Las laderas de la cuenca están compuestas por material volcánico diaclasado y con profunda meteorización química. Hay cicatrices de coronas de deslizamientos ya muy erosionadas que han dado lugar a micro-cuencas de tributarios que desembocan en el río San Lorencito. Dichos tributarios en la mayoría de los casos han formado conos de deyección en su área de confluencia con el río principal.

4.6 Morfometría de la cuenca del río San Lorencito

La cuenca de estudio posee un área de 3.2 km² y un perímetro de 8.1 km. La cuenca se caracteriza por tener una forma ovalada y alargada según lo indican el índice de compacidad (1.27) y el factor forma según Horton R_f (0.33×10^{-6}). Las elevaciones máxima y mínima son 1472.4 y 873.7 msnm respectivamente, con una media de 1133.5 msnm (Figura 3c). Las pendientes de la cuenca se encuentran entre los 6° y 42°, con una media de 22.3° (Figura 2). La ladera A posee pendientes menores que la ladera B, y por ende una topografía más suavizada.

El río San Lorencito posee una extensión de 3.2 km y la pendiente del cauce es de 8.65°. Se han identificado más de 13 tributarios permanentes, y se conoce la existencia de tributarios temporales y estacionales.

4.7 Pedología

Dentro de la cuenca del río San Lorencito se pueden distinguir dos tipos de suelo: los suelos formados in situ (Andisoles) y los suelos transportados (Entisoles). Los suelos in situ encuentran su pedogenesis en la descomposición del material volcánico expulsado en el terciario; se caracterizan por presentar espesores bajos en la parte alta de la cuenca (<60 cm) y espesores mayores en las partes más bajas (Figura 5). De manera generalizada se caracterizan por poseer una textura superficial (>30 cm de profundidad) franca con un aumento progresivo en la presencia de arcillas a mayor profundidad. Las muestras analizadas permitieron identificar espesores muy variables en la cantidad de hojarasca, ocupando estos algún valor en el rango de los 1 a los 14 cm de profundidad, además se pudo observar durante los muestreos la presencia de carbón a diferentes profundidades a lo largo de ambas laderas.

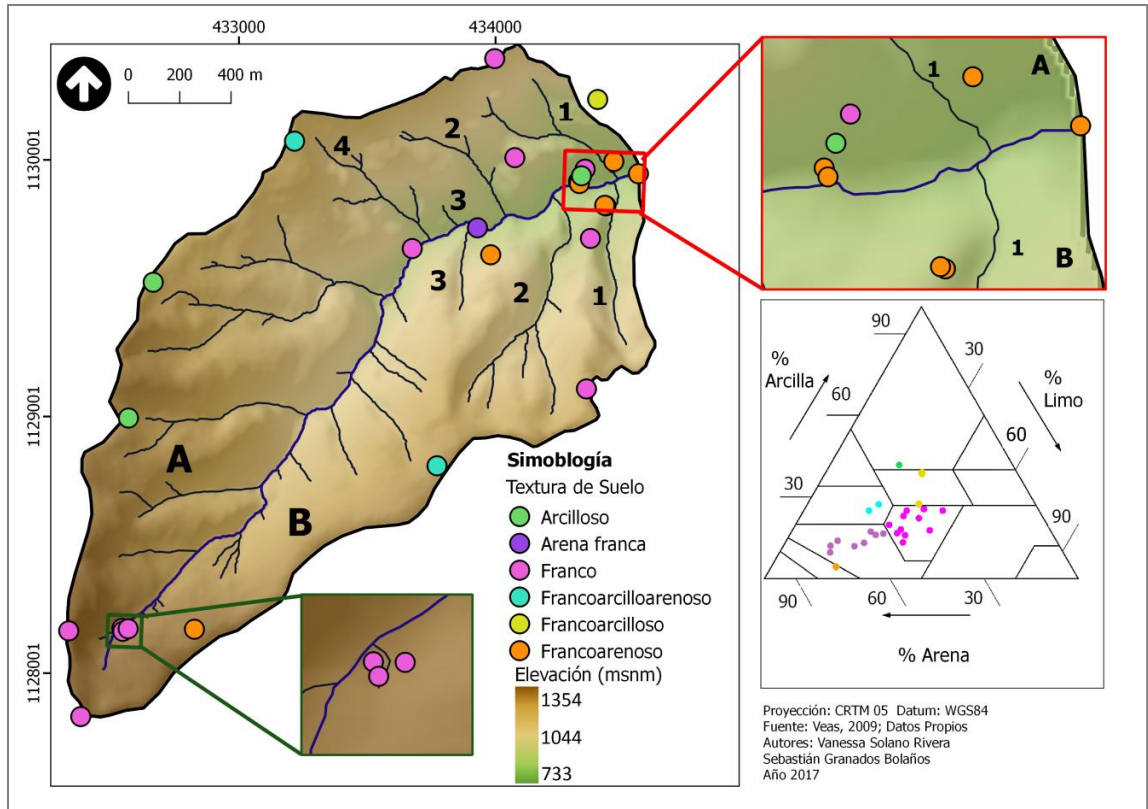


Figura 5. Distribución espacial y textural de las muestras de suelos.



Figura 6. Horizonte superficial orgánico del suelo observado en la parte alta de la ladera A, muestra un profundo horizonte O y A, se puede apreciar la erosión por flujos de agua superficiales.

Por otro lado, los suelos transportados deben su origen a la dinámica de movimiento de sedimentos del río San Lorencito (Figura 7). Se encuentran en las partes bajas (pie de monte) de ambas laderas y en las orillas del cauce del río, conforman terrazas aluviales de extensión y edad variables pero de manera generalizada muy consolidadas. La textura superficial (<30 cm de profundidad) de estos suelos tiene la particularidad de ser francoarenosa, en algunas ocasiones se encuentran bloques de tamaños importantes entre los 40 y 50 cm de profundidad. Respecto a la hojarasca, esta se presenta en espesores que aproximados a 2 cm de profundidad.



Figura 7. Perfil de suelo observado a un costado del cauce del río San Lorencito, en una terraza aluvial con pedogenésis incipiente. Se puede observar en la parte inferior de la imagen la presencia de cantos rodados, heterométricos y heteromórficos distribuidos caóticamente.

4.8 Vegetación

La Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, de la cual forma parte la cuenca en estudio, posee un bosque tropical pluvial de Premontano según el sistema de zonas de vida de Holdridge

(Centro Científico Tropical, 2005). Diferentes estudios mediante parcelas constatan la alta variabilidad en composición florística y estructural de este bosque (Barrantes, 1986; Wattenberg, Brecker, & Ortiz, 1993; Di Stéfano, Brenes, & Mora, 1995; Ortiz & Mora, 1996), siendo el agua y la luz los factores externos determinantes en la distribución de vegetales (Barrantes, 1986) y en su comportamiento fenológico del proceso de floración y fructificación que se caracteriza por ser poco marcado estacionalmente (Ortiz & Mora, 1996).

Vargas (1991) menciona que existen tres formaciones vegetales en esta área, siendo el estrato superior el compuesto por árboles de 30-40 m de altura, el estrato medio se caracteriza por ser muy denso y presentar alturas de 15-25 m y el estrato inferior integra la vegetación que presenta entre 5 y 10 m de altura. Barrantes (1986) determina la existencia de palmas y plantas herbáceas con alturas entre los 2-0.5 m de altura, el cual se considera un cuarto estrato de la vegetación (Salazar-Rodríguez, 2000).

La Figura 8 muestra la altura de la vegetación para el 2016, en este caso se determinó que la altura mayor corresponde a 25 m lo cual excluye al estrato superior identificado por Vargas, 1991. No obstante, se asume que esto es un efecto de la resolución del modelo digital de terreno y el modelo digital de superficie (12 m aproximadamente), pero da una idea de un estrato poco conglomerado donde los individuos se encuentran separados entre sí.

La Figura 8 exhibe un patrón de agrupamiento de la vegetación con mayor altura en la parte media de la cuenca; patrón, que según se observó, se presenta en las cuencas aledañas a la del San Lorencito. En este sector, como se observa en las Figura 2 y 8, la ladera A y B presentan características muy distintas. La Ladera A presenta una pendiente poco pronunciada y valores que indican una alta densidad de la vegetación pues el índice de masa foliar alcanza su máximo reiteradamente en este sector. Por el contrario, a la Ladera B presenta pendientes con valores por encima de 24° y valores muy cercanos al mínimo detectado en el índice de masa foliar, lo que indica una cobertura vegetal menos densa. De manera generalizada, este comportamiento para la Ladera B se muestra en toda el área de estudio, pendientes fuertes y valores cercanos al mínimo registrado en el índice de masa foliar.

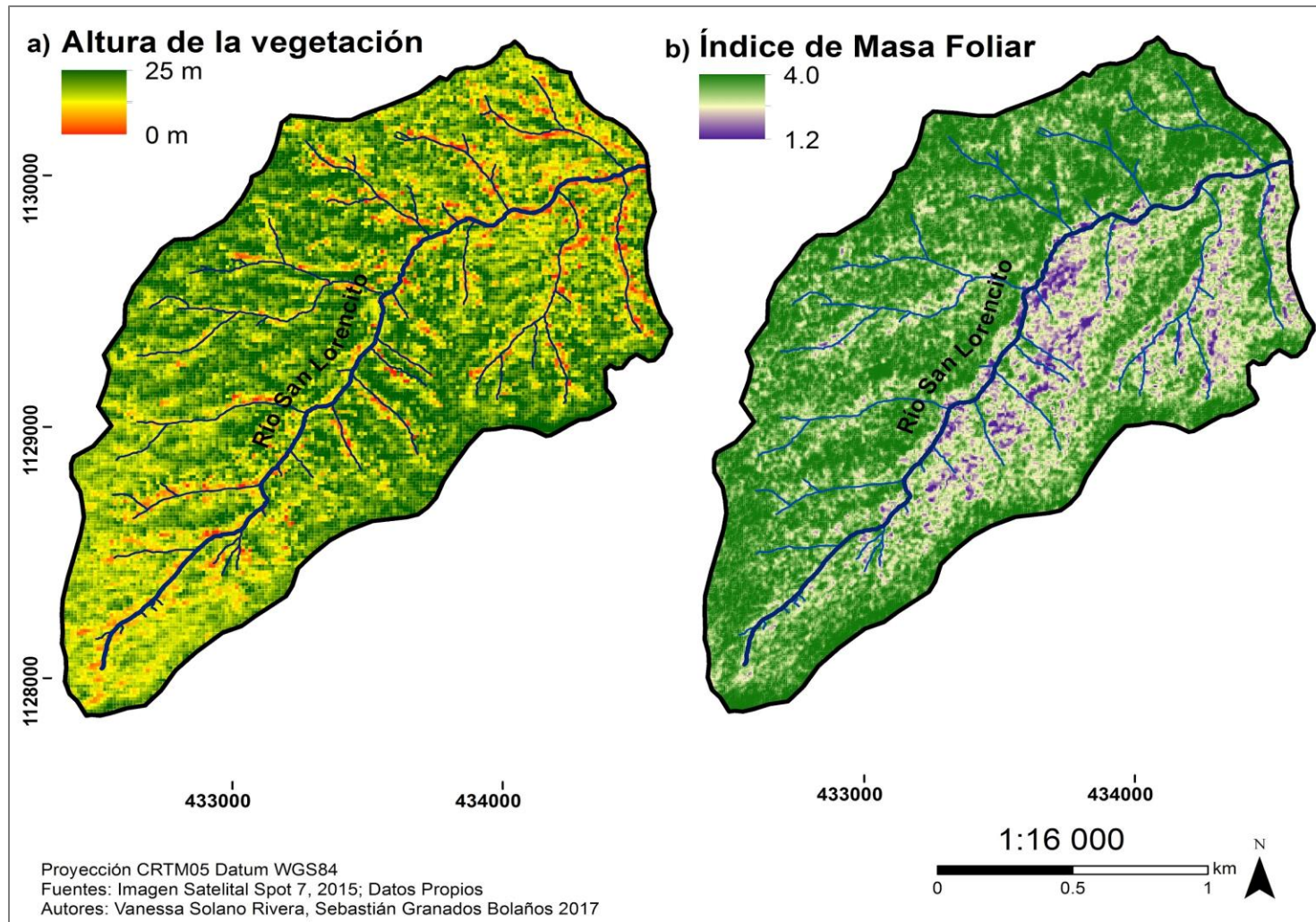


Figura 8. Altura de la vegetación e índice masa foliar (Saito, et al., 2001) de la cuenca del río San Lorencito.

A nivel de cuenca la densidad de la vegetación es muy elevada y la altura de los árboles es significativa, por tanto el papel del bosque en la intercepción de la lluvia es de esperar que sea considerable. Un estudio anterior (Veas, 2009) indica que el total de lluvia interceptada por el bosque en dos eventos de precipitación fue de 41% y 11%. El autor de dicho estudio relaciona el porcentaje de intercepción con la duración e intensidad de la lluvia, destacando que en el primer caso se presentó un evento muy intenso mientras que en el segundo la precipitación fue leve pero constante.

Capítulo 5. Respuesta del río ante eventos de precipitación

5.1 Caracterización del período de estudio

Finalizada la caracterización de los sedimentos disponibles del río San Lorencito en los siguientes capítulos se analizará las dinámicas temporales y espaciales del transporte de sedimentos así como el origen y procesos de de generación de sedimentos de la cuenca. Se iniciará con una caracterización estadística del año hidrológico en estudio.

