

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**MOVIMIENTO INCIPIENTE DEL SEDIMENTO DE FONDO DE UN
RÍO**

**Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa
de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera para optar
al grado y título de Maestría Académica en Hidrología**

LUCRECIA ALVAREZ BARRANTES

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2018

Dedicatoria

Mi familia

Agradecimientos

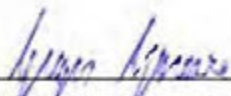
Al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Proyecto Hidroeléctrico el Diquís y Departamento de Hidrología (PH DIQUIS), por darme el apoyo y los recursos necesarios para elaborar esta investigación:

- Ing. Frankiln Ávila, Director del PH DIQUIS
- Ing. Mauricio Varela, Coordinador Departamento de Diseño, PH DIQUIS
- Ing. José Zúñiga, Director de Estudios Básicos de Ingeniería
- Geol. Laura Villalobos Cárdenas, Departamento de Diseño, PH DIQUIS

Asistentes de campo:

- Roger Rodríguez Ortiz
- Heriberto Rojas Rojas
- Manuel Guzmán Bonilla
- Roberto Guzmán Retana
- Errol Villanueva Villanueva
- Wilfrido Fallas Gutierrez
- Orlando Beita Zuñiga
- Kellyn Rojas Herrera

"Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrología."



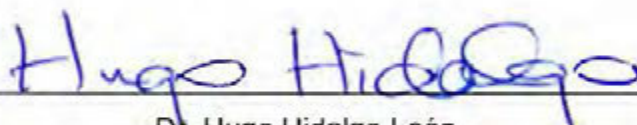
Dr. George Govaere Vicarioli

Representante del Decano Sistema de Estudios de Posgrado



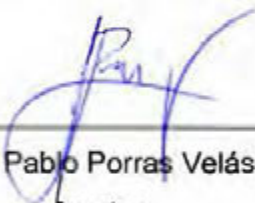
Dr. Rafael Murillo Muñoz

Profesor Guía



Dr. Hugo Hidalgo León

Lector



Dr. José Pablo Porras Velásquez

Lector



Dra. Ana María Durán Quesada,

Directora

Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera



Lucrecia Álvarez Barrantes

Candidata

Contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Hoja de Aprobación	iv
Resumen	viii
Lista de tablas.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de abreviatura	xvi
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodología.....	4
2. Capítulo 2 : Marco Teórico.....	7
2.1. Proceso de sedimentos en una cuenca	7
2.2. Tipos de carga de sedimento.....	8
2.3. Características de los sedimentos	10
2.4. Umbrales de erosión y movimiento incipiente	15
2.4.1. Factores que afectan el movimiento.	16
2.5. Relaciones de iniciación del movimiento.....	17
2.6. Transporte de sedimentos de fondo	28
2.6.1. Relaciones de transporte de fondo	29
2.6.2. Formas de fondo	32
2.7. Mediciones de sedimentos de fondo y tipos de muestreadores	34
2.7.1. Recolección de muestras y análisis	34
2.7.2. Recolección de muestras de sedimento de fondo.....	36
3. Capítulo 3: Caracterización física de los agentes que controlan el transporte del sedimento en los puntos de muestreo.....	39

3.1.	Delimitación y caracterización de las cuencas hasta los sitios	39
3.1.1.	Forma de la cuenca	41
3.1.2.	Tiempo de concentración.....	41
3.1.3.	Cobertura de las cuencas	43
3.1.4.	Descripción del cauce.....	44
3.2.	Descripción climática	47
3.3.	Caracterización hídrica	50
3.4.	Caracterización del sedimento en los sitios de muestreo.....	53
3.4.1.	Granulometría.....	53
3.4.2.	Forma de las partículas	57
3.4.3.	Densidad de las partículas.....	60
3.5.	Síntesis de las caracterizaciones físicas de los agentes que controlan el transporte del sedimento en los puntos de muestreo	62
4.	Capítulo 4: Comportamiento del movimiento incipiente del material del fondo en los cinco puntos de análisis de la cuenca del Río Grande de Térraba	66
4.1.	Trabajo realizado.....	66
4.2.	Análisis de los registros fotográficos.....	69
4.2.1.	Volcán	70
4.2.2.	Ceibo.....	72
4.2.3.	Brujo.....	76
4.2.4.	Palmar.....	79
4.2.5.	Remolino	84
4.3.	Crecientes que generaron el movimiento de las partículas.	85
4.4.	Análisis de la movilidad de las muestras de sedimentos de fondo	88
4.4.1.	Muestra inicial.....	88
4.4.2.	Fracción movilizada	89
4.4.3.	Fracción No Movilizada	91
4.4.4.	Resumen de los resultados	93

5. Capítulo 5: Umbral del movimiento	100
5.1. Modelos hidráulicos	100
5.2. Ecuaciones del movimiento incipiente	104
5.3. Umbral de movimiento y la caracterización de la cuenca.....	112
6. Capítulo 6: Conclusiones	114
7. Bibliografía.....	118
8. ANEXOS.....	123
Anexo 1: Descripción de la recolección de muestras de sedimento	123
Anexo 2: Resumen del análisis realizado a cada uno de las muestras para identificar las partículas que tuvieron movimiento	134
Anexo 3: Curvas granulométricas del material inicial y movilizado de los cuadros de muestreo.....	151
Anexo 4: Parámetros estadísticos de las muestra inicial y fracción movilizada.	152
Anexo 5: Salidas de los parámetros hidráulicas modelados	153

Resumen

En la presente investigación se buscó determinar los umbrales del movimiento incipiente del sedimento de fondo en el rango de gravas, cantos y bloques, en las barras de sedimento de cinco tramos de ríos ubicados en la cuenca del Río Grande de Térraba, Costa Rica. Se realizó una descripción de las principales características de las cuencas que se delimitaban hasta las estaciones hidrológicas y se caracterizó el material que se encontraba en las barras de sedimento. Una vez contextualizado la parte física de la muestra se identificó in situ la iniciación del movimiento del material de fondo en los ríos, por medio de una demarcación y observación de las partículas de sedimento ubicadas en la capa superficial, durante la época lluviosa comprendida entre mayo a noviembre del 2014. Por medio de un modelo hidráulico que representó las condiciones de flujo en campo se determinó el esfuerzo cortante que inició el movimiento de partículas y se compararon los resultados con otras investigaciones

Se identificó que las partículas de sedimento fueron sometidas a esfuerzos cortantes superiores a su umbral de movimiento, existió un movimiento generalizado de la capa superficial durante en el primer periodo de lluvia y nuevamente en el segundo periodo de lluvia. Se identificó que el uso gráfico de Shields (1936), el gráfico Modificado de Shields de Parker (2005) y Yalin y Karahan (1979) se puede utilizar para determinar el movimiento incipiente de las partículas de sedimentos de fondo de los sitios de muestreos. Se recomienda replicar esta metodología del seguimiento del movimiento incipiente de las partículas del material superficial en otras cuencas y/o en laboratorio; además caracterizar el tipo movimiento de las partículas de sedimento (saltación, deslizamiento o rodadas) y las formas de fondo, características que no fueron posibles identificar en esta investigación.

Palabras claves: sedimento de fondo en ríos, iniciación del movimiento, cuenca del Río Grande de Térraba

Lista de tablas

Tabla 2-1.: Clasificación de la carga de sedimentos (García, 2008).....	10
Tabla 2-2:Caracterización del sedimento según su diámetro de partícula, (Julien, 2002)12	
Tabla 2-3: Clasificación de las formas de fondo según Van Rijn (1993).....	33
Tabla 3-1: Características generales de las cuencas hasta los sitios de muestreo	40
Tabla 3-2: Índice de compacidad para las cuencas hasta los sitios de muestreos	41
Tabla 3-3. Cobertura del suelo de la cuencas (Fuente: TEC, 2008).....	43
Tabla 3-4. Precipitación promedio anual en las cuencas (Fuente: IMN 2009).....	49
Tabla 3-5: Caudales promedio mensuales en las estaciones hidrológicas seleccionadas (Fuente: ICE, 2014)	52
Tabla 3-6: Análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos para las estaciones hidrológicas (m ³ /s) (Fuente: ICE, 2014)	53
Tabla 3-7: D ₁₀ , D ₅₀ , D ₈₄ y D ₉₀ de las muestras granulométricas, según el método fotográfico (Fuente: Elaboración propia).....	56
Tabla 3-8. Factores promedio de los parámetros de forma para los sitios de muestreo60	
Tabla 3-9. Resultados de la prueba de densidad realizada a los sitios de muestreo....	61
Tabla 4-1. Recopilación de las actividades realizadas durante el periodo de muestreo (Fuente: Elaboración propia).....	68
Tabla 4-2. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 2, Volcán72	
Tabla 4-3. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 1, Ceibo74	
Tabla 4-4. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 2, Ceibo75	
Tabla 4-5. Diámetros de las partículas que tuvieron movimiento en el Cuadro 1, Brujo, entre mayo y junio 2014.....	77
Tabla 4-6. Diámetros de las partículas que tuvieron movimiento en el Cuadro 2 en Brujo, entre julio y diciembre 2014.	78
Tabla 4-7. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 1, Palmar , entre mayo y julio del 2014	80
Tabla 4-8. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 2, Palmar, entre agosto y diciembre 2014.....	83
Tabla 4-9. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 1, Remolino, entre marzo 2014 y abril 2015	85
Tabla 4-10. Crecientes máximas registradas entre el periodo de las visitas.(Fuente: ICE, 2014)	87

Tabla 4-11: Frecuencia de tamaños de la muestra inicial (Fuente: Elaboración propia)	88
Tabla 4-12: Diámetros característicos de la muestra inicial para cada uno de los cuadros demarcados en las barras de sedimento (Fuente: Elaboración propia)	89
Tabla 4-13: Diámetros característicos de la fracción movilizada (Fuente: Elaboración propia)	90
Tabla 4-14: Porcentajes de movilización de la muestra inicial por tamaño del material de sedimento de fondo. (Fuente: Elaboración propia)	90
Tabla 4-15: Cantidad de partículas según la clasificación del material de la fracción no movilizada (Fuente: Elaboración propia)	93
Tabla 5-1. Ubicación espacial y elevación en msnm de referencia de las escalas ubicadas en las hidrológicas	102
Tabla 5-2. Resultados de la calibración de los modelos hidráulicos	103
Tabla 5-3. Valores promedio de velocidad, tensión de fondo y profundidad del agua sobre la muestra de sedimento fondo, según el modelado hidráulico.	103
Tabla 5-4: Características del sedimento de fondo que utilizó Shields en su investigación (Shields, 1936)	105
Tabla 5-5. Resumen de cálculos realizados para los gráficos de Shields, Shields Modificado y el diagrama de Iniciación del Movimiento de Yalin y Karahan de la muestra inicial (Elaboración propia)	111
Tabla 8-1: D_{50} y D_{90} de las muestras granulométricas, según metodología de muestreo	129
Tabla 8-2: Comparación de algunas características de los muestreos (Fuente: Elaboración propia)	129