El año hidrológico de estudio corresponde al período comprendido entre el 13 de Junio 2015 y el 13 de Junio 2016. El año hidrológico presentó, en 2015, dos estaciones (seca y lluviosa) muy marcadas por una disminución en el régimen de lluvias y una época lluviosa 2016 muy incipiente, con un aumento importante en los valores de precipitación percibidos. En este período, la cuenca experimentó una precipitación anual total de 2762 mm (el año del estudio se caracterizó por la ocurrencia del fenómeno de El Niño que resultó en precipitaciones anuales inferiores a la media), una evapotranspiración anual total de 425 mm y un caudal anual 2448 mm. La humedad relativa y la temperatura se mantuvieron casi constantes con valores que rondan el 98% y los 20°C respectivamente, con disminuciones importantes en los meses de marzo y abril para ambas variables, y octubre para la humedad relativa (Figura 3d).

Durante el año hidrológico se identificaron 29 eventos de lluvia, incluyendo un evento extremo en Agosto 2015, evento con un período de retorno aproximado de 50 años. De las 26 variables

hidrometeorológicas establecidas en la metodología, 10 se utilizaron para describir la dinámica temporal de eventos que abarcan el 92% de la varianza total. Las otras 16 variables restantes fueron descartadas basándose en el Análisis de Componentes Principales. Además, los 10 parámetros seleccionados mostraron pequeños efectos de co-linealidad. El Cuadro I muestra el total de eventos seleccionados y sus principales características.

Del total de eventos lluviosos identificados, 25 acontecieron en la época lluviosa de 2015 (Junio-Diciembre), de los cuales 11 anteceden el evento máximo ocurrido en Agosto 2015 y 13 le suceden. En la época seca 2016 (Enero-Abril) se presentan únicamente 2 eventos lluviosos, al igual que en el inicio de la época lluviosa 2016 (Mayo-Junio) (Figura 10).

Se pudo documentar durante el período de estudio que la cuenca está continuamente suministrando sedimentos hasta su punto de fuga, como reflejan los datos de turbidez. Los resultados del monitoreo realizado en la parcela de sedimentos (ver Figura 9) dentro del río muestra que las partículas que conforman los bancos de arena se mantienen en constante movimiento. Las formas de los depósitos varían en periodos de tiempo pequeños (<día) y exhiben la alta movilidad de las arenas que se depositan en el lecho del río.

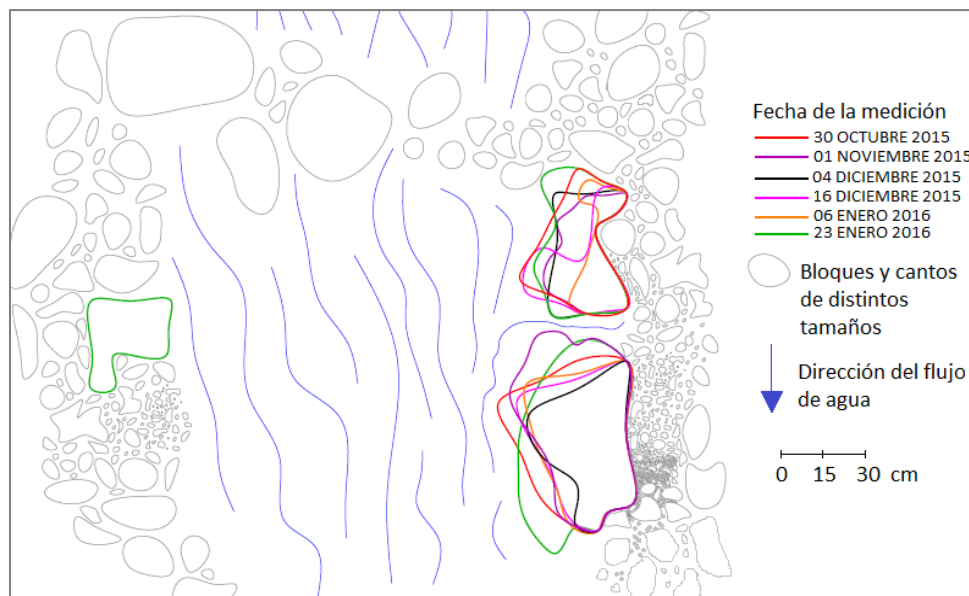


Figura 9. Variación temporal registrada en una parcela de sedimentos dentro del cauce del río San Lorencito.

Cuadro I. Eventos seleccionados para el año de estudio, principales características hidro-meteorológicas (10 variables) e índice de histéresis de Zuecco et al. (2016) y su clasificación (se omitieron las variables co-lineales).

Fecha Evento	Tdry (h)	AWI7d (mm)	M (mm)	D (h)	lmax (mm/h)	Range (m)	P_WLlag (h)	Range (NTU)	P_TUlag (h)	TU_WLlag (h)	Hyst index	Hyst Class
13-14/6/2015	32.5	74.89	13.21	0.5	13.21	0.1	1	587.66	6	6		
16-18/6/2015	13.5	68.55	29.71	11	8.64	0.23	1	998.08	2.5	1.5		
1) 19-20/6/2015	18	59.4	8.38	4.5	3.58	0.14	1.5	69.09	2.5	1		
24-25/6/2015	30	58.87	22.05	11.5	7.36	0.11	7	413.01	8.5	1.5		
26/6/-2/7/2015	1	75.84	26.63	17.5	3.55	0.13	13.5	463.3	13.5	0		
7-8/7/2015	4	42.81	38.08	5.5	19.3	0.24	3.5	204.4	0.5	0.5		
10-11/7/2015	3	91.26	28.95	7	18.54	0.1	1	84.24	3.5	2.5		
14-15/7/2015	0.5	127.32	2.78	2	2.03	0.18	2	786.55	2.5	0.5	-0.59	4
19-21/7/2015	2	39.5	25.13	5	22.1	0.32	1	580.82	4	3	-0.02	3
29-30/7/2015	0.5	29.11	56.65	7.5	27.43	0.62	0.5	704.43	-3.5	-2		
8-10/8/2015	6	24.53	132.33	4	40.13	0.93	2.5	813.05	2.5	0		
2) 10-11/8/2015	9	158.64	98.57	4	77.22	1.17	0	974.06	1	1	-0.41	4
31/8-1/9/2015	19	8.61	59.19	7	29.72	0.2	0.5	929.61	1.5	1	-0.26	3
11-12/9/2015	8.5	55.34	44.95	3.5	32.51	0.45	1	760.64	7.5	6.5	0.11	2

Cuadro II. Eventos seleccionados para el año de estudio, principales características hidro-meteorológicas (10 variables) e índice de histéresis de Zuecco et al. (2016) y su clasificación (se omitieron las variables co-lineales) (continuación).

Fecha Evento	Tdry (h)	AWI7d (mm)	M (mm)	D (h)	lmax (mm/h)	Range (m)	P_WLlag (h)	Range (NTU)	P_TUlag (h)	TU_WLlag (h)	Hyst index	Hyst Class
13-14/9/2015	17	106.89	38.1	2	29.47	0.26	1.5	636.58	0.5	-1		
17-18/09/2015	23	93.93	10.16	3	9.66	0.16	1	762	2	1	-0.29	3
19-20/09/2015	8	56.82	4.32	1	4.07	0.15	0.5	854.2	3	2.5	-0.61	4
20-21/09/2015	21	22.03	10.92	3	6.61	0.11	1	425	2.5	1.5	0.05	2
21-22/09/2015	16.5	32.2	48.01	5	32.52	0.51	1	722.1	1	0	0.15	2
22-23/09/2015	1	80.96	35.05	3.5	25.4	0.22	0.5	939.1	4	3.5	0.11	2
3) 27-28/09/2015	44.5	126.67	34.79	3.5	33.02	0.37	0.5	877.4	7	6.5	-0.05	3
12-13/10/2015	4.5	76.82	8.64	4	5.59	0.14	1	906.9	9.5	8.5	0.19	6
16-18/10/2015	11.5	76.61	49.77	5	26.67	0.48	1.5	327.5	0	-1.5	0.31	1
20-23/10/2015	6	90.59	50.3	7.5	21.59	0.35	7.5	636.8	1.5	-6	0.13	2
05-07/12/2015	12	28.39	35.56	5	19.56	0.37	0.5	508.2	0.5	0	0.00	3
31/12/2015 - 02/01/2016	1	8.59	19.29	8.5	4.83	0.15	2.5	997.2	4.5	2	-0.70	4
27/4/2016	16.5	6.59	45.22	1.5	40.39	0.14	1	57.9	6	5	0.27	6

Cuadro III. Eventos seleccionados para el año de estudio, principales características hidro-meteorológicas (10 variables) e índice de histéresis de Zuecco et al. (2016) y su clasificación (se omitieron las variables co-lineales) (continuación).

Fecha Evento	Tdry (h)	AWI7d (mm)	M (mm)	D (h)	I _{max} (mm/h)	Range (m)	P_WLlag (h)	Range (NTU)	P_TUlag (h)	TU_WLlag (h)	Hyst index	Hyst Class
4) 26-27/5/2016	5.5	9.33	12.69	1.5	11.68	0.2	1.5	222.42	1.5	0	0.06	2
31/5-2/6/2015	1	34.73	35.56	10.5	31.5	0.37	1	191.77	0.5	-1	0.08	2

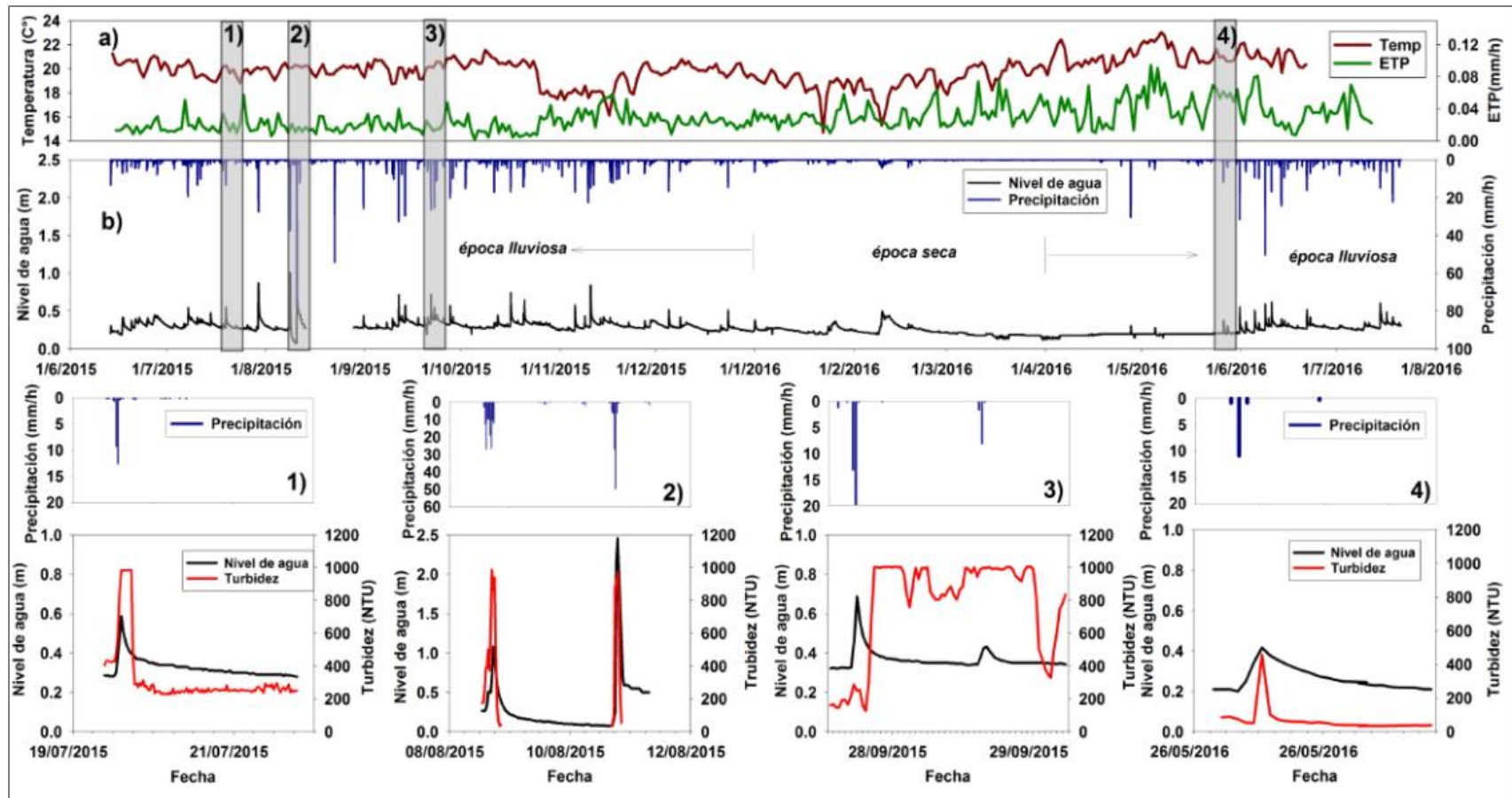


Figura 10. Serie de tiempo del año estudiado. a) Temperatura y evapotranspiración potencial de la serie de tiempo. b) Nivel de agua en metros y precipitación de la serie de tiempo. 1) Evento anterior al evento extremo, 2) evento extremo, 3) evento posterior al evento extremo 4) evento de época seca.

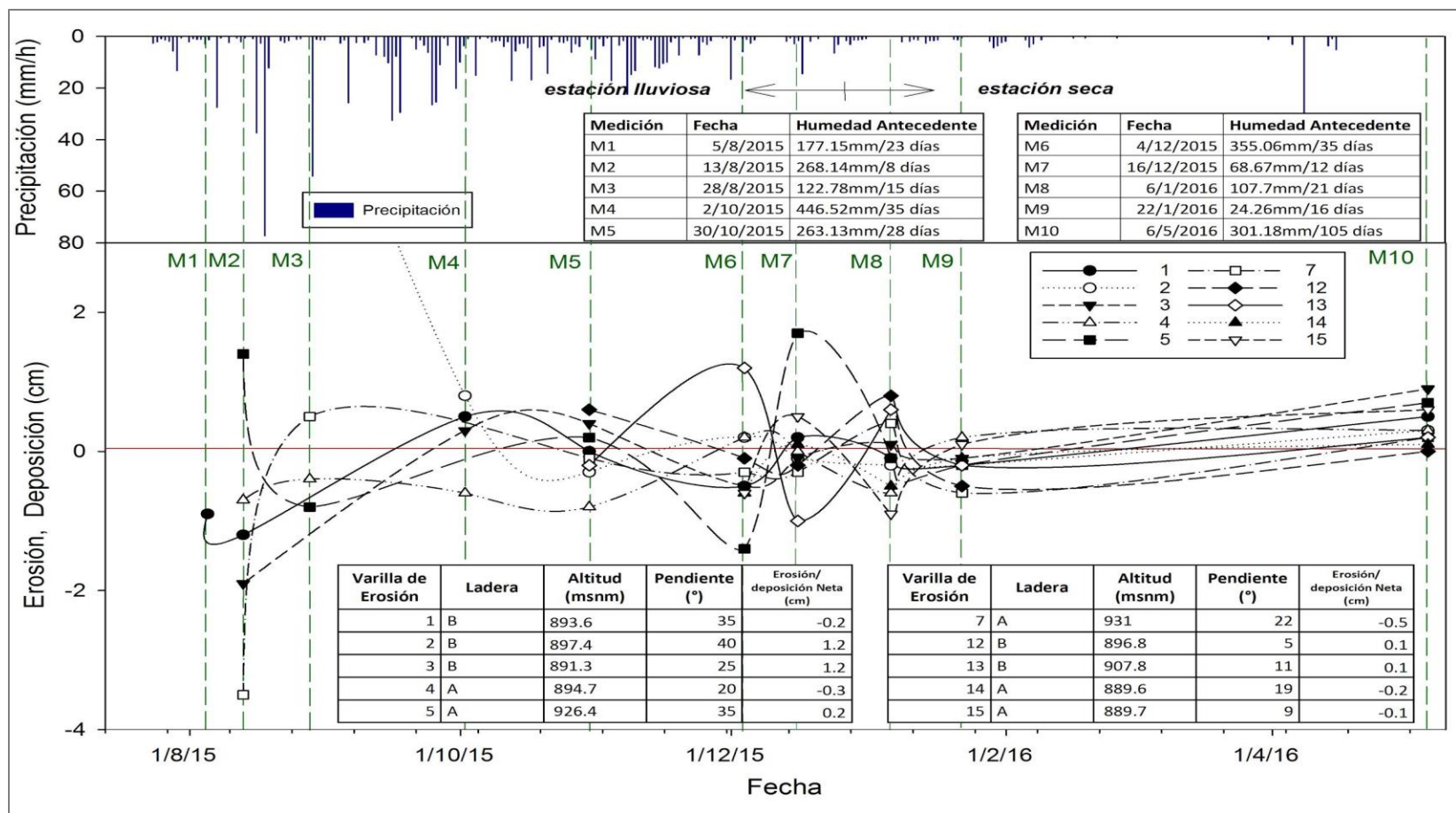


Figura 11. Movimiento de suelo detectado usando las varillas de erosión para el período de estudio, con la numeración de los puntos (ver Figura 1), principales características físicas (pendiente y altitud) y la precipitación acumulada entre mediciones. Los valores negativos representan erosión y los valores positivos representan deposición (acumulación de material).

Las varillas de erosión mostraron, adicionalmente, que las laderas aportan frecuentemente sedimentos al cauce principal mediante erosión laminar. Tal erosión fue detectada de manera considerable después del evento extremo en Agosto de 2015 con una pérdida máxima de suelo de más de 10 cm en un punto. Sin embargo, el movimiento de materiales en términos de erosión y deposición incluso en los mismos puntos es variable. La Figura 11 indica que, sin embargo, la mayor parte del material se moviliza durante la época lluviosa bajo el efecto de precipitaciones acumuladas y en pendientes más pronunciadas.

Las varillas mostraron, además, que a lo largo del año hidrológico todos los puntos se caracterizaron por ganar y perder suelo en algún momento, y que la erosión fue más intensa en la ladera A que en la ladera B (Figura 11). Los sedimentos originados en la ladera A se caracterizaron por tener partículas del orden de tamaño franco y franco-arenoso; mientras que los sedimentos de la ladera B presentaron menos partículas arenosas y mostraban cierta presencia de arcilla.

5.2 Caracterización de los sedimentos del río San Lorencito.

Los sedimentos del río San Lorencito están compuestos principalmente por grava fina (51%) y arenas gruesas (46%), las arenas medias, arenas finas y limos representan menos de un 5 % de la composición granulométrica. Los tributarios tienen una composición similar a los del río principal tal como se muestra en la Figura 12.

La media aritmética del tamaño de partícula de los sedimentos del río principal es 2mm (grava), los índices para determinación del tamaño medio de partícula de Otto, Folk & Ward y Mac Cammon establecieron un tamaño superior a la media aritmética (Ver Figura 13).

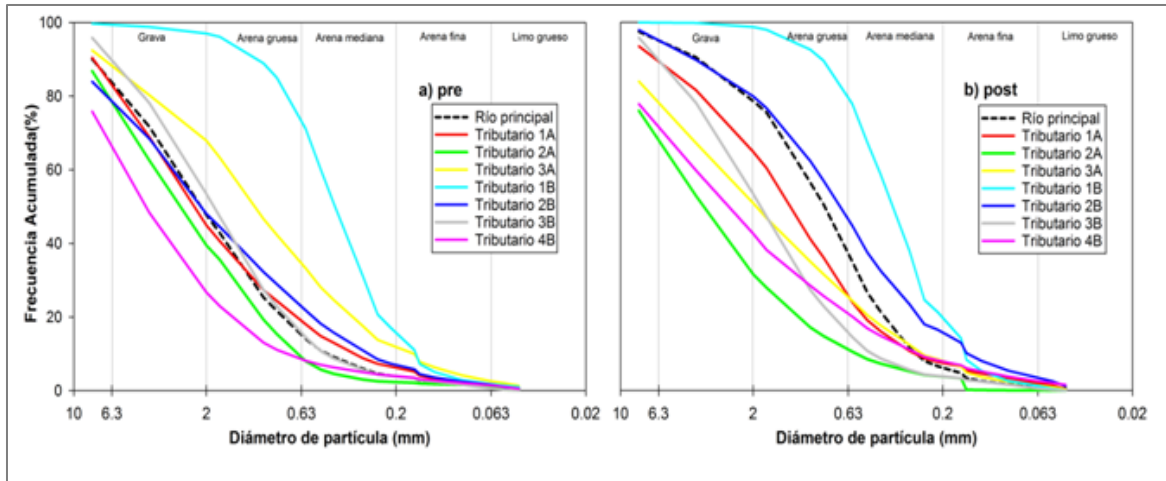


Figura 12. Distribución granulométrica anterior (izquierda) y posterior (derecha) a un evento extremo en el río San Lorencito y algunos de sus tributarios.

Índice	Río Principal	
	Phi (Φ)	mm
Índices de tamaño medio		
Mediana	-1,05	2,00
Otto	-1,39	2,79
Folk and Ward	-1,23	2,45
Mac Cammon	-1,60	3,20

Figura 13. Índices para la determinación del tamaño medio de partícula de los sedimentos del río San Lorencito.

La morfología de la mayoría de partículas de sedimentos del río principal son angulares (55%) y subangulares (40%), menos de un 5% de las partículas tiene una morfología subpulida. No se encontraron partículas redondeadas o pulidas en las muestras de sedimentos de los tributarios o el río principal, ver Gráfico 1.

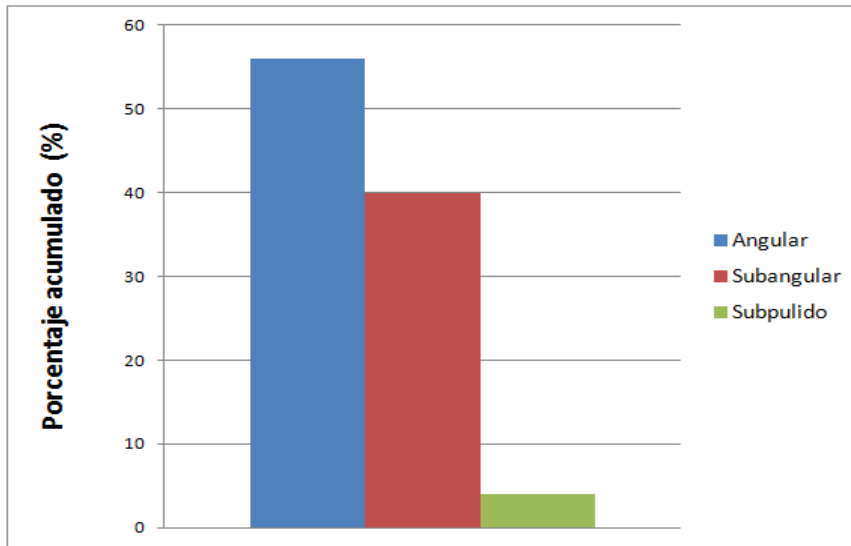


Gráfico 1. Morfología de las partículas de cuarzo de los sedimentos del río San Lorencito.

Los sedimentos del río principal y tributarios tienen un alto grado de oxidación en sus partículas, el análisis de cuarzoes determinó que un 52% de los mismos están con una oxidación completa sobre superficie, el restante 48% está compuesto por partículas opacas (20%), semitransparente (19%) y con trazas de oxidación (9%) (Ver Gráfico 2).

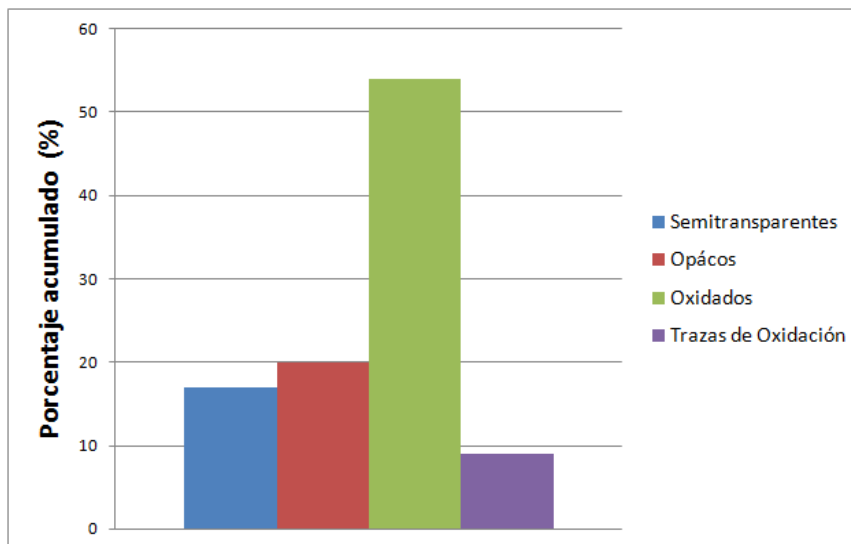


Gráfico 2. Oxidación de las partículas de cuarzo de los sedimentos del río San Lorencito.

La composición mineralógica de los sedimentos aparenta coincidir con lo que describe Kussmaul (2000) en el análisis de la geología de la formación Monteverde *el material de la cuenca está*

compuesto por lavas frescas andesíticas hasta andesitas traquíticas , compuestas por fenocristales de plagioclasa, augita, hipersteno, magnetita, ocasionalmente horblenda, biotita u olivino; o sea tiene la misma composición mineralógica como las lavas de los estratovolcanes jóvenes de las cordilleras volcánicas. Sin embargo, es necesario realizar más investigación sedimentológica al respecto para determinar proporciones de minerales en los sedimentos.

En términos generales los sedimentos de la cuenca del río San Lorencito están compuestos principalmente por material volcánico extrusivo grueso (grava y arenas gruesas) con altos grados de oxidación y una morfología angular.

La relación entre el tamaño de partícula y la turbidez generada para 22 muestras de sedimentos indican que para una misma masa un 100% de las muestras de arena generaron menos de 200 NTU, mientras que partículas más finas, con capacidad de disolverse en agua, alcanzaron el máximo posible de turbidez (1000 NTU) (Figura 14). Los 200 NTU generados por las arenas se deben a los limos y arcillas agregados a las mismas. Los valores de turbidez muestran una dependencia muy alta al tamaño de partícula independientemente de la masa. Por tanto el valor de turbidez resulta poco fiable como un indicador de flujos de masa de sedimentos para la cuenca de interés. Por este motivo se utilizan los valores de turbidez en la caracterización de los eventos y se vuelve imposible hablar de una concentración de sedimentos.

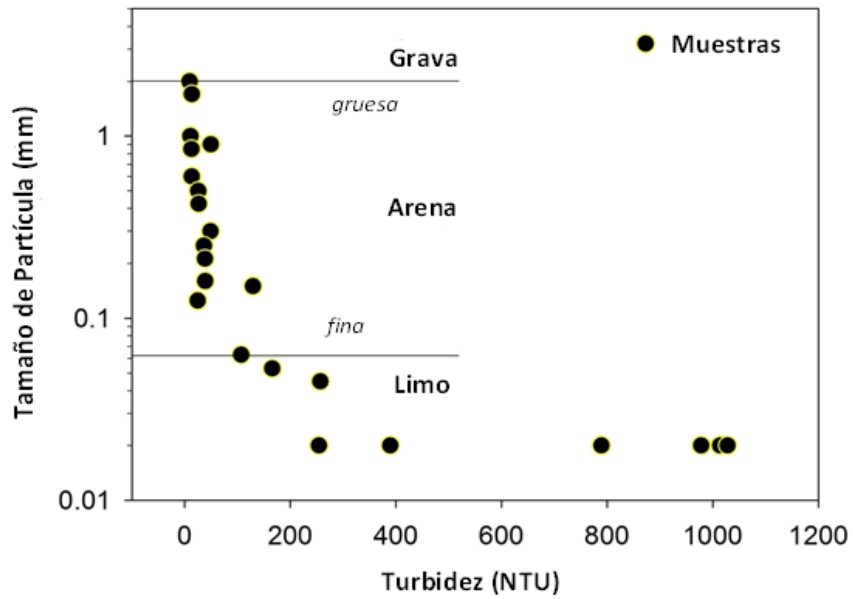


Figura 14. Valores de turbidez contra el tamaño de partícula para 23 muestras.