Lista de figuras

Figura 1-1. Esquema metodológico del trabajo de investigación (Elaboración propia)...	6
Figura 2-1: Afloramiento de roca margen derecha del río Maíz, el cual es un proveedor natural de material de sedimento grueso.(Elaboración propia)	7
Figura 2-2. Ilustración esquemática de las fuentes de sedimentos en ríos y su geomorfología. (Adaptado de García, 2008 y Charlton, 2008).....	8
Figura 2-3: Clasificación de las partículas sólidas inorgánicas transportadas por un cauce. (Adaptado Van Rijn,1993).....	9
Figura 2-4. Clasificación de la forma de las partículas según el diagrama de Zinc (Adaptado de García, 2008).....	12
Figura 2-5. Ángulo de reposo de diferentes formas de partículas (Julien, 2002).....	15
Figura 2-6: Fuerzas que actúan sobre una partícula y el ángulo de reposo. (García, 2008)	16
Figura 2-7: Esquema de factores que influyen en el transporte de sedimentos (García, 2008)	17
Figura 2-8. Fuerzas actuando en una partícula (García, 2008).....	17
Figura 2-9: Iniciación del movimiento de una partícula en una superficie plana, (Shields, 1936) ($\theta_{cr} = \tau_c *$).....	19
Figura 2-10: Diagrama modificado de Shields (Parker, 2005).....	20
Figura 2-11.Diagrama para la iniciación del movimiento, Yalin y Karahan ,1979 (García, 2008)	21
Figura 2-12. Diagrama de Wiberg y Smith, 1987, para estimar el esfuerzo crítico calculado (ecuación 23) en función del grano de partícula (García, 2008).....	22
Figura 2-13. Diagramas de Wiber y Smith para determinar el valor de D/ks , en función del esfuerzo crítico y la rugosidad crítica de Reynolds. (García, 2008).....	24
Figura 2-14: Diagrama de velocidad máxima permisible de Lischtván-Lebediev.(García, 2008)	25
Figura 2-15: Efecto de la pendiente longitudinal y es esfuerzo cortante, según la ecuación y análisis de Chiew y Parker (1994) (Modificado por García, 2009).....	26
Figura 2-16: Iniciación del movimiento y suspensión para una superficie plana, (Van Rijn, 1984)	27
Figura 2-17: Movimiento de las partículas del sedimento de fondo (Fuente: Elaboración propia)	28

Figura 2-18: Tipos de forma de fondo según Simons y Richardson (1966),(Van Rijn, 1993)	32
Figura 2-19: Tipos de patrones de cresta de formas de fondo (Van Rijn , 1993).....	32
Figura 2-20: Migración de las dunas y antidunas en regímenes de flujo altos y bajos. (Van Rijn , 1993)	33
Figura 2-21: Corrección de deformación de fotografía para determinar el tamaño de partículas, por medio de un programa (Fuente: Elaboración propia).	36
Figura 2-22: Esquema de un muestreador de pozo: (1) caja externa, (2) la caja interna, (3) ancho de la cubierta, (4) la almohadilla de presión, (5) salida del tubo de burbuja, (6) la superficie del agua, (7) tubos de burbujeador y almohada, (8) riberas, (9) Caseta de instrumentación, (10) atrapan el aire, (11) válvulas, (12) transductor de presión (13), fuente de alimentación, (14) de calibre burbuja, y (15) cables a sistema de telemetría remota (Kuhnle 1991), (García, 2008).	37
Figura 3-1. Ubicación de los 5 puntos de muestreo (Fuente : elaboración propia)	40
Figura 3-2. Distribución del tiempo de concentración en la cuenca del río Grande de Térraba.(fuente: elaboración propia).....	42
Figura 3-3.: Cobertura del suelo de las cuencas (Fuente: Atlas Digital, TEC, 2008)	44
Figura 3-4.: Perfil del cauce principal de los sitios de muestreo (Fuente: elaboración propia)	45
Figura 3-5.: Fotografías aéreas de los puntos de muestreo (Fuente: ICE, 2009 y Google Earth, 2017)	46
Figura 3-6. Distribución espacial de la cuenca (Fuente: IMN,2009)	48
Figura 3-7. Distribución temporal de la precipitación para la estación Pindeco (Fuente: IMN, 2009)	50
Figura 3-8. Caudales promedio mensuales para las estaciones hidrológicas en estudio. (Fuente: ICE, 2014)	51
Figura 3-9: Corrección de deformación de fotografía para determinar el tamaño de partículas: (a) fotografía capturado en campo. (c) fotografía escalada. (b) Medición del tamaño de partícula en la estación Palmar, las letras indican el diámetro que se identificó y las unidades son cm. (Elaboración propia).	55
Figura 3-10: Curva granulométrica de los sitios de muestreo según el método fotográfico (Fuente: Elaboración propia).....	56
Figura 3-11. Frecuencia de tamaños de los sitios de muestreo (Elaboración propia)..	57

Figura 3-12: Medición de las 3 dimensiones de las partículas de sedimento, sitio Volcán (Fuente: Elaboración propia).....	58
Figura 3-13: Clasificación de las partículas de cada sitio según el diagrama de forma Sneed y Folk (1985)	59
Figura 3-14. Medición del volumen y peso del sedimento de fondo en la capa superficial, izquierda Remolino y derecha Palmar.(Fuente: Elaboración propia).....	61
Figura 3-15. Correlación del diámetro medio de la partícula vrs masa(Fuente: Elaboración propia)	62
Figura 4-1. Medición del movimiento incipiente del sedimento de fondo de los ríos a) Delimitación el cuadro de 2 m de lado con ayuda de la cinta métrica y cinta adhesiva en la estación hidrológica Remolino. b) demarcado de las piedras dentro del cuadro por medio de pintura de aerosol, estación Remolino. c) Colocación de la escala encima de la muestra. Estación Palmar d) Captación de fotografía lo más paralela posible para disminuir el efecto de profundidad de las fotografías. d) escalado de fotografías de la muestra inicial y medición de los diámetros medios de partículas. e) Identificación de las partículas que tuvieron movimiento.(Fuente: elaboración propia).....	67
Figura 4-2. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Volcán, entre abril y mayo 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro, derecha, observación de la muestra mayo 2014) ..	70
Figura 4-3. Movimiento del sedimento del cuadro 2 en Volcán, entre agosto y diciembre del 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro, derecha, observación de la muestra diciembre 2014)	71
Figura 4-4. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Ceibo, entre abril y mayo 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro, derecha, observación de la muestra mayo 2014) ..	73
Figura 4-5. Movimiento del sedimento del cuadro 2 en Ceibo, entre julio diciembre 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro 2, derecha, observación de la muestra diciembre 2014)	75
Figura 4-6. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Brujo, entre mayo y junio 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro 1, derecha, observación de la muestra junio 2014) ..	76
Figura 4-7. Movimiento del sedimento del cuadro 2 en Brujo, entre julio y diciembre 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro 2, derecha, observación de la muestra)	78
Figura 4-8. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Palmar, entre mayo y julio (Izquierda, demarcado del cuadro 1, derecha, observación de la muestra julio 2014).....	79

Figura 4-9. Disminución de la cantidad de gravas que se observan superficialmente sobre el río debido al depósito de sedimento en suspensión durante la época húmeda, izquierda Cuadro 2 y derecha Cuadro 1, en el río Palmar.	82
Figura 4-10. Movimiento del sedimento del cuadro 2 en Palmar, entre agosto y diciembre (Izquierda, demarcado del cuadro 1, derecha, observación de la muestra diciembre 2014)	83
Figura 4-11. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Remolino, entre marzo 2014 y abril 2015 (Izquierda, demarcado del cuadro 1, derecha, observación de la muestra abril 2015)	84
Figura 4-12. Hidrogramas de las crecientes identificadas máximas que generaron el movimiento incipiente de las partículas de sedimento (Fuente: ICE, 2014).....	87
Figura 4-13. Distribución granulométrica de la muestra de sedimentos inicial y la fracción movilizada para los cinco puntos estudiados de la Cuenca del Río Grande de Térraba (Fuente: Elaboración propia).....	92
Figura 4-14. Distribución granulométrica de la muestra inicial y la fracción no movilizada para los cinco puntos estudiados de la Cuenca del Río Grande de Térraba, (Fuente: Elaboración propia)	94
Figura 4-15.: Comparación de las distribuciones de frecuencia del material inicial, material movilizado y material no movilizado.....	95
Figura 5-1. Gráfico original del experimentos de Shields .(Shields, 1936).....	105
Figura 5-2. Umbral del movimiento incipiente del D_{50} y D_{84} del sedimento de fondo obtenidos para los ríos de la Cuenca del Río Grande de Térraba según el gráfico de Shields. (Shields, 1936)	107
Figura 5-3.: Umbral del movimiento incipiente del D_{50} y D_{84} del sedimento de fondo obtenidos para los ríos de la Cuenca del Río Grande de Térraba según el gráfico Modificado de Shields (Parker, 2005).....	108
Figura 5-4.: Umbral del movimiento incipiente del D_{50} y D_{84} del sedimento de fondo obtenidos para los ríos de la Cuenca del Río Grande de Térraba según el gráfico Yalin y Karahan (1979)	109
Figura 5-5.: Iniciación del movimiento y suspensión de partículas de arena en un lecho plano (Delft Hydraulics, 1972)	110
Figura 5-6.: Esfuerzo cortante máximo obtenido para la creciente que provoco el transporte de sedimento de fondo de los ríos estudiados en función del D_{84} y D_{50} de la muestra de sedimentos inicial	113

Figura 8-1: Aplicación del método de Klingeman, a) Demarcación del círculo de 3 metros de diámetro. B) División del círculo en partes iguales. c) Recolección de muestra de partículas menores a los 4"	124
Figura 8-2: Curva granulométrica realizada por el método de Klingeman, material grueso (Elaboración propia)	124
Figura 8-3. Curva granulométrica realizada por el método de Klingeman, material fino (Elaboración propia)	125
Figura 8-4. Metodología de Wolman aplicada en la estación Remolino.(Elaboración: Propia)	126
Figura 8-5: Curva granulométrica según el método de Wolman (Elaboración propia)	126
Figura 8-6. Corrección de deformación de fotografía para determinar el tamaño de partículas, por medio de un programa. Medición del tamaño de partícula en la estación Palmar por medio del método fotográfico, las letras indican el diámetro que se identificó y las unidades son cm. (Elaboración propia).....	128
Figura 8-7: Curva granulométrica según el método fotográfico (Elaboración Propia).	128

Lista de abreviatura

$\tilde{\gamma}_s$ = Peso sumergido

γ_s = Peso específico

ϕ_0 = Ángulo de reposo del grano,

ϕ_b = Carga de transporte de sedimentos

c_b = Concentración de sedimentos

c_D = Coeficiente de arrastre

c_L = Coeficiente de ascenso

q_b = Volumen de sedimentos que transporta por metro cuadrado

w_s = Velocidad de caída

δ_b = Espesor de la capa de sedimentos (m).

μ_{*c} = Velocidad crítica

ρ_s = Densidad

τ_{bc} = Esfuerzo cortante que inicia el movimiento

τ_c^* = Esfuerzo cortante de Shields

a = Dimensión más larga de una partícula de sedimento

b = Dimensión más intermedia de una partícula de sedimento

c = Dimensión más corta de una partícula de sedimento

D = Corresponde al diámetro de partícula determinado de la granulometría

F_g = Fuerza del peso sumergido de la partícula de sedimento

F_{gt} = Componente tangencial la fuerza del peso sumergido de la partícula de sedimento

F_r = Fuerza de fricción

H = profundidad del agua.

K_s = es la rugosidad efectiva

N_b = es el número de partículas por unidad de área (m^{-2})

ϕ = ángulo de reposo de sedimento

V_p = Volumen de la partícula

Ψ = factor de esfericidad

C = Coeficiente de Chezy

G = Gravedad específica relativa

SF = Factor de Corey

ν = Viscosidad cinemática del agua

α = Ángulo de la pendiente de fondo

μ = Velocidad del fl

Capítulo 1: Introducción

1.1. Introducción

Este trabajo de investigación se desarrolló en cinco ríos de la Cuenca del Río Grande de Térraba, en el sur de Costa Rica. El tema a investigar fue el movimiento del sedimento fluvial en los márgenes de los ríos, específicamente el fenómeno de la iniciación del movimiento del sedimento de fondo. La investigación se desarrolló en ríos con cargas mixtas, con granulometrías que van desde las gravas hasta bloques que son característicos de los ríos de Costa Rica.

El proceso de transporte de sedimentos en ríos ha sido estudiado ampliamente, existen muchas investigaciones, ensayos de campo y/o de laboratorio, las cuales han ayudado a entender el fenómeno en sí. El desarrollo de métodos adecuados para determinar el transporte de sedimento, es fundamental para el diseño de estructuras, embalses, obras de toma, represa, puentes, diques, restauraciones, desvíos, etc.

Recking (2008), en su artículo de titulado “Experimento de transporte de carga de fondo en pendientes pronunciadas” concluye “Las ecuaciones que fueron propuestas en este trabajo es un intento de modelar estas propiedades. Sin embargo, se deben usar con precaución, ya que se formularon a partir de un número limitado de observaciones. Se deben realizar análisis similares mediante la compilación de todos los conjuntos de datos de resistencia de flujo y carga de fondo disponibles para una amplia variedad de pendientes, números de Shields, y diámetros de grano.”

Kristin B y Steven R (2001), en su libro de muestreo de sedimento gravas y cantos indica “...el muestreo de material de fondo de grava y cantos rodados es una tarea complicada y obliga al usuario a tomar una serie de decisiones basadas en los métodos de estudio que dependen del objetivo del estudio y la condición de la corriente.”

García (2008), en su libro Ingeniería de Sedimentos menciona: “La erosión, el transporte y la deposición de sedimentos en los sistemas fluviales son procesos muy complejos, por lo que el desarrollo de métodos adecuados para la recolección de datos que contribuye a la comprensión de estos procesos es una ciencia todavía en evolución.”

Estos son ejemplos claros de las recomendaciones que concluyen los científicos cuando estudian el fenómeno de transporte de sedimentos en ríos, reforzando la importancia de esta investigación.

Además, este estudio nace como una iniciativa para colaborar con el departamento de Hidrología del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), ya que existe la necesidad de generar investigación en el transporte de sedimentos en los ríos de Costa Rica. Datos que son indispensables para las estimaciones de volúmenes muertos y desembalses de los proyectos y plantas hidroeléctricas del país; y el cálculo de las reservas dinámicas en los sitios de extracción de sedimento en ríos, los cuales son utilizados por el ICE como fuente de agregados de materiales para la construcción de los proyectos eléctricos.

Por las características climáticas del país el ICE se ha orientado al aprovechamiento de los ríos para la generación de electricidad, al 2015, el 67% de la capacidad instalada provienen de las plantas hidroeléctricas (ICE, 2017). En el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2016-2035, el ICE tiene dentro de sus estrategias de desarrollo en recursos renovables al proyecto hidroeléctrico El Diquís como eje central, cuyo ingreso al sistema se propone para el 2026. Este proyecto será desarrollado en la cuenca del río Grande de Térraba, y los cinco ríos seleccionados en esta investigación se ubican dentro del área de influencia del proyecto, reforzando la importancia de esta investigación.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Determinar los umbrales del movimiento incipiente del sedimento de fondo en el rango de gravas, cantos y bloques, en cinco ríos de la cuenca del Río Grande de Térraba.

Objetivos específicos

- Comprender los procesos de transporte y sedimentación que ocurren en cada río, por medio de una caracterización física de los agentes que controlan el transporte del sedimento (relieve, clima y régimen de flujo de la cuenca) y una caracterización del sedimento disponible.
- Observar el comportamiento del movimiento del material del fondo de cinco ríos de la cuenca del Río Grande de Térraba en el rango de gravas, cantos y bloques.
- Generar un modelo hidráulico numérico que represente las condiciones de flujo que ocurrieron en campo, para determinar las características hidráulicas que provocaron el movimiento incipiente de las partículas de sedimento y definir su umbral del movimiento con las condiciones hídricas observadas por medio de las relaciones que existen, para poder seleccionar la que mejor se ajuste a cada uno de los ríos analizados.

1.3. Metodología

Para elaborar la investigación se seleccionaron cinco tramos de ríos de la cuenca del río Grande de Térraba, los cuales se identificaron con base en el registro de las estaciones hidrológicas del ICE presentes en la cuenca. Se buscaron sitios donde existiera una barra de sedimentos y se tuviera un fácil acceso. La investigación se decidió realizar directamente en tramos de ríos donde se ubicará una estación hidrológica, para contar con el dato de caudal en el sitio y evitar cualquier proceso asociado a un traslado de caudales al sitio de interés, que le generarían una mayor incertidumbre a la investigación. Además, por los intereses del ICE, las estaciones hidrológicas están ubicadas en los afluentes principales de la cuenca, lo que genera una muestra que representará diferentes condiciones, ya que hay variaciones de relieve, producción hídrica, cobertura del suelo y geomorfología del río. Los cinco ríos seleccionados corresponden a: río General a la elevación 475 msnm y 135 msnm, estación hidrológica Remolino y Brujo, respectivamente; río Ceibo, elevación 269 msnm, estación hidrológica Río Ceibo, río Volcán a la elevación 320 msnm, Estación Río Volcán, y Río Grande de Térraba a la elevación 13 msnm, estación Palmar.

Como la producción de caudal sólido de un río, se desarrolla según los agentes de relieve y clima que contextualizan la cuenca, se consideró necesario realizar una descripción de estos controles para describir la forma en que operan y poder correlacionarlos con los resultados de iniciación del movimiento. Para esto fue necesario obtener los parámetros que describen la cuenca: el área de drenaje, curva hipsométrica y cobertura del suelo, entre otros. Se incluyó la cobertura del suelo ya que tiene una influencia directa en los fenómenos de infiltración, escorrentía y erosión del suelo, además es una característica que también interviene en el aporte de la carga de lavado y sedimento en suspensión y velocidad de respuesta del sistema fluvial.

Luego se realizó una caracterización de la distribución espacial y temporal de la lluvia para contextualizar el comportamiento la respuesta hídrica de la cuenca, y además justificar el por qué se muestrea únicamente el periodo húmedo.

Se realizó una caracterización hídrica de las cuencas, por medio de los registros de caudales de la estación, en la cual se describieron los parámetros estadísticos básicos del

registro. Se incluyó un análisis de frecuencia de máximos instantáneos del registro de la estación hidrológica, para poder contextualizar la frecuencia con que ocurren las crecientes que generaron el movimiento incipiente de las partículas.

Al ser un trabajo del movimiento incipiente del sedimento de fondo fue necesario realizar la caracterización del material que se encuentra presente en lecho del río que se está muestreando. Los parámetros que se obtuvieron fueron: la distribución de tamaños, densidad de la muestra y forma de la muestra.

Una vez contextualizada la parte física de la muestra, se procedió a la observación en campo de la iniciación del movimiento del material de fondo en los ríos, por medio de una demarcación y seguimiento en el tiempo. Primeramente, en cada una de las barras de sedimento seleccionadas se pintó un cuadro de 1 ó 2 m de lado, al inicio de la época lluviosa. Por medio de visitas al sitio, se compiló un registro fotográfico de los cambios ocurridos en el cuadro de sedimentos. La frecuencia de las visitas se realizó mensualmente. Este ejercicio se realizó durante la época lluviosa comprendida entre mayo a noviembre del 2014.

Una vez finalizada la época lluviosa, se compararon las fotos de cada una de las visitas y se identificaron las partículas que desaparecieron de la muestra inicial. Con ayuda de sistemas de información geográfica se escalaron las fotografías iniciales para determinar los diámetros de las partículas de la muestra. Y se identificó ónde ocurrió el movimiento incipiente para el registro de las crecientes que ocurrieron en el periodo entre visitas.