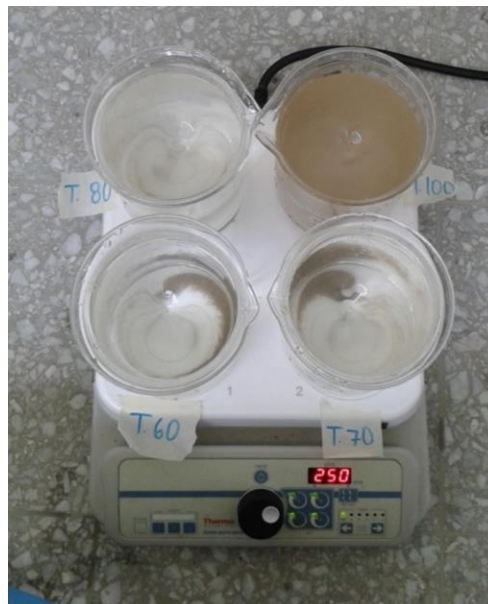


Figura 15. Concentraciones de arena con tamaños de partículas de arena finas (T70 y T80) y medias (T60) y limo grueso (T100). Nótese la poca capacidad de disolución y suspensión de las arenas.

5.3 Respuesta del río ante eventos de precipitación

Los datos recolectados indican que el movimiento de sedimentos y el tiempo de residencia de estos en el río responde a la estacionalidad climática de la cuenca del río San Lorencito, pero puede ser restablecido por eventos extremos en cualquier momento. Los patrones estacionales en el transporte de sedimentos están relacionados con un cambio en el régimen de lluvias, el aumento en los eventos de precipitación conduce a un aumento en el movimiento de sedimentos; aunque la circulación de sedimentos de las laderas hacia el río y dentro del cauce fue apreciado durante todo el año hidrológico.

A continuación se presenta un análisis sobre la respuesta del río ante eventos de precipitación respetando los patrones climáticos estacionales y remarcando las diferencias generadas por el evento extremo de Agosto 2015.

5.3.1 Época lluviosa 2015 (antes del evento extremo)

El período de estudio inició en la época lluviosa de 2015 y desde su inicio hasta el 10 de Agosto (fecha del evento extremo) se registraron once eventos de precipitación con características muy variables entre sí (ver Cuadro I, Figura 10). Los eventos lluviosos presentaron un tiempo seco previo con una tendencia a disminuir desde Junio hasta Agosto y una humedad antecedente variable pero considerable en todos los casos, esto se adjudica a la consolidación de la época lluviosa.

La intensidad promedio de la precipitación de los eventos fue de 15.08 mm/h con un desviación estándar de 11.83mm/h. Estas precipitaciones generaron un aumento en el nivel de agua entre 0.1 y 0.93 metros en cada evento lluvioso y se generó un aumento máximo de turbidez variable por hora con un rango de 69.09 a 998.08 NTU, lo que indica la agresividad de algunos de los eventos ocurridos, sin embargo solamente en dos ocasiones se alcanzó el máximo posible (1000 NTU). En todos los casos el pico máximo de lluvia antecede el pico máximo de nivel de agua, la moda de la diferencia entre ambos picos es de una hora y se presenta en un 36,4% de los casos,

los tres valores que más se alejan de la moda corresponden a 3.5, 7 y 13 horas.

Por otro lado, las variables de precipitación y nivel de agua presentan comportamientos muy distintos, el pico de precipitación antecede el pico de turbidez máxima en el 90.9% de los casos donde la moda de la diferencia entre ambos picos es de 2.5 horas y se repite en cuatro ocasiones, el 9.1% de los casos (1 evento) presenta el comportamiento contrario y el pico de precipitación se ve antecedido en 3.5 horas por el pico máximo de turbidez. Respecto al nivel de agua, este sucedió antes que el pico de turbidez en 72.7% de los eventos y ocurrió después en un 9.01% de los casos, mientras que en el restante 18.3% los picos máximos acontecieron en el mismo momento.

Como quedó en evidencia anteriormente, la respuesta del río ante eventos de precipitación es muy compleja, siete eventos lluviosos presentan comportamientos caracterizados por ser multipicos (poseen varios picos y tendencias alternas a crecer y decrecer); además, solamente en dos ocasiones presentan histéresis, una vez con dirección horaria y la otra con dirección antihoraria.

Los datos registrados tanto mediante el monitoreo hidrométrico como por las varillas de erosión (Figuras 10,11), indican que durante estos meses el movimiento de limos y arcillas fue bajo, a pesar de que se documentó la pérdida de suelo en las laderas. El movimiento de sedimentos arenosos principalmente pre-existentes en el cauce y en menor medida provenientes de erosión laminar y la erosión de los costados del cauce fue, por otra parte, el más constante.

5.3.2 La ocurrencia de un evento extremo dentro del año período de estudio.

En Agosto de 2015 dos eventos lluviosos consecutivos ocurridos en menos de 36 horas generaron una crecida extrema y flujo de detritos con un periodo estimado de retorno de 50 años. En el primer día del evento lluvioso, 132 mm de precipitación cayeron en la cuenca en menos de 4 horas, con una intensidad máxima de 40 mm en 30 minutos (ver Figura 10 evento 2, Cuadro I). Esta tormenta inicial causó un aumento en el nivel del agua de 1.14 metros and llegó a niveles máximos de turbidez >900 NTU en menos de 3.5 horas. El total de lluvia (132mm) causó gran

cantidad de deslizamientos en las laderas que rápidamente fluyeron hacia tributarios y el río principal generando una gran movilización de material y desencadenando en un flujo de detritos torrencial. La precipitación antecedente de ésta tormenta tuvo una magnitud de 24 mm en 7 días, por lo cual el suelo estaba relativamente seco y no en estado de saturación.

El segundo evento, evento máximo, ocurrió 19 horas después de la primera tormenta mencionada anteriormente. Ya el suelo estaba en estado de saturación máxima por la acumulación de 147 mm anteriores. La intensidad máxima de la segunda tormenta fue de 77 mm en menos de 30 minutos y una magnitud total de 99 mm en 4 horas. Este segundo evento de precipitación generó una crecida de 2.86 m en menos de 30 minutos, resultando en una segunda avenida violenta y generando nuevamente un flujo de detritos. Utilizando la ecuación de Manning se estimó un caudal máximo aproximado de $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Un total acumulado de 230 mm entre ambos eventos de precipitación causaron dramáticos cambios morfológicos en el cauce del río. Al menos de 7 deslizamientos fueron identificados en las laderas con un promedio estimado de $> 100 \text{ m}^3$ volumétrico. La morfología de los tributarios también fue intensamente modificada debido a la incorporación de cantos, sedimentos y vegetación provenientes de las laderas. Estos dos eventos máximos generaron intensos cambios en la zona riparia del río, además se estima que la combinación de ambos eventos (36 horas) movilizó más cantidad de sedimentos y rocas que la totalidad de los eventos lluviosos del año hidrológico estudiado (exceptuando los dos eventos descritos en este apartado).

5.3.3 Época lluviosa 2015 (después de un evento extremo)

El comportamiento de la cuenca ante eventos lluviosos, luego del evento extremo, cambió considerablemente. Las condiciones en que se encontraba la cuenca a inicios del período de estudio variaron notablemente. Durante los meses de Agosto a Diciembre se pudo documentar cómo las respuestas del río se tornaron más complejas y heterogéneas.

Durante este período se registraron 13 eventos lluviosos (ver Cuadro I), con un tiempo seco previo que varió entre 1 y 44.5 horas sin una tendencia aparente. La humedad antecedente fue en promedio mayor que antes del evento extremo, pero de igual manera fue muy variable y no

siguió un patrón de crecimiento o decrecimiento claro.

La intensidad promedio de la precipitación de los eventos fue de 21.26 mm/h con un desviación estándar de 12.11. Estas precipitaciones generaron un aumento en el nivel de agua entre 0.11 y 0.51 metros en cada evento lluvioso y se generó un aumento de máximo de turbidez variable por hora con un rango de 327.5 a 929.6 NTU, un rango más reducido e inclinado hacia valores más altos que los presentados entre Junio y Agosto 2015. El máximo posible (1000 NTU) se alcanzó en seis ocasiones, y un total de 76.9% de los eventos de precipitación superaron el máximo promedio de turbidez antes del evento extremo (622.9 NTU). Estos datos implican una diferencia en la dinámica de transporte de sedimentos, principalmente en el tamaño de partícula movilizado (ver Figura 10), así como en la fuente de los sedimentos.

En todos los casos el pico máximo de lluvia antecede el pico máximo de nivel de agua, la moda de la diferencia entre ambos picos es de media hora y una hora, presentándose cada valor en un 38,5% de los casos; mientras que el 15.4% de los casos muestra una diferencia de hora y media. Finalmente el 7.6% restante consiste en un evento con un dato alejado (una diferencia de 7.5 horas).

Por otro lado, las variables de precipitación y nivel de agua presentan comportamientos muy distintos, el pico de precipitación antecede el pico de turbidez máxima en el 92.3% de los eventos de precipitación, la moda de la diferencia entre ambos picos es de 0.5 y 1.5 horas, repitiéndose dos veces cada valor. El 7.7% de los casos restante corresponde a un evento en que los picos máximos de precipitación y turbidez ocurren en el mismo momento, el 9.1% de los casos. Respecto al nivel de agua, este sucedió antes que el pico máximo de turbidez en 61.5% de los eventos y ocurrió después en un 23.1% de los casos, cabe destacar que en una ocasión el pico máximo de nivel es antecedido por seis horas siendo este el valor de toda la serie de tiempo; el restante 15.4% los picos máximos acontecieron en el mismo momento.

El índice de histéresis (Zuecco, et al., 2016) para los eventos que ocurrieron entre Agosto y Diciembre 2015 permite identificar una conducta diferencial en la cuenca de interés respecto a otras cuencas (Perks, et al., 2015; Hudson, 2003) donde la mayoría de los eventos presentan una

dirección horaria o antihoraria muy marcada. No obstante, la cuenca del río San Lorencito exhibe mayoritariamente curvas en forma de ocho, con patrones de dirección poco claros que confirman de la complejidad de los procesos sufridos y la respuesta del río (Perks, et al., 2015). Solamente un evento de este período no presenta histéresis, pero se caracteriza por mostrar un comportamiento múltiplo.

Los datos registrados, tanto mediante el monitoreo hidrométrico como por las varillas de erosión (ver Figuras 10, 11), revelan la movilidad de una gran cantidad de partículas del orden de tamaño limoso y arcilloso con fuentes tanto cercanas como lejanas del punto de medición. Los sedimentos transportados en este caso no provienen sólo del desgaste de los costados del cauce, erosión laminar y el re-tránsito de los bancos existentes en el río, sino que tras el evento extremo se crean nuevas fuentes de sedimentos que son capaces de suplir al río con sedimentos de tamaño variado. Las constantes visitas permitieron observar la existencia de derrumbes y deslizamientos en los límites del cauce o sus cercanías (ver Figura 2), además de conos de deyección dentro del cauce principal y a la salida de algunos de sus tributarios.

El evento extremo aumentó la disponibilidad de sedimentos para ser transportados tanto dentro como fuera del cauce, y las intensas lluvias posteriores al evento permitieron el tránsito efectivo de los sedimentos hacia el punto de fuga de la cuenca.

5.3.4 Época seca 2016

La época seca abarca los meses que van de Enero a Abril (incluido este). Durante el 2016, para ese período se registraron dos eventos (ver Cuadro I) con un tiempo seco pequeño (menor a 17 horas) pero una humedad antecedente que no superó los 9 mm en siete días; lo cual es completamente comprensible debido a la naturaleza de la época seca.

La intensidad máxima de la precipitación de los eventos lluviosos fue de 4.83 y 40.39 mm/h, el nivel de agua aumentó 0.15 y 0.14 mm mientras que la precipitación alcanzó un crecimiento máximo 997.2 y 57.9 NTU respectivamente. Respecto a los picos máximos, en ambos eventos el pico máximo de precipitación antecede a pico de nivel de agua, y este a su vez antecede al de

turbidez. Contrario a lo que pudiese suponerse, el evento de precipitación con una intensidad máxima considerablemente menor presenta valores que indican una respuesta del río significativamente mayor; ante lo cual debe rescatarse que la distribución temporal de los eventos es muy distante presentándose el primero a inicios de la época seca (31 Diciembre – 2 Enero) y el segundo finalizando dicha época (27 Abril).

Las desigualdades en las condiciones ambientales que se presentan entre inicios y finales de la época seca son las responsables de las diferencias en la respuesta de la cuenca ante eventos lluviosos. La temporada seca significó una disminución considerable en la humedad relativa y la temperatura, además de una disminución progresiva en la precipitación principalmente para el mes de marzo (Figura 3d). Debe recordarse que para la cuenca del río San Lorencito, como ya se dijo anteriormente, el régimen de precipitación es un factor esencial para la movilidad de sedimentos.

Las varillas de erosión muestran que para la época seca se registró un movimiento diferencial entre el primer mes y los siguientes tres meses (ver Figura 11), primeramente se muestra un movimiento variable entre los puntos y sin una tendencia marcada, mientras que luego se documenta una tendencia al crecimiento en el valor de suelo, lo que implica un proceso de deposición dominante sobre la erosión en todos los puntos de muestreo.