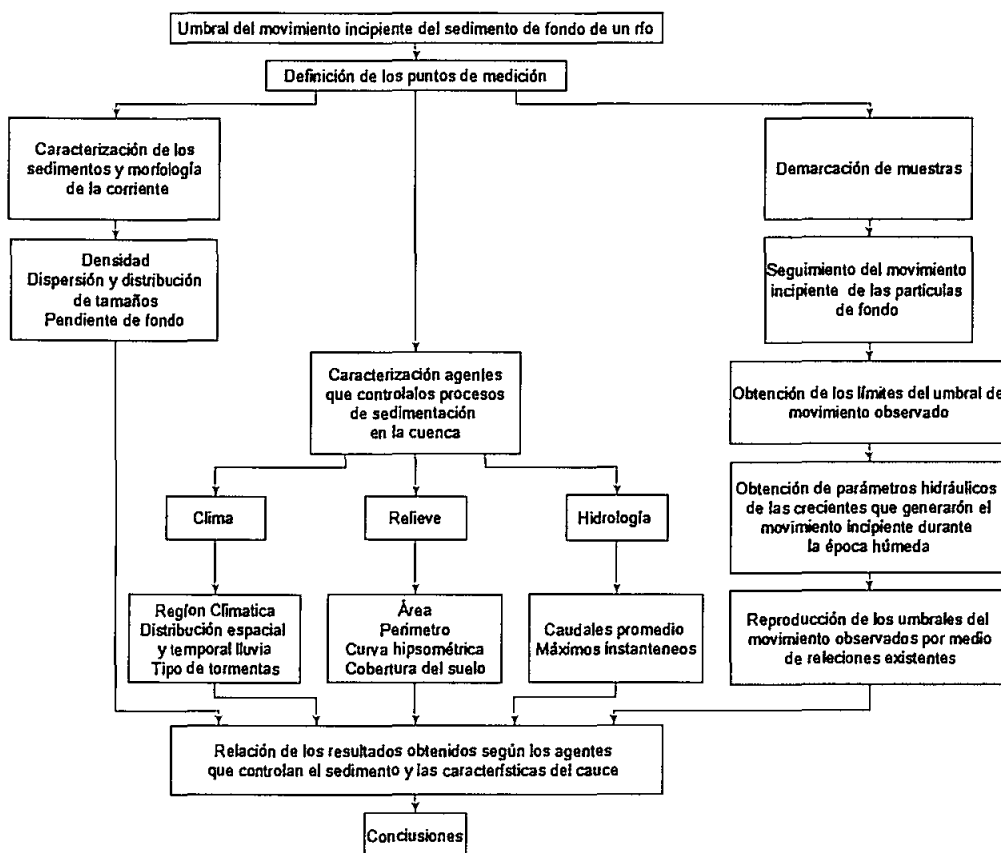
Una vez identificado el umbral del movimiento para cada periodo específico, se estimaron las condiciones hidráulicas que se experimentaron durante el periodo de análisis justo en el sitio de muestreo, utilizando un modelado hidráulico en dos dimensiones. El modelado hidráulico se realizó a partir de la topografía obtenida por medio de la tecnología LIDAR(Light Detection and Ranging), la cual fue levantada en el año 2009 (ICE, 2009). Una vez calibrados los modelos hidráulicos, se extrajo la información de caudales instantáneos que se registraron las estaciones hidrológicas durante el periodo de muestreo. Luego se identificaron las crecientes que ocurrieron entre visitas y se ingresaron como datos de entrada a los modelos hidráulicos para obtener la distribución de los parámetros hidráulicos.

Con la gama de esfuerzos cortantes obtenidos del modelo hidráulico y el umbral del movimiento identificado en campo, se utilizaron algunas de las relaciones que teóricas para *determinar la iniciación* del movimiento de partículas. Estas relaciones se aplicaron siempre y cuando fue posible realizarlo con los parámetros hidráulicos y características del sedimento obtenidas.

Finalmente se generan las conclusiones de los resultados obtenidos, integrando los agentes que controlan los procesos de sedimentación.

En Figura 1-1 se presenta el esquema metodológico que se aplicó para realizar este trabajo de investigación.

Figura 1-1. Esquema metodológico del trabajo de investigación (Elaboración propia)



Capítulo 2 : Marco Teórico

2.1. Proceso de sedimentos en una cuenca

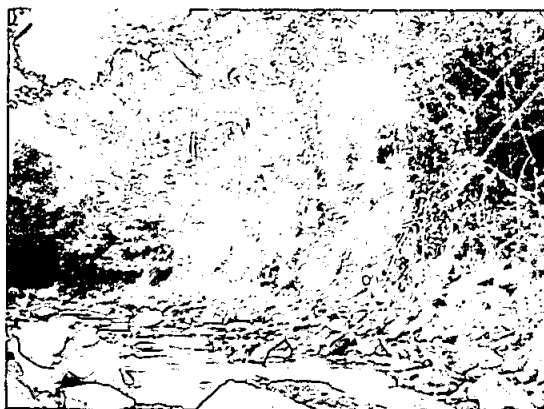
El sedimento fluvial se define como el que es transportado por el agua, su dinámica comienza en la superficie terrestre por la acción de las gotas de lluvia que son transportados hasta los cauces de los ríos, ahí inicia su movimiento; de aquí la importancia de la relación de la cobertura del suelo de una cuenca y su producción de sedimentos. (García, 2008)

Otra fuente de sedimentos fluviales son las que se ubican en las márgenes y lecho del cauce los cuales pueden estar conformadas por rocas, suelos o conglomerados que por acción de abrasión del agua se desprenden partículas y se integran a la dinámica de los sedimentos fluviales.

Los deslizamientos que se desarrollan en la margen de un río, los flujos de lodos provocados por inestabilidad de las laderas en combinación con eventos de precipitación, o caudales extremos que conllevan altas velocidades de flujo con alta capacidad erosiva y de arrastre, son proveedores naturales de altas concentraciones de sedimentos.

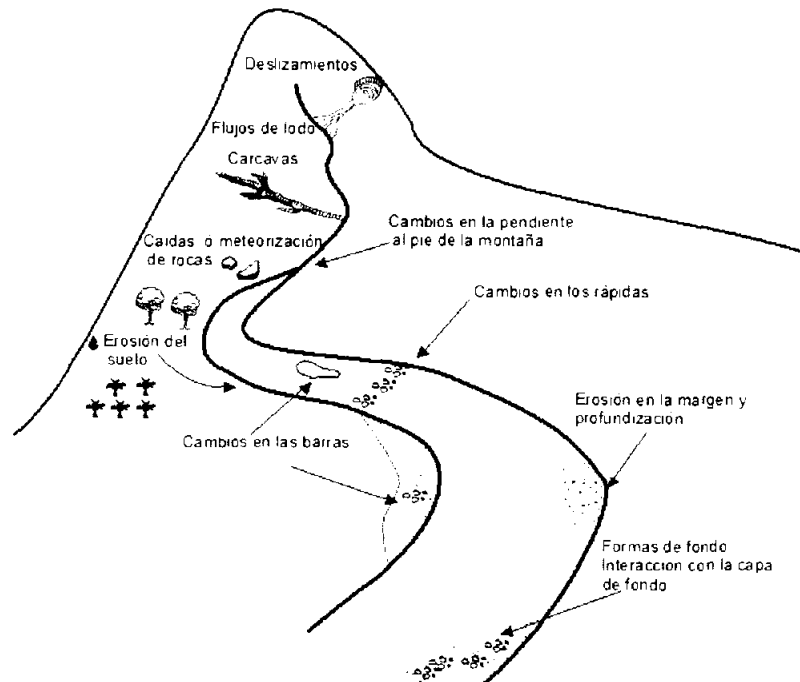
En la Figura 2-1 se muestra el caso de un afloramiento de roca en la margen derecha del río Maíz (Buenos Aires, Puntarenas), el cual por su geometría es un proveedor natural de sedimento grueso, los cuales serán arrastrados por la corriente y serán sometidos a procesos de abrasión.

Figura 2-1: Afloramiento de roca margen derecha del río Maíz, el cual es un proveedor natural de material de sedimento grueso.(Elaboración propia)



Los procesos de sedimentación, en conjunto con el relieve y la capacidad hídrica de una cuenca son los encargados de generar la morfología de los cauces. Esto se puede esquematizar según la Figura 2-2, en la cual se muestra la dinámica de los procesos de sedimentación y cambios en la morfología de una cuenca.

Figura 2-2. Ilustración esquemática de las fuentes de sedimentos en ríos y su geomorfología. (Adaptado de García, 2008 y Charlton, 2008)

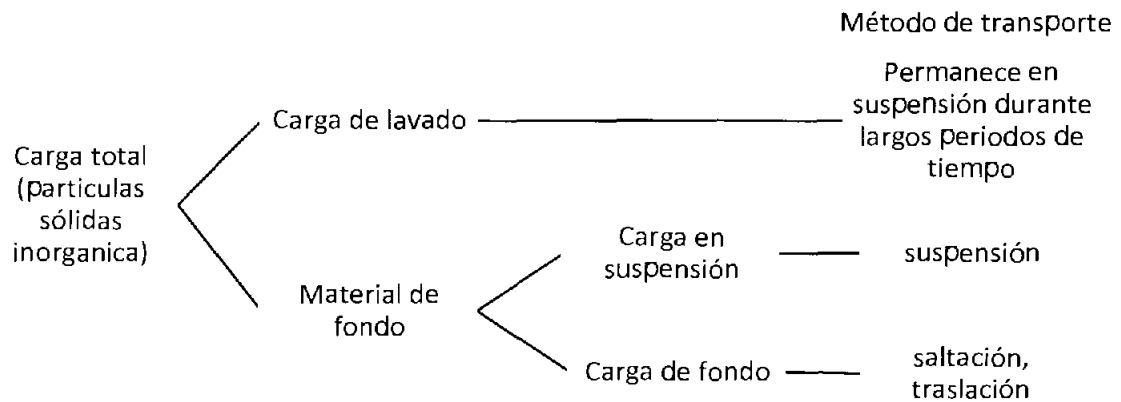


2.2. Tipos de carga de sedimento

La carga total que lleva un río se puede definir como la cantidad de masa que transporta por unidad de tiempo. Las unidades usuales son miligramos por litro (mg/L) o en toneladas por unidad de tiempo, por ejemplo T/día – T/año. La carga total se clasifica en inorgánica e orgánica, la carga de sedimentos se deriva de la carga inorgánica, lo cual se clasifica en carga disuelta y carga de partículas. La carga de partículas se divide en carga de lavado y carga de fondo. La carga de lavado es la porción de partículas que no está presente en el lecho del canal, se refiere al material más fino (arcilla o limo más finos) que se favorece a la corriente por escorrentía superficial y permanece en suspensión durante largos periodos de tiempo, incluso en caudales muy bajos. Un ejemplo claro de esta carga es la pluma de sedimentos en la desembocadura de un río. (García, 2008)

El material de fondo se refiere a la porción de partículas que se encuentra en el lecho y márgenes del cauce, el cual se clasifica en carga en suspensión y carga de fondo, y dependiendo las condiciones de flujo y diámetro de partículas pueden ser trasladadas por suspensión, saltación o traslación. La carga en suspensión generalmente corresponde a las arenas y limos gruesos. Las gravas, cantos y partículas de mayor diámetro son las que se clasifican como carga de fondo, y su movimiento se da por saltación o traslación. Las partículas de arena y grava fina a veces pueden viajar como carga de fondo y/o como carga suspendida, ya que afecta la turbulencia del flujo (Digman, 2009). En la Figura 2-3. se expone la clasificación anteriormente descrita.