5.3.5 Época Lluviosa 2016

El plazo de tiempo estudiado de la época lluviosa 2016 comprende únicamente los meses de Mayo y Junio (primeros 13 días). Durante este período se documentaron dos eventos de precipitación. Estos eventos presentan un tiempo seco bajo (5.5 y 1 hora) con una humedad antecedente de 9.33 y 34.73 mm respectivamente (ver Cuadro I).

La intensidad de los eventos lluviosos fue de 11.68 y 31.5 mm/h, lo cual generó un aumento en el nivel de agua de 0.2 y 0.37 m y en la turbidez de 222.42 y 191.77 NTU respectivamente. Los picos de precipitación antecedente en ambos casos al pico de nivel de agua por 1 y 1.5 horas, el pico de nivel ocurre al mismo tiempo que el pico de turbidez en el primer evento y lo sucede por una

hora en el segundo evento.

Los datos muestran una correspondencia entre las dinámicas de transporte de sedimentos y las variabilidades en el régimen pluvial (estacionalmente). Indican, además, la importancia de variables que si bien están ligadas a la precipitación no son propiedades suyas, como el período seco y la humedad antecedente que condicionan en gran parte la respuesta de la cuenca ante eventos lluviosos. No es posible conocer o predecir el comportamiento de la cuenca con solo saber la intensidad y duración de la precipitación.

Capítulo 6. El rol de los eventos extremos en el transporte de sedimentos y la geomorfología fluvial

El evento extremo descrito anteriormente (ver sección 5.3.2) causó intensas modificaciones y generó gran cantidad sedimentos y bloques que entraron al cauce. Fue tal la relevancia de dicho evento extremo que los siguientes apartados profundizarán la importancia de dicho evento para la comprensión de la dinámica de transporte de sedimentos en la cuenca.

6.1 El rol de los eventos extremos en la dinámica temporal del transporte de sedimentos

El evento extremo sucedido en Agosto 2015 modificó el comportamiento de respuesta de la cuenca ante eventos lluviosos, particularmente en términos de erosión y transporte de materiales. La respuesta de turbidez a los eventos de lluvia se hizo ligeramente más rápida y alcanzó niveles más altos después del evento extremo. El río alcanzó niveles de turbidez máximos con menores entradas de precipitación e intensidad de lluvia. La matriz de correlación de Spearman exhibe diferencias en el intervalo de tiempo entre los picos de precipitación, nivel de agua y turbidez antes y después del evento extremo (Figura 16 a, b). La dinámica precipitación-escorrentía antes del evento extremo estuvo más relacionada con condiciones antecedentes sin correlación significativa entre la magnitud M e intensidad de la precipitación I_{max} con el nivel de agua y tiempos de retraso. T_{dry} se correlacionó moderadamente con el tiempo ocurrido entre los picos máximos de lluvia-nivel de agua P_WLLag ($r = 0,55$) y la humedad antecedente $AWI7$ con el rango del nivel de agua con $r=-0,71$ ($p < 0,9$). El crecimiento máximo horario del nivel de agua se correlacionó sólo moderadamente con el tiempo entre los picos máximo de lluvia y turbidez ($r = -$

0,41).

Después del evento extremo, las condiciones antecedentes jugaron nuevamente un papel importante en las dinámicas lluvia-escorrentía-turbidez (Figura 16 a, b). La magnitud y duración de la precipitación tampoco influyeron en el comportamiento de la cuenca. Sin embargo, la intensidad de la lluvia se correlacionó significativamente con el crecimiento máximo horario del nivel de agua ($r = -0,56$), con el tiempo entre los picos máximos de precipitación y turbidez ($r = 0,55$) y el tiempo entre los picos máximos de turbidez y nivel de agua ($0,52$).

La diferencia en el comportamiento existente en la diferencia temporal entre picos máximos de turbidez, nivel de agua y precipitación se relaciona con cambios en los procesos de erosión. La creación de nuevas fuentes de sedimentos en áreas aledañas al cauce del río. Los conos de deyección observados, y los deslizamientos y derrumbes registrados proveen de una cantidad alta de sedimentos al río y no requieren de precipitaciones muy fuertes para su movilidad. Además, de la existencia de una mayor disponibilidad de sedimentos en las laderas, que queda en evidencia al mostrar las varillas de erosión cambios en la superficie muy altos tras sucedido el evento lluvioso. Las partículas requieren menos energía para ser movidas tras ocurrido un evento de tal magnitud, esto permite que precipitaciones bajas lleven con facilidad una carga muy alta de sedimentos al río.

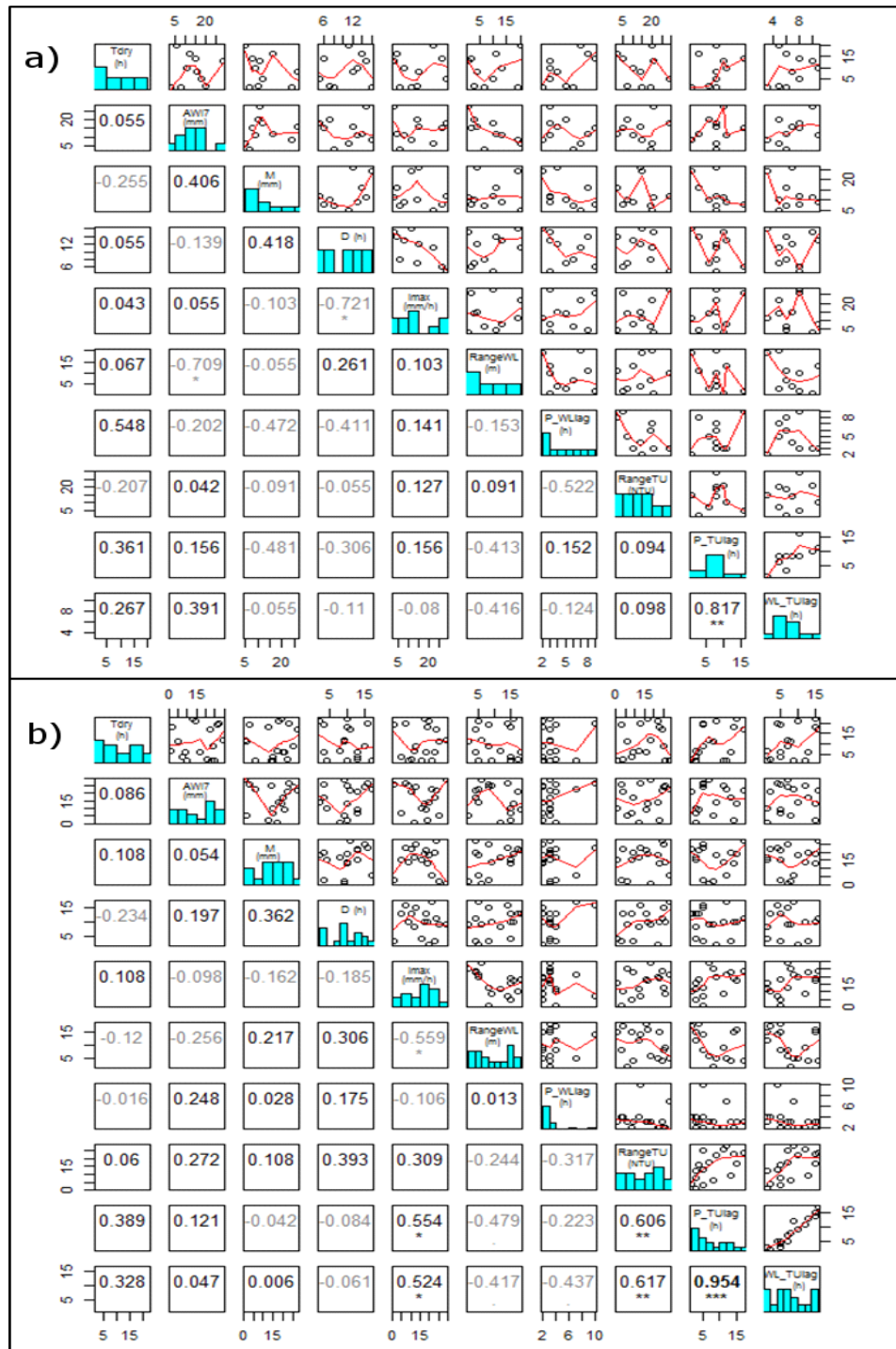


Figura 16. Matriz de correlación que muestra histogramas, coeficientes de correlación (gris para negativos y negros para correlación positiva) y niveles de significancia (* $p < 0,9$, ** $p < 0,95$ e *** $p < 0,99$) y gráfico xy punteados con una línea de tendencia Kernel del núcleo que indica posibles relaciones lineales y no lineales a) antes y b) después del evento extremo.

El análisis realizado muestra que anteriormente al evento extremo los eventos presentaron un comportamiento complejo ligado a una tendencia múltiplo y no a un comportamiento histerético. Por otro lado, tras ocurrido el evento extremo, los eventos de precipitación mostraron una tendencia muy alta hacia un índice de histéresis con una dirección horario o antihoraria poco marcada, reflejándose curvas en forma de ocho. Ambos patrones muestran una complejidad innegable en la respuesta de la cuenca, pero indican procesos de generación de turbidez muy distintos.

La cuenca presenta alta resiliencia hacia los eventos de precipitación extremos. Tras ocurrido un evento extremo, el comportamiento del transporte de sedimentos se recuperó en 3 meses aproximadamente. El tamaño y la morfología de la cuenca, y la cobertura vegetal prístina favorecen la rápida recuperación y el retorno hacia condiciones similares a las preexistentes.

6.2 El rol de los eventos extremos en la Geomorfología Fluvial

La evidencia estadística presentada en el apartado anterior reafirma la importancia que tienen los eventos extremos en la generación de sedimentos. Sin embargo la evidencia no es solamente estadística, el trabajo de campo presentado en este apartado se analiza con detalle las consecuencias del evento descrito anteriormente sobre la Geomorfología Fluvial, la remoción en masa y los cambios rápidos sobre la geometría del cauce.

La transformación intensa y repentina de los sistemas fluviales en fondos de valle y sectores de ladera se da durante eventos extremos, cuando la competencia del curso fluvial es máxima y tiene la capacidad de reorganizar drásticamente la disposición del material aluvial (Starkel 1976, 1995, 2002; Starkel et al. 1998).

Para poder comprender integralmente como ocurrió un evento extremo tan intenso en una cuenca relativamente pequeña (3.2 km²) es necesario profundizar en el contexto regional donde está ubicada el área de estudio, en términos de su climatología y mecanismos lluvia, los procesos morfogenéticos endógenos fundamentalmente relacionadas a la neo-tectónica local y la misma geomorfología de la cuenca. Por su posición geográfica (Sur de Cordillera de Tilarán) la cuenca se encuentra influenciada por un aporte constante de humedad. El constante ingreso de humedad

del Caribe causa una saturación pre-evento y relativamente constante a lo largo de todo año que contribuye a la generación rápida de escorrentía superficial en las laderas cuando las intensas lluvias convectivas caen sobre la cuenca (Muñoz-Villers & McDonnell, 2012).

La dirección del río San Lorencito está controlada por un sistema de fallas paralelas con orientación SW-NE (Denyer et al., 2003; Bergoeing, 2007). El área de estudio es una zona sumamente comprimida y sometida a esfuerzos de tectonismo local, evidencia de esto está en el intenso diaclasamiento que presentan las rocas que afloran en las márgenes del y lecho del río (ver Figuras 17, 18, 19).



Figura 17. Flujo de retorno controlado por un plano de falla sobre brecha



Figura 18. Diaclasamiento sobre andesitas en una margen del río San Lorencito, estas recientemente impactas por el evento extremo.



Figura 19. Diaclasamiento expansivo sobre brecha meteorizada en las márgenes del río San Lorencito.

Esta condición de diaclasamiento observada en las rocas prepara el material de ladera, margen y lecho del río para desprenderse fácilmente ante eventos de precipitación intensos que incrementan el caudal del río y con ello la competencia de transporte y la capacidad erosiva. Estas rocas flojas contribuyen a la rápida incorporación de material a los tributarios y el río principal durante estas avenidas.

La mayoría de deslizamientos y desprendimientos (derrumbes o caídas) de roca que cayeron directamente al cauce principal durante el evento fueron identificados en esta sección estrecha y encañonada del río. En las secciones más anchas hay grandes depósitos aluviales que están caóticamente organizados. Estos forman terrazas compuestas principalmente bloques rodados de tamaños diversos que van de 0.2 m a 1m que evidencian un comportamiento torrencial y la competencia del río cuando eventos extremos ocurren (Bergoeing, 2007). Las laderas tienen evidencias de profundas cicatrices de deslizamientos que han dado origen a micro cuencas de tributarios, dichos depósitos de los deslizamientos han formado conos de deyección en su confluencia con el río principal. Estos conos, en algunas ocasiones, han dado origen a profundos depósitos aluviales.

Los abanicos aluviales formados por el flujo de materiales provenientes de las laderas son importantes para comprender la dinámica fluvial del río en términos de sus procesos erosivos y de deposición. Durante el evento extremo descrito todos los tributarios mostraron cambios morfológicos en su desembocadura con el río principal, gran cantidad de aluviones andesíticos angulares fueron incorporados desde la ladera por remoción en masa. Los abanicos aluviales que forman los tributarios pueden causar modificaciones en el cauce del río principal; la acumulación de aluviones puede ocasionar una desviación en el flujo de agua si carece de competencia para transportar el material. Los tributarios que dan origen a estos abanicos aluviales tienen una pendientes fuertes y tienen un dirección casi rectilínea, posiblemente dichos flujos están controlados por el micro-tectonismo local de la cuenca (ver Figura 20).