Figura 2-3: Clasificación de las partículas sólidas inorgánicas transportadas por un cauce. (Adaptado Van Rijn, 1993)



García (2008), presenta otra clasificación, la cual se muestra en el Tabla 2-1. En vez de tener dos categorías, carga de lavado y material de fondo, indica que son tres las dos anteriores y la carga de suspensión en combinación con la carga de fondo, y luego clasifica el movimiento de las partículas según el sistema de transporte y el tamaño de partícula.

Tabla 2-1.: Clasificación de la carga de sedimentos (García, 2008)

Carga total de sedimentos	Clasificación del sistema	
	Según mecanismo de transporte	Según el tamaño de partícula
Carga de lavado	Suspensión	Carga de lavado
Carga suspendida Carga de fondo	Suspensión	Carga de fondo
Carga de fondo	Fondo	Carga de fondo

2.3. Características de los sedimentos

A continuación, se definen las principales características físicas de los sedimentos, los cuales son necesarios para analizar la dinámica del transporte:

a) Densidad (García, 2008)

La densidad de la partícula de sedimentos se define como la masa por unidad de volumen, y su índice es ρ_s .

b) Pesos Específico (García, 2008)

El peso específico γ_s , se obtienen de multiplicar la densidad por la aceleración de la gravedad

c) Gravedad específica relativa (García, 2008)

La gravedad específica, G , es una relación entre los pesos específicos del sólido de la partícula y el fluido (γ) y tiene unidades adimensionales, esta se puede calcular a partir de la densidad o peso específico.

d) Peso Sumergido (García, 2008)

El peso sumergido $\tilde{\gamma}_s$ se deriva de los principios de Arquímedes, el cual se calcula como el peso del sólido menos el peso del fluido, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\tilde{\gamma}_s = \gamma_s - \gamma = (G - 1)\gamma \quad (1)$$

e) Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es una de las características más importantes de los sedimentos, según su dimensión esta se puede clasificar en arcillas, limos, arenas, gravas, cantos y bloques. Los bloques son las partículas de mayor tamaño, su diámetro puede ser superior a los 256 mm, los cantos corresponden a partículas entre los 256 mm y 64 mm, la grava se puede definir entre los 64mm y 2 mm. Inferior a este límite y hasta los 0,062 mm se ubican las arenas, luego los limos que se definen hasta los 0,04 mm, finalmente las partículas de menor tamaño corresponden a las arcillas. (Julien, 2002)

En la Tabla 2-2 se muestra la clasificación anteriormente descrita y a su vez se dividen en una categoría más a detalle. En Costa Rica es muy común que casi a todo lo largo del río, se encuentren mezclas de sedimentos que contengan todas las categorías de la Tabla 2-2. Esto se debe a que el sistema montañoso que se ubica en el país se encuentra cercano a la costa, lo que favorece que las fuentes de sedimentos de partículas más gruesas sean arrastradas hasta las zonas más planas.

a) Porosidad (García, 2008)

La porosidad, es una característica del sedimento depositado, la cual se define como el volumen de vacíos entre el volumen total que ocupa una determinada muestra. Los materiales más gruesos presentan porosidades más altas, que los materiales más finos.

b) Forma de las partículas

Las formas de las partículas se pueden clasificar según la geometría. Según el Diagrama de Zingg (Vanoni, 2006), esto se puede realizar según las 3 dimensiones de las partículas, la más larga, la intermedia y la corta, definidos como a, b y c, respectivamente. Si todos tienen similar longitud la partícula se clasifica como esférica, y dependiendo de las longitudes de a, b y c se puede catalogar como de disco, barra o cuchilla (ver Figura 2-4).

Las formas de las partículas también se pueden expresar por el factor de forma de Corey (Vanoni, 2006),, el cual se define como:

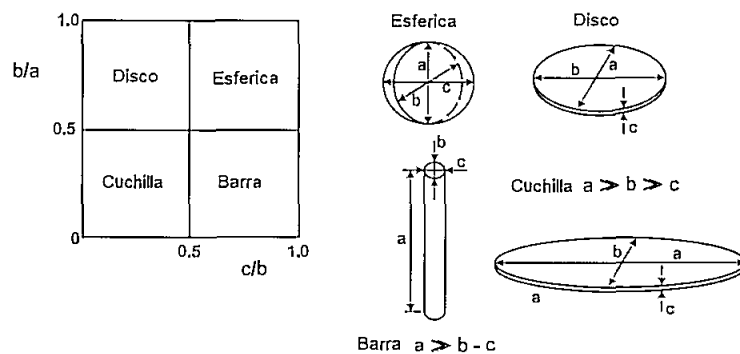
$$SF = \frac{c}{(ab)^{0.5}} \quad (2)$$

Una partícula esférica tiene un valor $SF = 1$, una arena suele tener un valor de 0.7.

Tabla 2-2: Caracterización del sedimento según su diámetro de partícula, (Julien, 2002)

Categoría	Clasificación	Diámetro (mm)
Bloques	Muy Largos	4096-2048-
	Largos	2048-1024
	Medianos	1024-512
	Pequeños	512-256
Cantos	Largos	256-128
	Pequeños	128-64
Grava	Muy gruesa	64-32
	Gruesa	32-16
	Mediana	16-8
	Fina	8-4
	Muy fina	4-2
Arena	Muy gruesa	2-1
	Gruesa	1-0.5
	Mediana	0.5-0.25
	Fina	0.25-0.125
	Muy fina	0.125-0.062
Limo	Gruesa	0.062-0.031
	Mediana	0.031-0.016
	Fina	0.016-0.008
	Muy fina	0.008-0.004
Arcilla	Gruesa	0.004-0.002
	Mediana	0.002-0.001
	Fina	0.001-0.0005
	Muy fina	0.0005-0.00024

Figura 2-4. Clasificación de la forma de las partículas según el diagrama de Zinc (Adaptado de García, 2008)



c) Curva granulométrica (Kristin B y Steven R , 2001)

La curva granulométrica, aunque no es una característica física del sedimento se suele utilizar para clasificar la composición de la mezcla de sedimento, ya que esta describe los rangos de diámetros de partículas que contienen cualquier muestra de sedimentos. Esta se desarrolla a partir de la clasificación de la cantidad de partículas que contiene la muestra entre un determinado rango de tamaños. Los resultados de la clasificación se representan en una gráfica semilogarítmica, en la cual el eje vertical es el porcentaje de la fracción de la muestra y el eje horizontal el diámetro de partícula, el cual se grafica en escala logarítmica. Este gráfico permite clasificar la muestra según su contenido de arcillas, limos, arenas, gravas, cantos y bloques, además es un buen indicador para comparar muestras de diferentes proveniencias.

La curva granulométrica también se utiliza para determinar los parámetros como el D_{50} , D_{10} y D_{90} , los cuales corresponden a el diámetro que interseca la curva en el 50% (diámetro medio) , 10% y 90% de la fracción de la muestra; y son valores constantemente utilizados en fórmulas que estiman la producción de sedimentos.

El apartado 2.7, se detalle cómo se puede obtener la curva granulométrica para los sedimentos de fondo.

d) Velocidad de caída (García, 2008)

La velocidad de caída de un grano es una característica que es determinada por el diámetro, la densidad de la partícula y la viscosidad del agua. Una partícula a través de un fluido está sujeta a fuerzas de presión y las fuerzas viscosas que se oponen al movimiento. Cuando las fuerzas opuestas se equilibran con las del fluido, la fuerza de la gravedad es la única que permanece y la partícula comienza su descenso a una velocidad constante.

La definición de la velocidad de caída depende si el flujo es laminar o turbulento, la cual está definida por el número de Reynolds y puede definir por la siguiente ecuación la cual se conoce como la Ley de Stokes:

$$w_s = \frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot D^2}{18 \cdot \mu} \quad (3)$$

En donde w_s se define como la velocidad de caída, y μ la viscosidad dinámica del fluido. Para Reynolds entre $10^3 < Re < 2 \times 10^5$, la velocidad de caída se expresa como:

$$w_s = \left(\frac{8(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot D^2}{3 \cdot \rho} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Ferguson y Church (2004) utilizaron las dos ecuaciones anteriores y derivaron una ecuación para rangos con $Re < 2 \times 10^5$:

$$w_s = \frac{R_s g D^2}{C_{D1} \nu + (0.75 \cdot C_{D2} \cdot R_s \cdot g \cdot D^3)^{1/2}} \quad (5)$$

Donde $R_s = (\rho_s - \rho) / \rho$, ν es la viscosidad cinemática, y C_{D1} y C_{D2} son coeficientes. Para esferas $C_{D1} = 18$ y $C_{D2} = 0.4$. Ferguson y Church (2004), recomiendan $C_{D1} = 18$ y $C_{D2} = 1.1$ cuando el diámetro de la partícula es determinado por granulometrías, y $C_{D1} = 20$ y $C_{D2} = 1.1$, por un diámetro nominal. (Digman, 2009)

Van Rijn (1993) indica que los experimentos muestran que para diferentes partículas con factores de forma entre 1 y 0.5, existe un 30% de diferencia en la velocidad de caída con las ecuaciones anteriores. A razón de esto se ha propuesto las siguientes fórmulas para partículas no esféricas:

$$w_s = \frac{(\gamma_s - \gamma) d^2}{18 \cdot \mu} \quad 1 < D \leq 100 \mu m \quad (6)$$

$$w_s = \frac{10\nu}{D} \left[\left(1 + \frac{0.01(\gamma_s - \gamma) \cdot d^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad 100 < D \leq 1000 \mu m \quad (7)$$

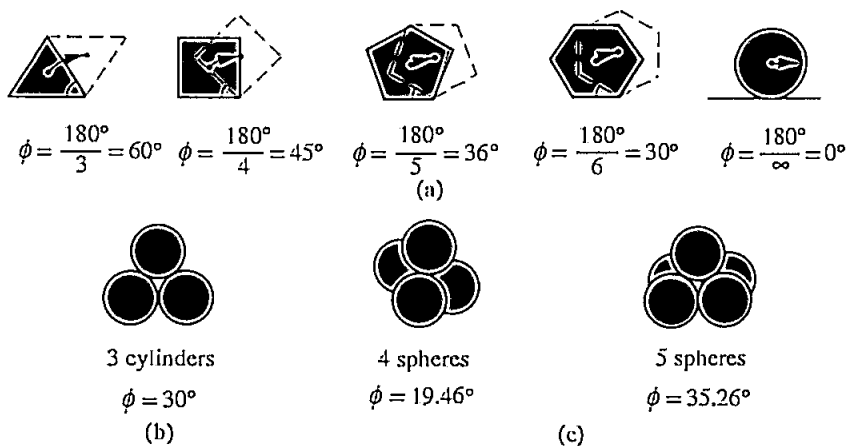
$$w_s = 1.1 [(\gamma_s - \gamma) d]^0.5 \quad 100 < D \leq 1000 \mu m \quad (8)$$

Donde D corresponde al diámetro de partícula determinado de la granulometría.

e) Ángulo de reposo (García, 2008)

El ángulo de reposo varía con el tamaño de la partícula y la angulosidad del material. En la Figura 2-5 se muestran los valores típicos del ángulo de reposo ϕ para material granular.

Figura 2-5. Ángulo de reposo de diferentes formas de partículas (Julien, 2002)



2.4. Umbrales de erosión y movimiento incipiente

Para definir el movimiento incipiente de una partícula se parte de un análisis de fuerzas, tal como se muestra en la Figura 2-6. La primera fuerza que se puede definir es la fuerza del peso sumergido de la partícula de sedimento, F_g , la cual se precisa como la fuerza de gravedad menos la fuerza de flotación, y tiene una componente tangencial (F_{gt}) y una componente normal (F_{gn}). La segunda es la fuerza tangencial F_r , la cual se define como la fuerza de fricción. Del diagrama de fuerzas y la sumatoria de ellas se puede obtener las siguientes relaciones (García, 2008):

$$F_{gt} = (\rho_s - \rho) g V_p \sin\phi \quad (9)$$

$$F_{gn} = (\rho_s - \rho) g V_p \cos\phi \quad (10)$$

$$F_r = \mu F_{gn} \quad (11)$$

La condición para movimiento incipiente está dada cuando:

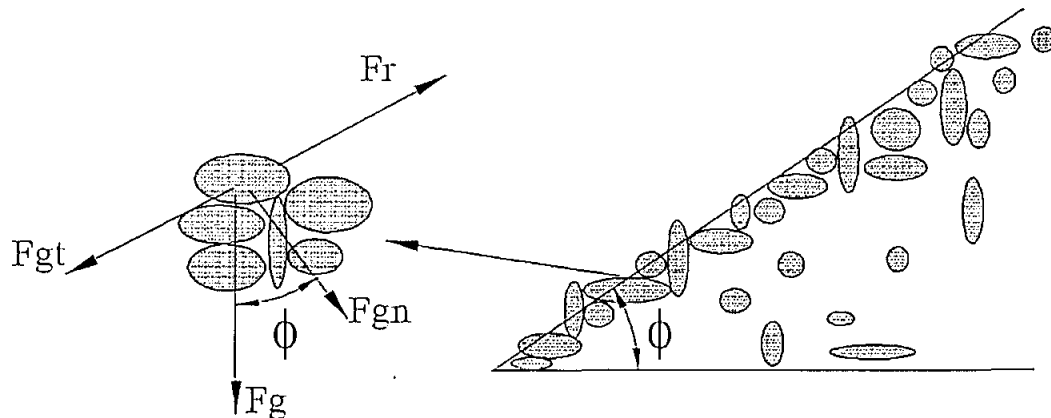
$$F_{gt} = F_r \quad (12)$$

De las relaciones anteriores se puede definir

$$\mu = \tan \phi \quad (13)$$

El ángulo de reposo tiene un valor empírico, en diferentes estudios se ha encontrado que para una arena $\phi = 30^\circ$, para una grava $\phi = 40^\circ$ y va aumentando conforme crece el tamaño de partícula.

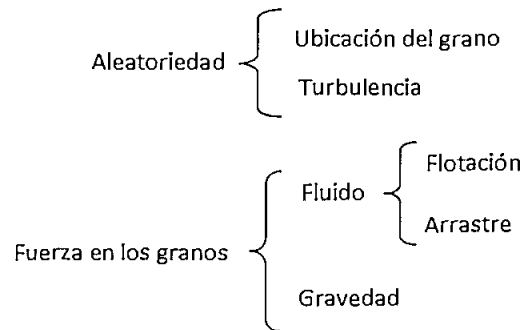
Figura 2-6: Fuerzas que actúan sobre una partícula y el ángulo de reposo. (García, 2008)



2.4.1. Factores que afectan el movimiento.

El análisis de fuerzas presentado anteriormente es la aproximación más simple a la iniciación del movimiento. Sin embargo, la realidad es que las partículas están expuestas a otros factores como la ubicación del grano y turbulencia del flujo, que le agregan una complejidad al fenómeno, y no se tiene claridad cómo definir el umbral del movimiento. Estos factores se pueden resumir en el siguiente esquema (García, 2008).

Figura 2-7: Esquema de factores que influyen en el transporte de sedimentos (García, 2008)



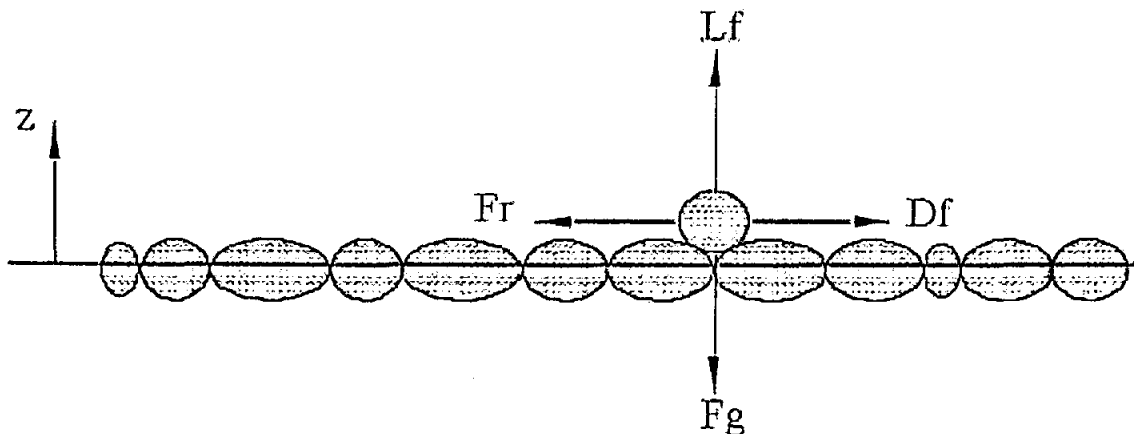
A razón de esto han surgido varias relaciones, que a partir de investigaciones y aproximaciones se trata de definir los umbrales de la iniciación del movimiento.

2.5. Relaciones de iniciación del movimiento

a) Ikeda-Coleman-Iwagaki (1982)

Ikeda, basado en el trabajo de Iwagaki y Coleman , (García , 2008) realizó un análisis simple del movimiento de la partícula, tal como se muestra en la Figura 2-8. En donde L_f se define como la fuerza de flotación, F_r la fuerza de fricción, F_g la fuerza de gravedad y D_f la fuerza de arrastre, y el umbral de movimiento de la partícula ocurre cuando $F_r < D_f$.

Figura 2-8. Fuerzas actuando en una partícula (García, 2008)



De este análisis se derivó la relación Ikeda-Coleman-Iwagaki para determinar el esfuerzo cortante:

$$\tau_c^* = \frac{4}{3} \frac{(\mu \cos \alpha - \text{sen } \alpha)}{(c_D + \mu c_L)} \frac{1}{F^2 (\mu_* c D / \nu)} \quad (14)$$

Donde μ = velocidad del fluido, $\mu_* c$ = velocidad crítica, α = el ángulo de la pendiente del canal, c_D = coeficiente de arrastre, c_L = coeficiente de ascenso, ν = viscosidad cinemática, D = diámetro de la partícula, τ_c^* = Esfuerzo cortante de Shields y :

$$F = \frac{1}{2} \frac{\mu_* D}{\nu} \quad \text{para } \frac{\mu_* D}{\nu} < 13.5 \quad \text{y } F = 6.77 \quad \text{para } \frac{\mu_* D}{\nu} > 13.5 \quad (15)$$

El esfuerzo cortante de Shields está definido como

$$\tau_c^* = \frac{\tau_{bc}}{\rho g ((\rho_s - \rho) / \rho)} \quad (16)$$

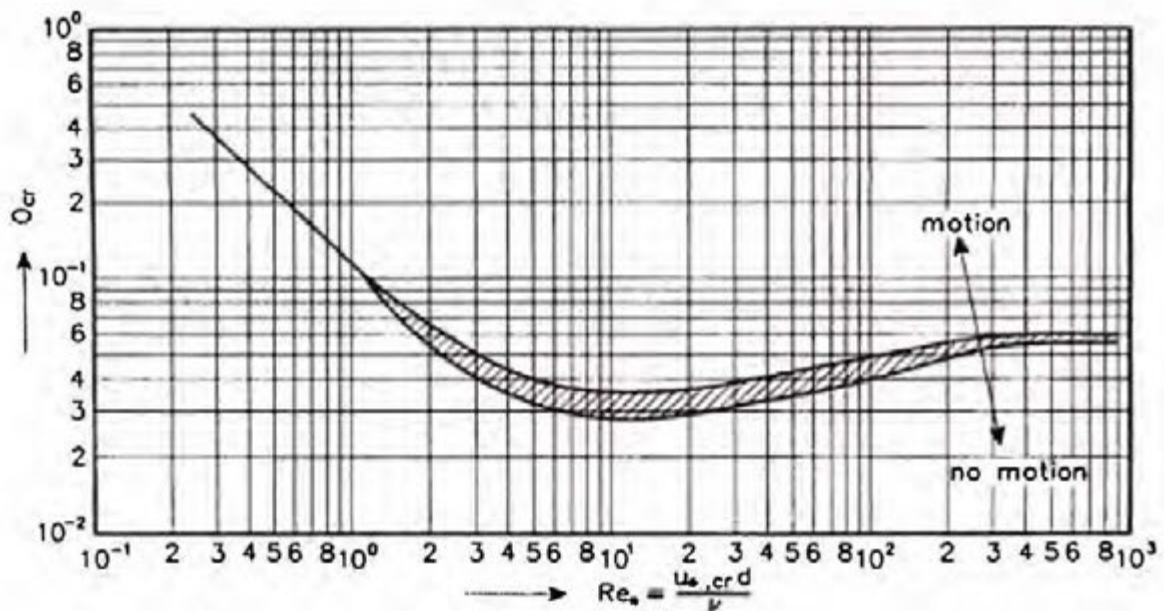
Donde el τ_{bc} es el esfuerzo cortante que inicia el movimiento.