La cuenca de estudio es un área con profunda meteorización hidrotermal en su substrato y sometida a intensos esfuerzos producto del tectonismo regional, esto da como resultado que las rocas sumamente diaclasadas y preparadas para la movilización fluvial o gravitacional cuando eventos intensos de precipitación ocurren. La combinación de éste material flojo y predispuesto

para la movilización sumada a las condiciones climatológicas que involucran ambas vertientes da como resultado un río con un comportamiento torrencial que tiene la capacidad de movilizar gran cantidad de material a través de flujos de detritos y crecidas torrenciales que periódicamente reorganizan la geomorfología fluvial de la cuenca.

Eventos extremos como el registrado 10-11/8/2015 (ver Figura 10 (2), Cuadro I) dan lugar a intensas reorganizaciones de los depósitos aluviales que están en la sección húmeda y las terrazas aluviales adyacentes, las crecidas torrenciales y la alta competencia del río para movilizar el material transportan el material río abajo. Las terrazas aluviales adyacentes están compuestas de bloques heterométricos y heteromórfico (ver Figuras 21, 22) que han sido transportados por eventos extremos pasados. Durante crecidas torrenciales estos aluviones pueden llegar a reincorporarse y seguir su tránsito, sin embargo durante eventos extremos dichas terrazas aluviales también pueden recibir contribuciones de material aluvial o coluvial que incrementan el volumen y área de los depósitos.

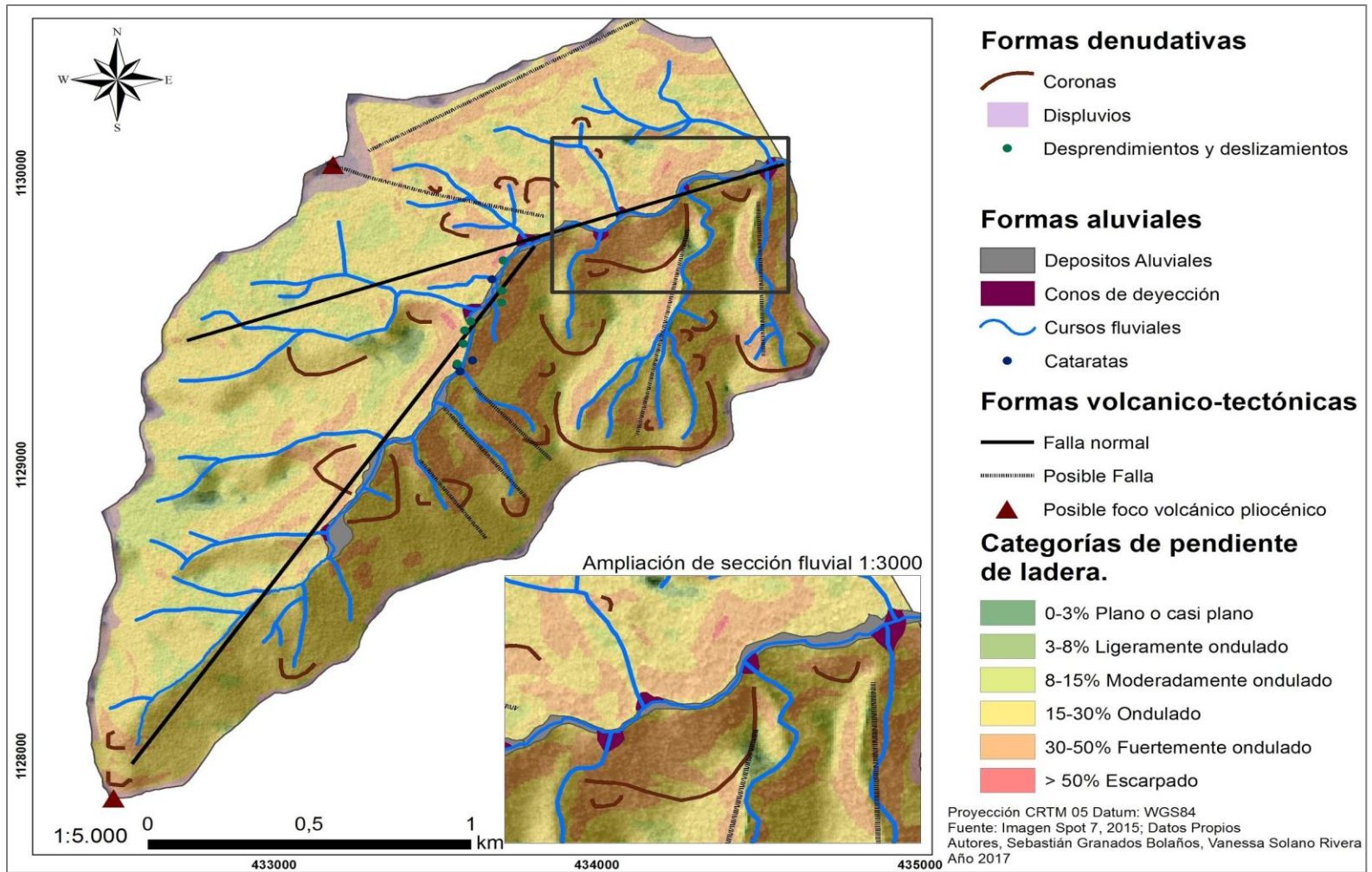


Figura 20. Geomorfología 1:5000 de la cuenca del río San Lorencito.



Figura 21. Horizonte de una terraza aluvial recientemente erosionada con evidencia de gran cantidad de material coluvial angular sobre su superficie e una incipiente pedogenesis en su superficie, la base de dicho perfil está compuesta por material aluvial heterogénico, heterolítico y caótico.



Figura 22. A la izquierda: perfil erosionado de una terraza aluvial compuesta por material caótico posiblemente depositado por una avenida aluvial pasada. Sobre su superficie un bloque posiblemente coluvial y vegetación de bosque. A la derecha: Perfil de terraza aluvial intensamente erosionado por el evento extremo. Nótese la vegetación sobre su superficie y una incipiente pedogenesis en su superficie.



Figura 23. Depósito aluvial formado posterior al evento extremo.



Figura 24. Derrumbe de la formación superficial de ladera. Material coluvial ingresando directamente en el cauce posterior al evento extremo, el río al no tener suficiente competencia para transportar el depósito es forzado a desviarse y cambiar su cauce parcialmente. La longitud de dicho depósito es de aproximadamente 15 metros.

Durante eventos extremos la movilización de material desde las laderas se da principalmente por remoción en masa y erosión laminar por escorrentía superficial. Los abanicos aluviales que forman los tributarios pueden cambiar el cauce del río principal por la rápida acumulación de material que sobrepasa la competencia del río principal. Una fotografía tomada con un vehículo aéreo no tripulado sobre una sección del río muestra un cambio en el cauce del río principal debido a la contribución de material aluvial proveniente del tributario 2A.

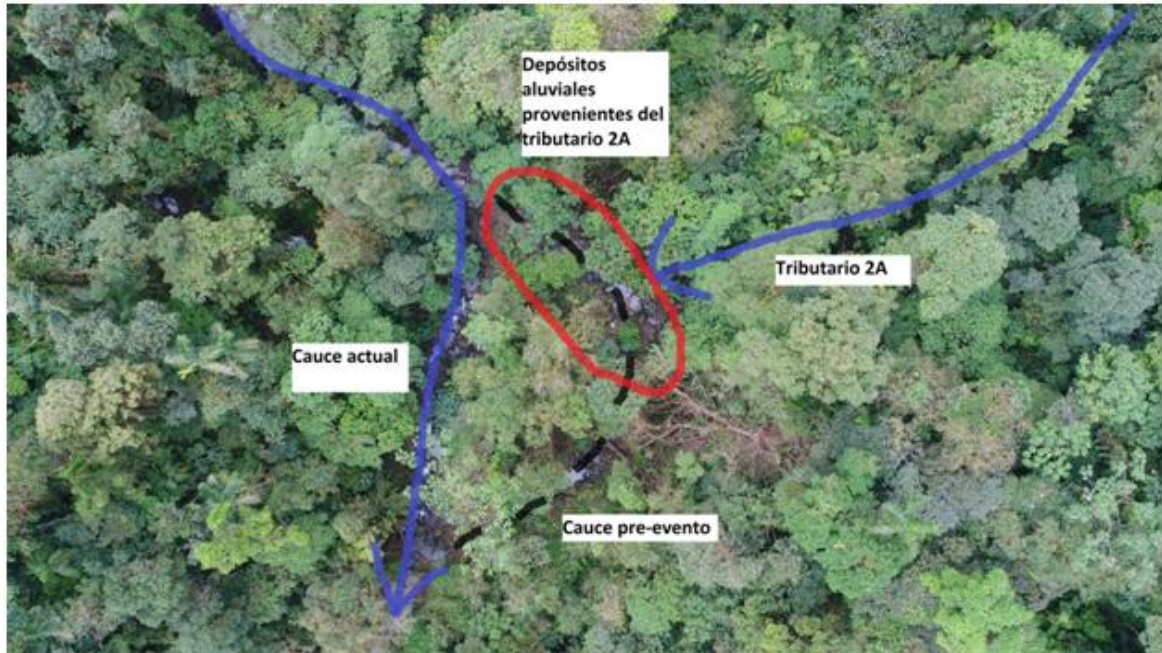


Figura 25. Cambio en el cauce del río principal por incorporación de aluviones del tributario 2A tomada con un vehículo aéreo no tripulado a 120 metros de altitud.

Los eventos extremos en cuestión de horas pueden generar intensos cambios morfológicos en la geometría del cauce que bajo condiciones climatológicas promedio pueden tardar décadas en ocurrir, uno de los funcionarios de la reserva (Hugo Pérez) mencionó que durante sus 40 años de trabajar en la ReBAMB nunca había visto un evento que generase tantos cambios en el río.

Las crecidas torrenciales son parte del comportamiento normal de la cuenca, las profundas cicatrices en las laderas y la composición de las terrazas aluviales adyacentes al río son una fuerte evidencia de un comportamiento reciente torrencial del Holoceno (Vargas, 1978).

La generación de sedimentos es máxima en términos de intensidad y duración durante eventos

extremos, la sobresaturación de los suelos favorece una intensa escorrentía superficial que causa erosión laminar importante (ver Figura 11). Durante eventos extremos la generación de deslizamientos y desprendimientos de rocas es máxima dichos flujos de material pueden caer directamente al cauce y ser arrastrados por tributarios en las laderas.



Figura 26. Sitio de ubicación de los sensores automatizados a la izquierda antes y a la derecha después del evento extremo. Nótese que el río modificó su cauce debido a la acumulación de aluviones tras ocurrido el evento extremo.

6.3 Origen de los sedimentos y conectividad ladera-río.

Dos fuentes principales de sedimentos fueron identificadas en función de su origen: material de ladera, y aluviones y material de cauce. Tal como se mencionó anteriormente los suelos de la cuenca de estudio tienen altas concentraciones de arenas finas y medias. Al hacer un análisis de morfoscopia de cuarzos comparativo de las arenas finas y medias (0.63 mm a 0.063 mm) de los sedimentos del río con las arenas encontradas en los perfiles de suelo se determina que la morfología y grados de oxidación son casi idénticos.

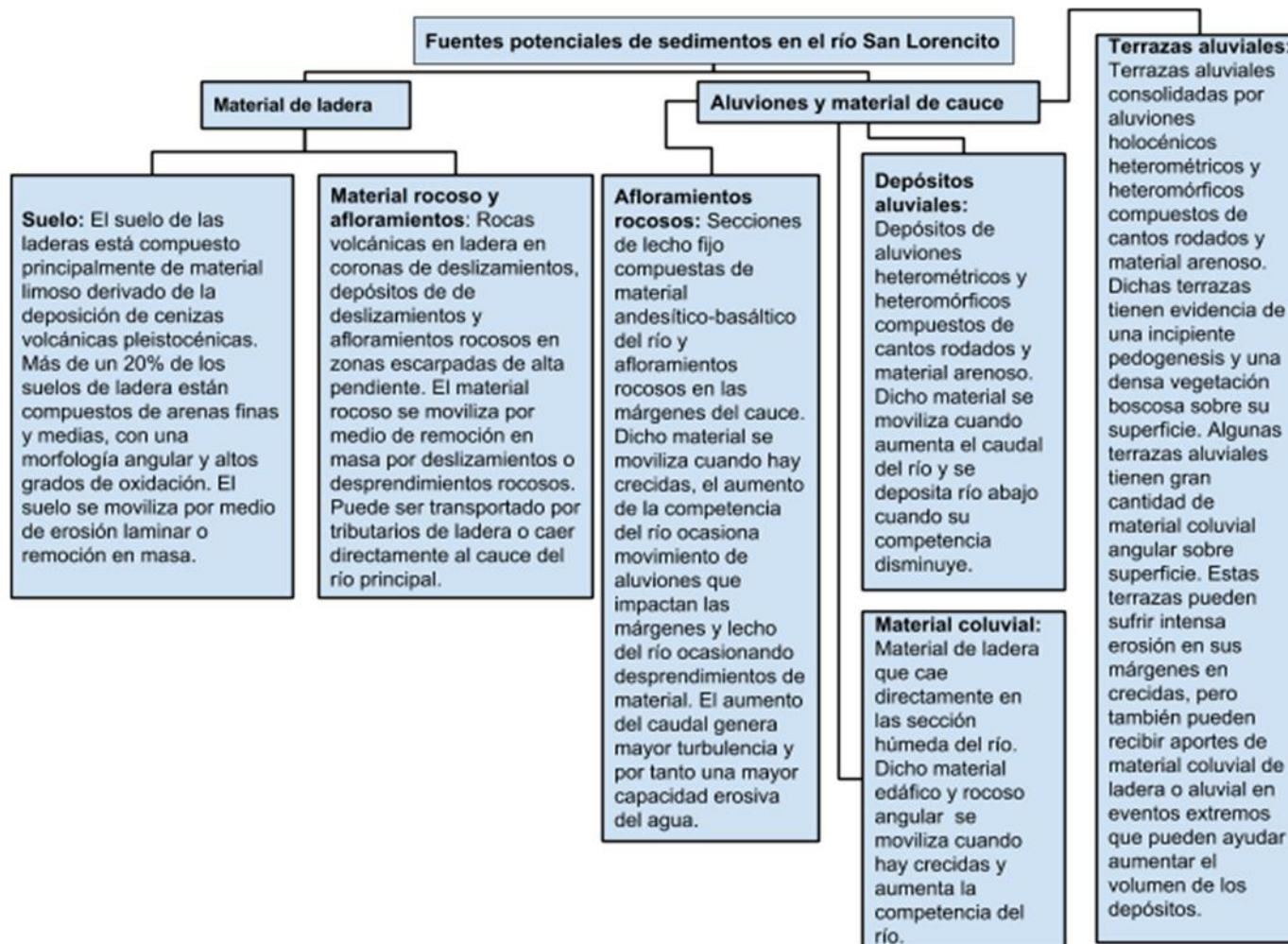


Figura 27. Fuentes potenciales de sedimentos en la cuenca del río San Lorencito.



Figura 28. Fotografía que muestra la vista a través de un estereoscopio de arenas medias y finas con oxidación limonítica sesquióxidos de hierro y aluminio. A la izquierda arenas finas y medias de una muestra de suelo, a la derecha una muestra de arenas finas y medias del tributario 1B. Dicha muestra de arenas de suelo fue recolectada en una ladera de la cuenca del tributario 1B.

La fuerte similitud entre las arenas analizadas de tributarios y del suelo en términos de morfología y oxidación dan una fuerte evidencia de conectividad ladera-río. Existe evidencia para suponer que la arena fina y media disponible en el río San Lorencito proviene del suelo de ladera, sin embargo se requiere más evidencia estadística para hacer una afirmación y reducir la incertidumbre. Debido al tamaño de la cuenca y longitud de recorrido del río es poco probable que dichas arenas se hayan formado por acción mecánica del curso fluvial, sino más bien por el mismo proceso de pedogenesis de ladera.

Los climas tropicales están tipificados por lluvias más intensas que en las regiones templadas y

ésta intensidad es acompañada por tormentas de mayor tamaño, magnitud y duración. Los deslizamientos con cimientos profundos están fuertemente influenciados por los efectos prolongados de las lluvias (Thomas, 1994). Posterior al evento extremo múltiples deslizamientos y desprendimientos de rocas profundos y superficiales fueron observados, la mayoría de ellos se depositaron directamente al río, incorporando rocas angulares, suelo y vegetación. Al analizar la morfología y topografía de las cabeceras de las micro-cuencas de los tributarios es posible determinar la existencia de profundas cicatrices de deslizamientos que en algunos casos tienen más de 300 metros de ancho (ver Figura 20). Dichos deslizamientos, antiguos y erosionados, han dado lugar a abanicos aluviales que en algunos casos han formado terrazas aluviales muy consolidadas con vegetación en su superficie. No fue posible visitar cada uno de las coronas presentadas en el mapa anterior por cuestiones de accesibilidad y seguridad, sin embargo un análisis topográfico mediante SIG permitió identificar coronas que corresponden a antiguas cicatrices de deslizamientos. Nótese que la mayoría de deslizamientos reconocidos están en la ladera A (Sur) (ver Figura 20). Al comparar la Geomorfología 1:5000 con el Índice Masa Foliar (ver Figura 7) se puede notar que en la ladera además de haber más remoción en masa hay menos masa foliar sobre su dosel y posiblemente en el mantillo. Al analizar las pendientes (ver Figuras 2 y 20) se puede observar, también, que la ladera A tiene pendientes más fuertes. La ladera A está sometida a fuertes esfuerzos tectónicos al estar entre un sistema de fallas paralelas normales (Falla San Lorenzo, Falla Jaimical y Falla San Lorencito, esta última aún no ha sido formalmente estudiada y no hay literatura al respecto, las otras dos fallas están cartografiadas en el Atlas tectónico de Costa Rica realizado por Denyer, et al. (2003). Los datos permiten inferir que la ladera A tiene la capacidad de generar avenidas más violentas que la ladera B, sin embargo no hay suficiente evidencia para comprobar dicha hipótesis. Es necesario profundizar más en el análisis de los sedimentos y la morfología de los tributarios para encontrar diferenciaciones en la dinámica de generación de sedimentos y cantos rodados por la ladera.

6.3.1 Aluviones y material de cauce

Los sedimentos que se generan por el desgaste del lecho fijo de una sección están directamente relacionados con la velocidad y turbulencia del flujo de agua en determinada sección. Las secciones con fuerte pendiente pueden formar un cauce encañonado que entalla a través de la

roca volcánica. Durante crecidas del río, las secciones de lecho fijo la velocidad del agua aumenta y con ello la turbulencia y la competencia, lo cual intensifica la erosión fluvial en las márgenes y el lecho del río con afloramientos rocosos. Estas frecuentes crecidas observadas durante el año hidrológico generan una reorganización de los aluviones en el cauce y los transporta, este movimiento de cantos y bloques genera fuertes impactos en el lecho y margen del río, causando desprendimientos de rocas que se incorporan al flujo. El diaclasamiento previo de estos afloramientos contribuye al fácil desprendimiento de material en forma de sedimentos, guijarros y cantos.

Las terrazas aluviales pueden ser encontradas adyacentes al río en todo su recorrido. Estas acumulaciones de material aluvial pueden tener áreas muy grandes, comprobación de campo encontró terrazas con áreas de hasta 3000 metros cuadrados, es decir 0.3 hectáreas. El origen de estas terrazas posiblemente está relacionado con avenidas torrenciales recientes. Algunas de estas terrazas tienen profundos perfiles de suelo en su superficie con una incipiente pedogenesis. Estas terrazas pueden sufrir aporte de material proveniente de las laderas, deslizamientos aportan grandes cantidades de suelo y material rocoso angular a su superficie. Algunas de estas terrazas tienen árboles de más de 100 años al estimar la edad con el grosor de su tronco.

6.3.2 Material coluvial

En zonas de alta pendiente cercanas al río, por donde el río fluye en secciones encañonadas pueden ocurrir deslizamientos o desprendimientos de material que caen en la sección húmeda del río, si al momento de la caída el caudal no es suficiente para transportar el material, puede ocurrir una desviación parcial del flujo de agua ocasionando erosión en el mismo depósito que cayó. Después del evento extremo mencionado anteriormente múltiples deslizamientos cayeron al cauce, esto generó una turbidez prolongada aun cuando disminuyó el nivel del agua, esto debido a la constante erosión que realiza el flujo en estos depósitos de material.

Los resultados de campo, laboratorio y análisis estadísticos muestran una cuenca con un comportamiento torrencial, en donde la generación y transporte de sedimentos está directamente condicionada por la estacionalidad climática. Habiendo analizado la dinámica temporal, espacial del transporte y generación de sedimentos así como también las fuentes

potenciales de los orígenes de los sedimentos se establecen las siguientes discusiones acerca de las hipótesis planteadas inicialmente.

Conclusiones

La turbidez medida mediante el método nefelométrico no puede ser utilizada para calcular un flujo de masa preciso en el río San Lorencito. Los experimentos de turbidez en laboratorio por tamaño de partícula mostraron que las arenas en general no tienen la capacidad de disolución o suspensión y por lo tanto no es posible percibir el tránsito de arenas utilizando un turbidímetro. La turbidez que se genera en los sedimentos del río San Lorencito se debe a la suspensión de partículas de limo derivadas de ceniza volcánica y materia orgánica y estas partículas menores a 0.63 mm componen en promedio menos del 5% de las muestras analizadas de arena.

Durante el año hidrológico la distribución de los eventos de precipitación es muy desigual, únicamente 7% de los eventos estudiados se presentaron en época seca y los restantes 93% en la época lluviosa

Durante el año hidrológico estudiado se presentaron 29 eventos de precipitación (2 en época seca y 27 en época lluviosa). Los eventos presentaron comportamientos estacionalmente muy distintos, principalmente respecto a los aumentos en el nivel de agua y la generación de turbidez.

La precipitación es el principal mecanismo que activa la generación de sedimentos en la cuenca. La intensidad de la erosión laminar, la frecuencia de eventos de remoción en masa, el aumento del caudal del río y capacidad de transporte y erosión de material están directamente relacionados con la magnitud, intensidad y duración de la precipitación sobre la cuenca. Sin embargo, variables, que si bien están ligadas a la precipitación no son propiedades suyas, como el período seco y la humedad antecedente condicionan en gran parte la respuesta de la cuenca ante eventos lluviosos. Por tanto, no es posible conocer o predecir el comportamiento de la cuenca con solo saber la intensidad y duración de la precipitación.

Existe una correspondencia entre las dinámicas de transporte de sedimentos y las variabilidades en el régimen pluvial (estacionalmente). El proceso de sustitución de carga ocurre principalmente en la época lluviosa, la mayoría de eventos con turbidez intensa y prolongada ocurre durante la

época lluviosa. Durante la época seca la generación de sedimentos es mínima debido a la poca precipitación.

Un evento extremo sucedido en Agosto 2015 modificó el comportamiento de respuesta de la cuenca ante eventos lluviosos. El tiempo ocurrido entre pico máximo de nivel de agua y el pico máximo de turbidez cambiaron sustancialmente después del evento extremo. Además, el análisis realizado muestra que anteriormente al evento extremo los eventos presentaron un comportamiento complejo ligado a una tendencia múltiplo y no a un comportamiento histerético. Por otro lado, tras ocurrido el evento extremo, los eventos de precipitación mostraron una tendencia muy alta hacia un índice de histéresis con una dirección horario o anti-horaria poco marcada, reflejándose curvas en forma de ocho. Ambos patrones muestran una complejidad innegable en la respuesta de la cuenca, pero indican procesos de generación de turbidez muy distintos.

Los eventos extremos son un comportamiento normal de la cuenca en términos de tiempo geológico, hay evidencias contundentes de eventos torrenciales pasados. Entender dicho comportamiento torrencial de la cuenca ayuda a explicar la formación de las extensas llanuras aluviales del norte de Costa Rica y la fuerte carga de sedimentos suspendidos de la cuenca del río San Carlos que desemboca en el río San Juan.

La cuenca presenta alta resiliencia hacia los eventos de precipitación extremos. Tras ocurrido un evento extremo, el comportamiento del transporte de sedimentos se recuperó en 3 meses aproximadamente. El tamaño y la morfología de la cuenca, y la cobertura vegetal prístina favorecen la rápida recuperación y el retorno hacia condiciones similares a las preexistentes.

El origen de los sedimentos del río San Lorencito proviene principalmente de las laderas de la cuenca, siendo la erosión laminar y la remoción en masa los principales mecanismos por los cuales los sedimentos llegan al río principal.

En el cauce del río se forman sedimentos por la erosión fluvial que desgasta las márgenes y lecho del río. Dicha erosión desgasta constantemente las márgenes de los depósitos aluviales que están adyacentes al río. Las crecidas que aumentan el caudal y turbulencia del agua considerablemente suceden únicamente durante la época lluviosa y puede modificar drásticamente la geometría del

cauce principal.

La cuenca es un torrente de montaña y tienen la capacidad de movilizar grandes cantidades de material en avenidas con flujos de detritos. Los conos de deyección que forman los tributarios de la cuenca y las profundas cicatrices de deslizamientos en las laderas son evidencias contundentes de eventos torrenciales pasados. Los tributarios por su pendiente y gran capacidad de transporte de bloques y cantos rodados se comportan como torrentes que tienen la capacidad de rápidamente movilizar violentos flujos de material provenientes de la ladera.

El intenso tectonismo a la que está sometida la cuenca controla la orientación geográfica del río San Lorencito, dicho curso fluvial sigue un plano de falla normal aún no descrito por ningún texto geológico. Los esfuerzos tectónicos también se manifiestan en pequeñas fallas que se encuentran en las laderas, estas en algunos casos también controlan la orientación de algunos tributarios. El material al estar sometido a estos esfuerzos está sumamente diaclasado y con fácil capacidad para desprenderse por erosión fluvial, gravedad y eventos de precipitación intensos.

Los sedimentos del río San Lorencito están compuestos de material volcánico donde se puede encontrar partícula de fenocristales de plagioclasa, augita, hipersteno, magnetita, ocasionalmente horblenda, biotita u olivino, cuarzo y otros materiales cuyo nivel de oxidación dificulta la identificación del material. La morfología de dichos sedimentos es angular y con altos grados de oxidación.

Hay una fuerte conectividad de las laderas con el río durante la época lluviosa. Durante la época seca la conectividad ladera-río disminuye sustancialmente.

Existe una fuerte similitud en términos de morfología, oxidación y mineralogía de las arenas finas y medias del río y los tributarios con las arenas encontradas en las muestras de suelo de las laderas. Dichas arenas son generadas a partir de un proceso de pedogenesis en el suelo. Esta similitud de las arenas confirma la fuerte conectividad que hay de las laderas con el río.

Las laderas de la cuenca sufren una intensa erosión laminar durante la época lluviosa. La morfología que condiciona las pendientes de la cuenca sumado al material edáfico derivado de la deposición de ceniza es sumamente móvil, las mediciones de varillas de erosión muestran un fuerte movimiento de material por flujos preferenciales del agua. A pesar de la cobertura

boscosa las mediciones de erosión en la cuenca desmitifican la creencia de poca o nula erosión en los bosques tropicales bajo sustrato volcánico.

Recomendaciones

La realización de la investigación anteriormente presentada permitió observar las oportunidades y los retos que derivan del trabajo en campo en bosques tropicales prístinos, del uso de equipo de monitoreo novedoso, y del análisis de datos de alta resolución temporal. Además, el estudio de temáticas poco exploradas a nivel nacional e internacional, evidencia el potencial existente en temas poco tradicionales y la importancia de cubrir los vacíos de información existentes.

A continuación se presentan las principales recomendaciones que surgen de esta tesis:

-Ampliar la escala de aplicación de este estudio, ponerlo en un contexto más amplio donde las conclusiones permitan aplicar los hallazgos encontrados y los conocimientos adquiridos en la gestión y el manejo sostenible del recurso hídrico.

-Generar y/o aplicar una metodología que permita medir el transporte de sedimentos mediante procesos de disolución, saltación y rodamiento dentro del río San Lorencito con el objetivo de elaborar un balance sedimentológico para la cuenca.

-Llevar a cabo mediciones espacialmente distribuidas de las variables monitoreadas en esta investigación (nivel de agua, turbidez, precipitación, erosión) con el fin de generar nuevos hallazgos que permitan vislumbrar con mayor detalle la dinámica del transporte de sedimentos del río San Lorencito.

-Cuantificar y cualificar los efectos de la vegetación sobre los procesos de erosión de manera detallada y analizar su papel a nivel de cuenca.

-Ampliar la base de datos sobre la textura superficial de los suelos con el fin de generar una interpolación que permita hacer un mapa textural, con lo que se puede, entre otras cosas,

conocer con detalle el tipo de sedimento que aportan las laderas.

-Realizar parcelas de sedimentos permanentes y mantener un monitoreo constante para observar en una escala temporal más amplia la movilidad de estos y comprender sus dinámicas con mayor detalle.

-Cuantificar y cualificar el proceso de erosión en los senderos existentes en la ReBAMB y analizar su papel a nivel de cuenca.

-Caracterizar los tributarios que fueron cubiertos en esta investigación, monitorear su respuesta ante eventos de precipitación y lograr comprender la generación y el transporte de sedimentos en sus cuencas.

-Aprovechar las facilidades que presenta la ReBAMB para el estudio y la comprensión de los procesos que se llevan a cabo en bosques primarios; y mantener investigaciones constantes que permitan vislumbrar las dinámicas de un ambiente tropical prístino.

Bibliografía

Alvarado, A. (1985). El origen de los suelos. *Serie Materiales de enseñanza*.

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater. Estados Unidos.

Arias, A. C. (2007). *Suelos Tropicales*. San José: EUNED.

Barrantes, T. (1986). Identificación y descripción de la flora del sotobosque de una sección de la Reserva Forestal de San Ramón, Alajuela. Práctica dirigida para optar por el grado de licenciatura en Biología; Universidad de Costa Rica.

Brandt, S. (1999). Reservoir Desiltation by Means of Hydraulic Flushing: Sedimentological and Geomorphological Effects in Reservoirs and Downstream Reaches As Illustrated by the Cachí Reservoir and the Reventazón River, Costa Rica. *Geographica Hafniensia A8* , 231.

Brandt, S. A., & Swenning, J. (1999). Sedimentological and geomorphological effects of reservoir flushing: the Cachí Reservoir, Costa Rica, 1996. *Geografiska Annaler*, 391-407.

Bergoeing J P. 2007. Geomorfología de Costa Rica. Librería Francesa: San José.

Centro Científico Tropical . (2005). Mapa Ecológico de Costa Rica (zonas de vida) según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L. R. Holdridge. San José.

Córdova, H. (2002). Naturaleza y sociedad: una introducción a la geografía. Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Corrales, J. P. (2007). Análisis de la problemática de los sedimentos en un embalse pequeño de almacenamiento y sus posibles soluciones. Proyecto Final de Graduación: Universidad de Costa

Rica.

Csermák, B., & Rákóczy, L. (1980). Erosion and sedimentation. En Ö. Starosolszky (Ed.), Applied Surface Hydrology. Estados Unidos: Water Resources Publications.

Denyer, P & Arias, O., 1991 Estratigrafía de la región central de Costa Rica. – Revista Geológica América Central 12: 1-59

Denyer P, Montero W, Alvarado GE. 2003. Atlas tectónico de Costa Rica. UCR: San José.

Di Stéfano, J. F., Brenes, L., & Mora, V. (1995). Composición florística y estructura de un bosque primario del piso premontano pluvial, en San Ramón, Costa Rica . Revista de Biología Tropical, 67-73.

Duvert C., Gratiot N, Evrard O, Navratil O, Némery J, Prat C, Esteves M. 2010. Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments of the Mexican Central Highlands. Geomorphology 123 : 243-256.

García, M. (2008). Sediment transport and morphodynamics. En M. García (Ed.), Sedimentation Engineering: processes, measurements, modeling and practice (págs. 21-164). Estados Unidos, Estados Unidos: American society of Civil Engineers.

García-Chevesich, P. (2008). Procesos y control de la erosión. Estado Unidos: Outskirts Press, Inc.

Hancock, G. R., & Lowry, J.B. C. (2015). Hillslope erosion measurement --a simple approach to a complex process. Hydrological Processes.

Henríquez, C., & Cabalceta, G. (2012). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. San José: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

Hudson-Edwards, K. (2007). Fluvial Environments. En C. Perry, & K. Taylor, Environmental Sedimentology (págs. 75-108). Gran Bretaña: Blackwell Publishing Ltd.

Hudson PF. 2003. Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco Basin, Mexico. *Catena* 52 : 57-76.

Instituto costarricense de electricidad . (1965). *Informe sobre el problema del río Reventado* . San José, Costa Rica.

Jansson, M. (1992). Suspended sediment outflow from the Cachí Reservoir during the flushing in 1990. *UNGI Rapport 81, Uppsala University, Department of Physical Geography* , 127-136.

Jansson, M. B. (2002). Determining Sediment Source Areas in a Tropical River Basin, Costa Rica. *Catena*, 47, 63-84.

Jiménez, O., Farias, H., & Rodríguez, C. (2005). Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. Estudios de casos en Costa Rica y República Dominicana. . *Ingeniería del Agua* , 1-16.

Julien, P. (1998). *Erosion and sedimentation*. Cambridge: Cambridge University Press.

Kirchner, J., Feng, X., Neal, C., & Robson, A. (2004). The fine structure of water-quality dynamics: the (high frequency) wave of the future. *Hydrological Processes*, 1353-1359.

Krishnaswamy, J., Halpin, P. N., & Richter, D. D. (2001a). Dynamics of sediment discharge in relation to land-use and hydro-climatology in a humid tropical watershed in Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 253, 91-109.

Krishnaswamy, J., Richter, D., Halpin, P., & Hofmockel, M. (2001b). Spatial patterns of suspended sediment yields in a humid tropical watershed in Costa Rica. *Hydrological Processes vol 5* , 2237-2257.

Kussmaul, S. (2000). Estratigrafía de las rocas ígneas. En P. Denyer, & S. Kussmaul, *Geología de*

Costa Rica (págs. 63-87). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Lewis, J. (1996). Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. *Water Resources Research*, 32: 2299-2310.

Madrigal R. 1972. Resuman de la estratigrafía de Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología, UCR, Costa Rica.

MacArthur, R., Neill, C., Hall, B., Galay, V., & Shvidchenko, A. (2008). Overview of sedimentation engineering. En M. García (Ed.), *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling and practice* (págs. 1-20). Estados Unidos: American Society of Civil Engineers.

Muñoz-Villers, L. E., & McDonnell, J. J. (2012). Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research* , 48.

NOAA. (2015). United States National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado el 6 de Diciembre de 2015, de http://www.nwrfc.noaa.gov/info/water_cycle/hydrology.cgi

Norambuena P, Luzio W, Vera W. 2002. Comparison between the pipette and bouyoucos methods and their relation with water retention in eight soils of the andean plateau, Parinacota Province, Chile. *Agricultura Técnica* 62(1).

Organización Meteorológica Mundial. (1993). Manual de observación de nubes y otros meteoros. En *Atlas Internacional de Nubes* (Vol. I). Ginebra: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.

Ortíz, R., Mora, V. 1996. Algunas consideraciones fenológicas sobre las especies de plantas vasculares superiores en la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes en San Ramón. *Pensamiento Actual* 2: 83-90

Perks MT, Owen GJ, Benskin CMcWH, Jonczyk J, Deasy C, Burke S, Reaney SM, Haygarth PM.

2015. Dominant mechanisms for the delivery of fine sediment and phosphorus to fluvial networks draining grassland dominated headwater catchments. *Science of the Total Environment* 523 : 178-190.

Romero, J. (1999). *Calidad del agua*. México, D.F.: Alfaomega grupo editor, S.A.

Saito, k., Ogawa, S., Aihara, M., & Otowa, K. (2001). Estimates of LAI for forest management in Okutama. *Remote Sensing*.

Salazar, L. G. (2000). Geomorfología. En P. Denyer, & S. Kussmaul, *Geología de Costa Rica* (págs. 171-184). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Salazar, L & Madrigal, R, 1996: Unidades geomorfológicas y su relación directa con la litología. -En *Geología de Costa Rica* Compilado por Percy Denyer y Siegfried Kussmal 1ed Cartago Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2000.

Salazar-Rodríguez, A. (2000). Reserva Biológica Alberto Ml. Brenes: Veinticinco años de conservación, investigación y bioalfabetización. San Ramón: Universidad de Costa Rica.

Samboni, N., Carvajal, Y., & Escobar, J. (2007). Revisión de los parámetros físico-químicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación* , 27 (3), 172-181.

Shanley, J., McDowell, W., & Stallard, R. (2011). 4- Long-term patterns and short-term dynamics of stream solutes and suspended sediment in a rapidly weathering tropical watershed. *Water Resources Research*, 47.

Sistema Costarricense de Información Jurídica. (s.f.). Ley 7354. Recuperado en Mayo de 2017, de Sistema Costarricense de Información Jurídica: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=18093&nValor3=19305&strTipM=TC

Starkel L. 1976. The role of extreme (catastrophic) meteorological events in the contemporaneous evolution of slopes E. Derbyshire (Ed.), *Geomorphology and Climate*, Wiley, London (1976), pp. 203-246

Starkel L. 1995. Reconstruction of hydrological changes between 7000 and 3000 BP in the upper and middle Vistula River Basin, Poland. *The Holocene* 5: 34–42.

Starkel L. 1998. Frequency of extreme hydroclimatically induced events as a key to understanding environmental changes in the Holocene A.S. Issar, N. Brown (Eds.), *Water, Environment and Society in Times of Climatic Change*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1998), pp. 273-288

Starkel L. 2002. Change in the frequency of extreme events as the indicator of climatic change in the Holocene (in fluvial systems). *Quaternary International* 91: 25–32.

Solano, F. (2007). El trabajo de campo y la práctica en laboratorio en la Geografía aplicada. En J. P. Bergoing, & L. G. Brenes, *Práctica de la Geografía* (págs. 185-210). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Thomas, M. F. (1994). *Geomorphology in the Tropics, A Study of Weathering and Denudation in Low Latitudes*. Chichester: John Wiley and Sons.

UCR, ACCVC, Onca Natural. (Diciembre de 2008). Plan General de Manejo de la Reserva Biológica de Alberto Manuel Brenes. Recuperado el 01 de Junio de 2015, de Biblioteca Conmemorativa Orton:

http://biblioteca.catie.ac.cr:5050/repositorioforestal/bitstream/123456789/6562/1/Plan_GeneraI_de_Manejo_RB%20Alberto%20Manuel%20Brenes.pdf

UNESCO, 2007. Balance hídrico superficial de Costa Rica. Período: 1970-2002. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°10.

Vargas, G. 1978. Diagnóstico y recomendaciones para el manejo y ordenamiento de los recursos

naturales de la cuenca del río San Lorenzo, Alajuela, Costa Rica. Tesis para optar por el grado de licenciatura en Geografía; Universidad de Costa Rica.

Vargas, G. 1991. Algunas consideraciones geográficas, geológicas y ecológicas de la cuenca del río San Lorenzo, San Ramón, Alajuela, Costa Rica. En R. Ortiz (editor).

Veas, N. (2009). *Caracterización y estimación de la erosión laminar en un bosque premontano a partir de un modelado hidrológico. Microcuenca del Río San Lorencito, Cordillera Volcánica de Tilarán, Costa Rica*. Tesis para optar por el grado de licenciatura en Geografía; Universidad de Costa Rica.

Walsh RPD, Bidin K, Blake WH, Chappell NA, Clarke MA, Douglas I, Ghazali R, Sayer AM, Suhaimi J, Tych W, Annammala KV. 2011. Long-term responses of rainforest erosional systems at different spatial scales to selective logging and climatic change. *Philosophical Transactions of the Royal Society London Biological Sciences* 366 (1582).

Wattenberg, I., Breckle, S.W., Ortíz, R. 1996. La diversidad de especies de árboles y la estructura de un Bosque muy Húmedo Premontano en la Reserva Biológica Alberto Manuel. *Pensamiento Actual* 2: 11-19

Waugh, D. (2002). *Geography: An Integrated Approach*. Gran Bretaña.

Whittaker, & R. (1975). *Communities and ecosystems* (Segunda ed.). Nueva York: Macmillan.

Xu, X.-Z., Zhan, S., Yan, Q., & Zhu, M.-D. (2014). Data collection and processing for measurement of time-variable gravity erosion in the laboratory study. En K. Sassa, P. Canuti, & Y. Yin (Edits.), *Landslide Science for a Safer Geoenvironment* (Vol. II, págs. 147-152). Suiza: Springer International Publishing.

Zhang Z, Tao F, Shi P, Xu W, Sun Y, Fukushima T, Onda Y. 2010. Characterizing the flush of stream chemical runoff from forested watersheds. *Hydrological Processes* 24(20) : 2960 - 2970. DOI:

10.1002/hyp.7717

Zimmermann A, Francke T, Elsenbeer H. 2012. Forests and erosion: Insights from a study of suspended-sediment dynamics in an overland flow-prone rainforest catchment. *Journal of Hydrology* 27: 170-181.

Zuecco, G., Penna, D., Borga, M., & Meerveld, H. J. (2016). A versatile index to characterize hysteresis between hydrological variables at the runoff event timescale. *Hydrological Processes*, 30: 1449-1466