Aunque hay una serie de suposiciones hechas en su derivación, el modelo Ikeda-Coleman-Iwagaki (Ec. 15) hace que sea posible visualizar las fuentes de incertidumbre (es decir, el ángulo de reposo, de arrastre y coeficientes de ascenso, la ubicación de las partículas, etc.) y ayuda a entender por qué es tan difícil de caracterizar la condición de umbral con un modelo determinista. (García, 2008)

b) Gráfico de Shields y su adaptación por Parker, 2005

Uno de los experimentos más reconocidos para determinar el τ_c^* en función del número de Reynolds fue realizado por Shields (1936), el cual estableció el movimiento de las partículas en una superficie plana para materiales no cohesivos (Figura 2-9).

Figura 2-9: Iniciación del movimiento de una partícula en una superficie plana, (Shields, 1936) ($\theta_{cr} = \tau_c^*$)



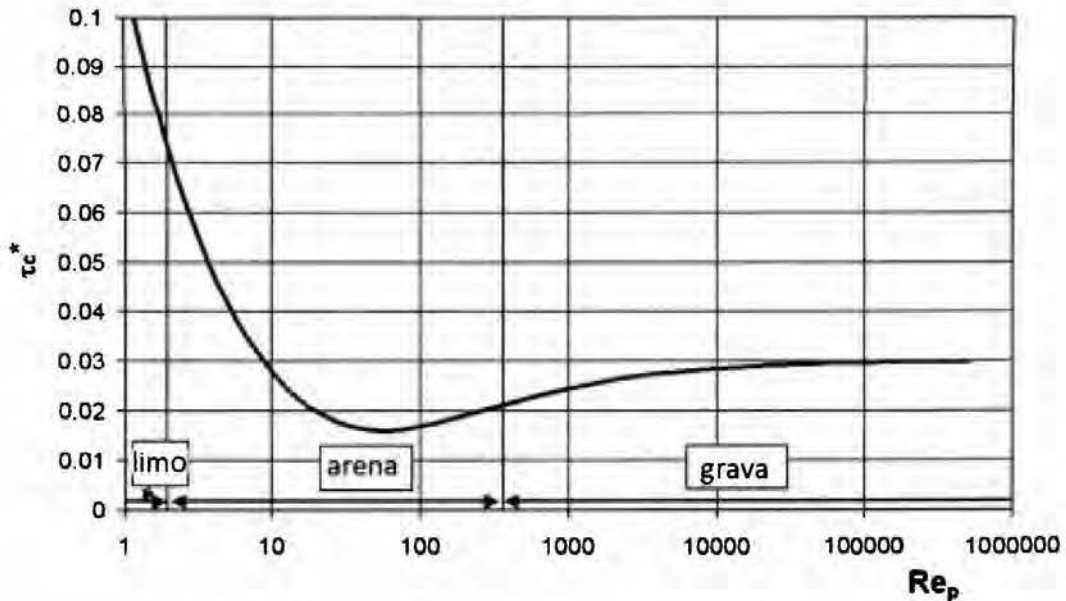
El análisis que realizó Shields (1936) es adimensional, para una combinación de esfuerzo crítico τ_{bc} , peso específico del agua y sedimento, y diámetro de partícula D ; los cuales pueden ser expresadas en cualquier grupo de unidades congruentes.

García, 2008, indica que se ha encontrado que los valores obtenidos del diagrama de Shields para iniciación del movimiento son mayores que los observados por otros investigadores. Incluso menciona que a partir de las observaciones por Neill y Yalin (1969) y Gessler (1970) se recomienda dividir los valores obtenidos por Shields entre 2 para propósitos de ingeniería, sobre todo en el caso que el diseño en cuestión implique que los granos una vez que entran en movimiento nunca son reemplazados. Si la situación es tal que los granos que se mueven pueden ser sustituidos por otros que vienen de aguas arriba, los valores de la curva de Shields pueden ser utilizados.

Al ser el gráfico de Shields el pionero en la iniciación del movimiento de las partículas de sedimento, han surgido muchos estudios sobre este como Vanovi (1964), Smith (1977), Brownlie (1963), Van Rijn (1984), y Soulsby y Whitehouse (García, 2008), entre muchos otros. Como por ejemplo se puede mencionar el de Parker (2005), el utiliza la relación de

τ_c^* de Brownlie (1981), y la divide entre dos, para utilizarla para efectos de diseño, ecuación 17 (Figura 2-10)

Figura 2-10: Diagrama modificado de Shields (Parker, 2005)



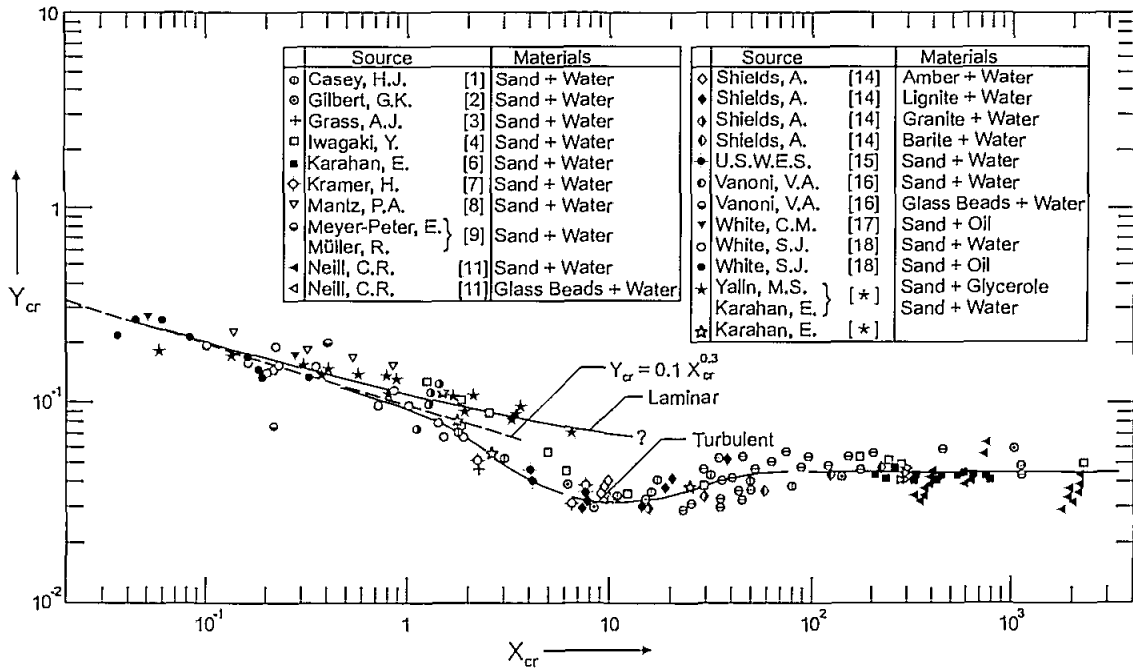
$$\tau_c^* = \frac{1}{2} [0.22 Re_p^{-0.6} + 0.06 \exp(-17.77 Re_p^{-0.6})] \quad (17)$$

La Figura 2-10., muestra una división de limos, arenas y gravas, sin embargo, se estima que para partículas de limos el gráfico de Shields no provee resultados reales. (García, 2008)

c) Yalin y Karahan (1979)

Yalin y Karahan (1979) elaboraron un diagrama para la iniciación del movimiento, basado en datos de otras investigaciones y su propio experimento con partículas entre los 0.10 mm y 2.86 mm, para flujo laminar y turbulento. Este diagrama se muestra en la Figura 2-11, $Y_{cr} = \tau_c^*$ y $X_{cr} = Re_*$, el cual hace una clasificación si el flujo es laminar o turbulento.

Figura 2-11. Diagrama para la iniciación del movimiento, Yalin y Karahan, 1979 (García, 2008)



García y Maza (1997) propusieron las siguientes ecuaciones para aproximar el gráfico de Yalin y Karahan (García, 2008):

$$D_{*c} = \left(\frac{Re_{*c}^2}{\tau_c^*}\right)^{1/3} = D \left(\frac{(\gamma_s - \gamma)g}{\gamma v^2}\right) \tag{18}$$

Para flujo turbulento

$$\tau_c^* = 0.137 D_{*c}^{-0.377} \quad ; \quad 0.1074 < D_{*c} < 2.084 \tag{19}$$

$$\tau_c^* = \frac{0.178}{D_{*c}^{0.7303}} + 0.0437 \exp - \left[\frac{31.954}{D_{*c} + 10}\right]^{2.453} \quad ; \quad 2.084 < D_{*c} < 47.75 \tag{20}$$

7 4 4 0 6 6

Para flujo laminar

$$\tau_c^* = \frac{0.1439}{D_{*c}^{0.352}} + 0.0084 \exp - \left[\frac{5.6243}{D_{*c}}\right]^{9.21} \quad ; \quad 0.2164 < D_{*c} < 11.252 \tag{21}$$

TFG
42907

d) Wiberg y Smith (1987)

Wiberg y Smith (1987) desarrollaron un diagrama de iniciación del movimiento para sedimentos no cohesivos, para un determinado tamaño de grano y densidad, utilizando el método de balance de fuerzas para partículas individuales. Las ecuaciones que se

derivaron dependen de la fuerza cortante, fuerza de flotación y el ángulo de reposo. También encontraron que para mezclas de sedimentos la iniciación del movimiento depende de la posición relativa con respecto al flujo y ángulo de reposo, esta relación se define según la ecuación 22 y la Figura 2-12., nótese la similitud con la ecuación de Ikeda-Coleman-Iwagaki (Ecuación 15):

$$\tau_c^* = \frac{4 (\tan \phi_0 \cos \alpha - \sin \alpha)}{3 (c_D + \tan \phi_0 c_L)} \frac{1}{F^2(z/z_0)} \quad (22)$$

Dónde:

α = ángulo de la pendiente de fondo

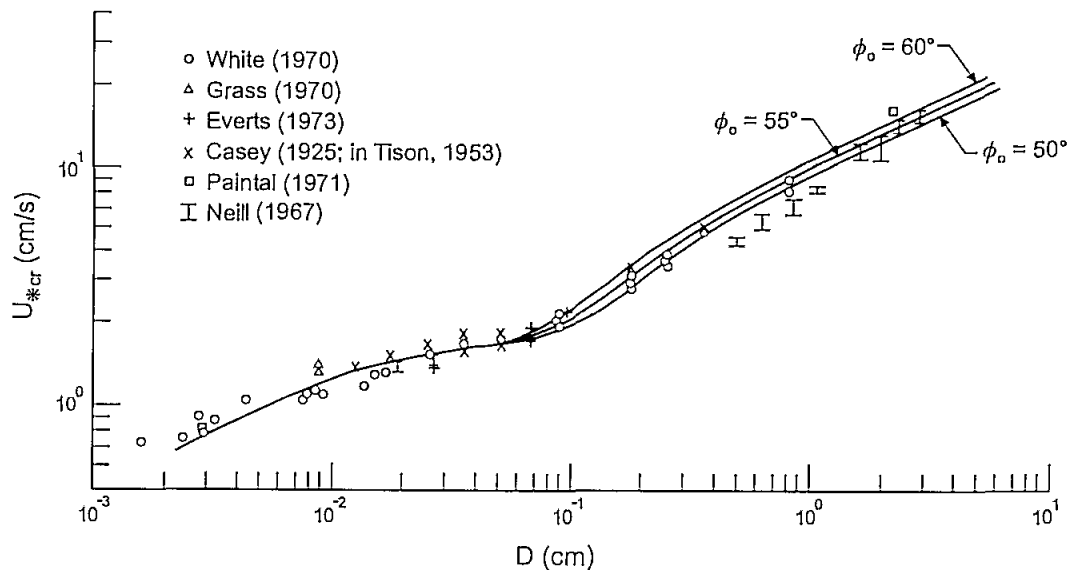
ϕ_0 = ángulo de reposo del grano,

c_D = coeficiente de arrastre

c_L = coeficiente de ascenso

$F = u(z)/u_*$, la función logarítmica que relaciona la fuerza efectiva de la velocidad del fluido actuando sobre la partícula al esfuerzo crítico .

Figura 2-12. Diagrama de Wiberg y Smith, 1987, para estimar el esfuerzo crítico calculado (ecuación 23) en función del grano de partícula (García, 2008).



e) Miller y Byrne (1966)

Miller y Byrne (1966), utilizaron sus observaciones para introducir el ángulo de reposo natural de las partículas de ϕ_0 , con sedimentos naturales y derivaron la siguiente ecuación:

$$\phi_0 = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{D}{k_s} + z_*}{\frac{D}{k_s} + 1} \right] \quad (23)$$

Donde $z_* = -0.02$, si en promedio ya va ocurrir el movimiento de las partículas en el fondo y depende la forma de la partícula (redondez). k_s , es la rugosidad equivalente de Nikuradse. Esta ecuación es correcta para valores de $D/k_s > 0.5$. Para D/k_s entre 0.5 y 5 existen las curvas mostradas en la Figura 2-13.

En el gráfico (Figura 2-13) la rugosidad de crítica del número de Reynolds $(R_*)_{cr} = (u_{*c})_c k_s / \nu$ y es característica del lecho.

f) Lischtvan and Lebediev (1959)

Lischtvan and Lebediev (1959) desarrollaron un diagrama de velocidad máxima permisible (la velocidad máxima antes que comience a ocasionarse erosión en las márgenes), basado en observaciones de canales que contenían sedimentos de cuarzo con tamaños entre los 0.005 mm hasta los 500 mm y alturas de flujo de los 0.40 m a los 10 m. El diagrama de Lischtvan-Lebediev se muestra en la figura 13, del cual García y Maza derivaron dos ecuaciones (1997). Donde U_c , es la velocidad máxima permisible, D , diámetro de la partícula, H , profundidad del agua.

Figura 2-13. Diagramas de Wiber y Smith para determinar el valor de D/k_s , en función del esfuerzo crítico y la rugosidad crítica de Reynolds. (García, 2008)

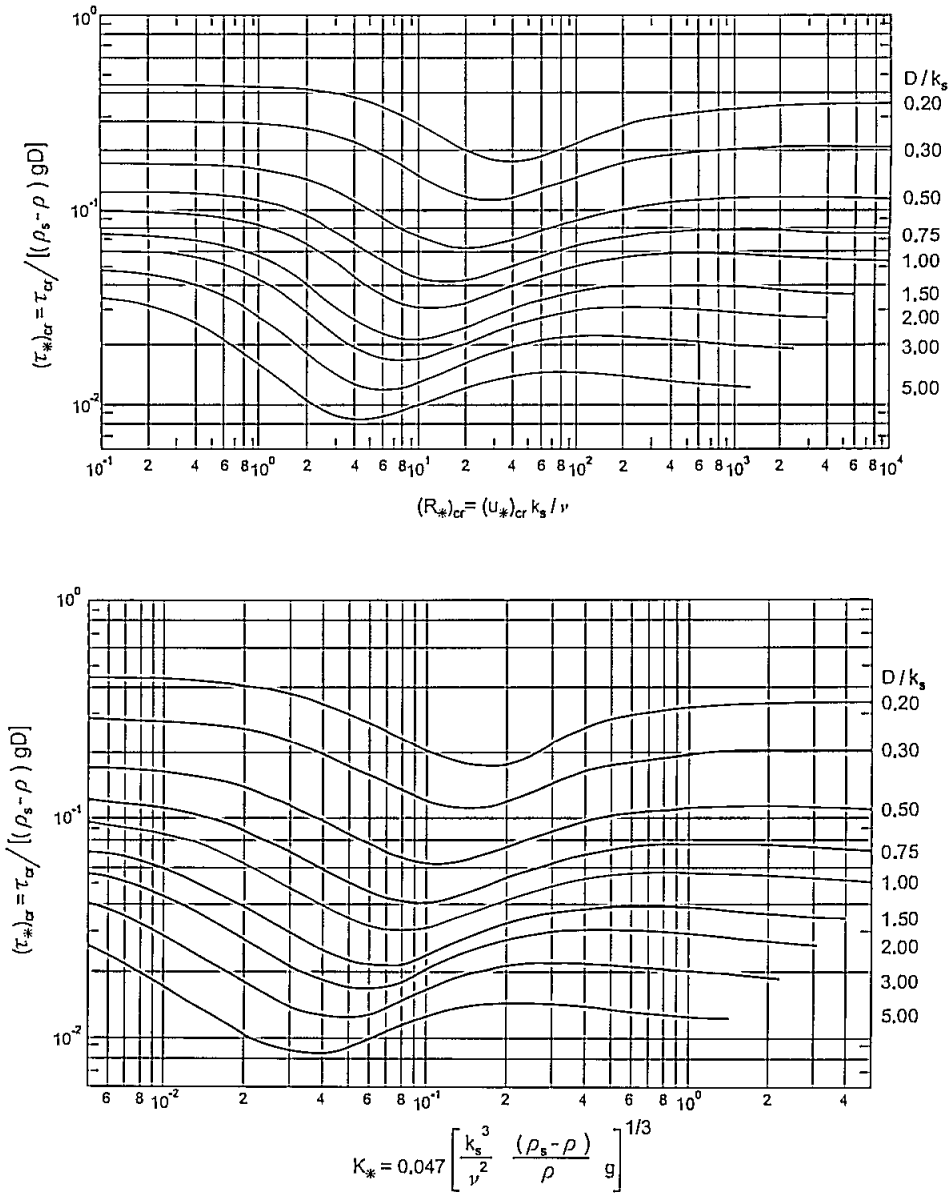
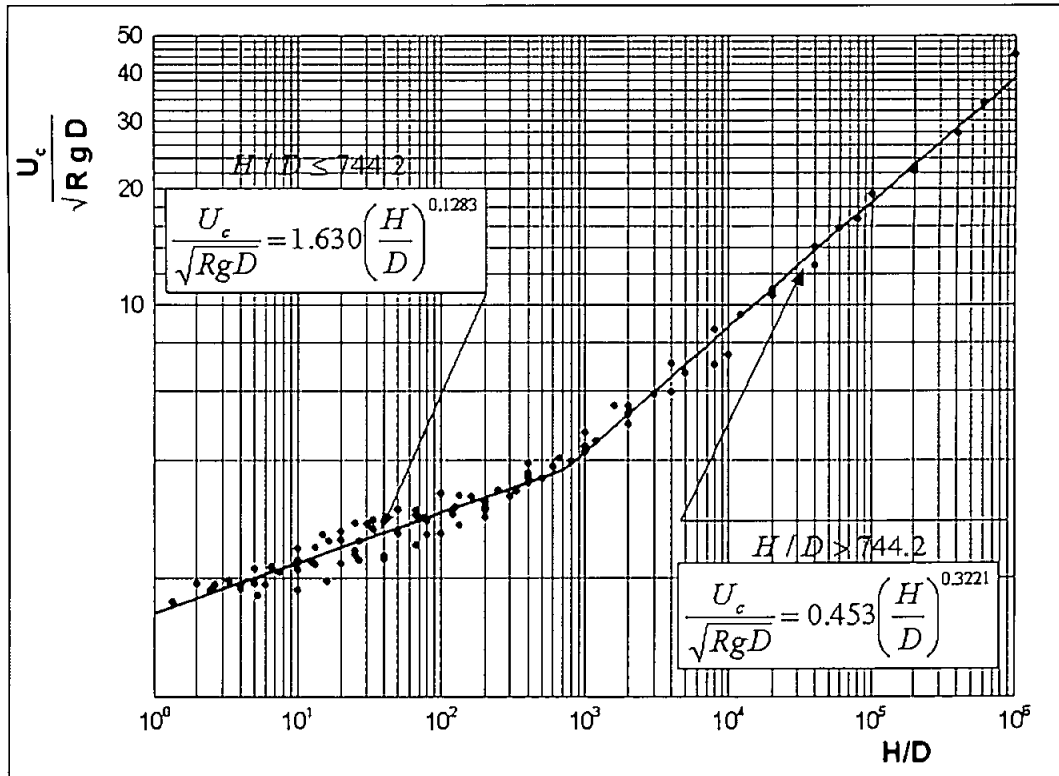


Figura 2-14: Diagrama de velocidad máxima permisible de Lischtván-Lebediev. (García, 2008)



g) Chiew y Parker (1994)

Chiew y Parker (1994), propusieron la siguiente expresión para considerar la pendiente del canal, basado en el análisis de fuerzas que actúan en la partícula debido al flujo, similar al análisis Wiberg y Smith (1987). Chiew y Parker realizaron una serie de prueba de laboratorio para comprobar la ecuación 25, y llegaron a obtener el gráfico que se muestra en la Figura 2-15, encontrando en general buenos resultados entre lo calculado y observado.

$$\frac{\tau_{c\alpha}^*}{\tau_{co}^*} = \cos\alpha \left(1 - \frac{\tan\alpha}{\tan\phi} \right) \quad (24)$$

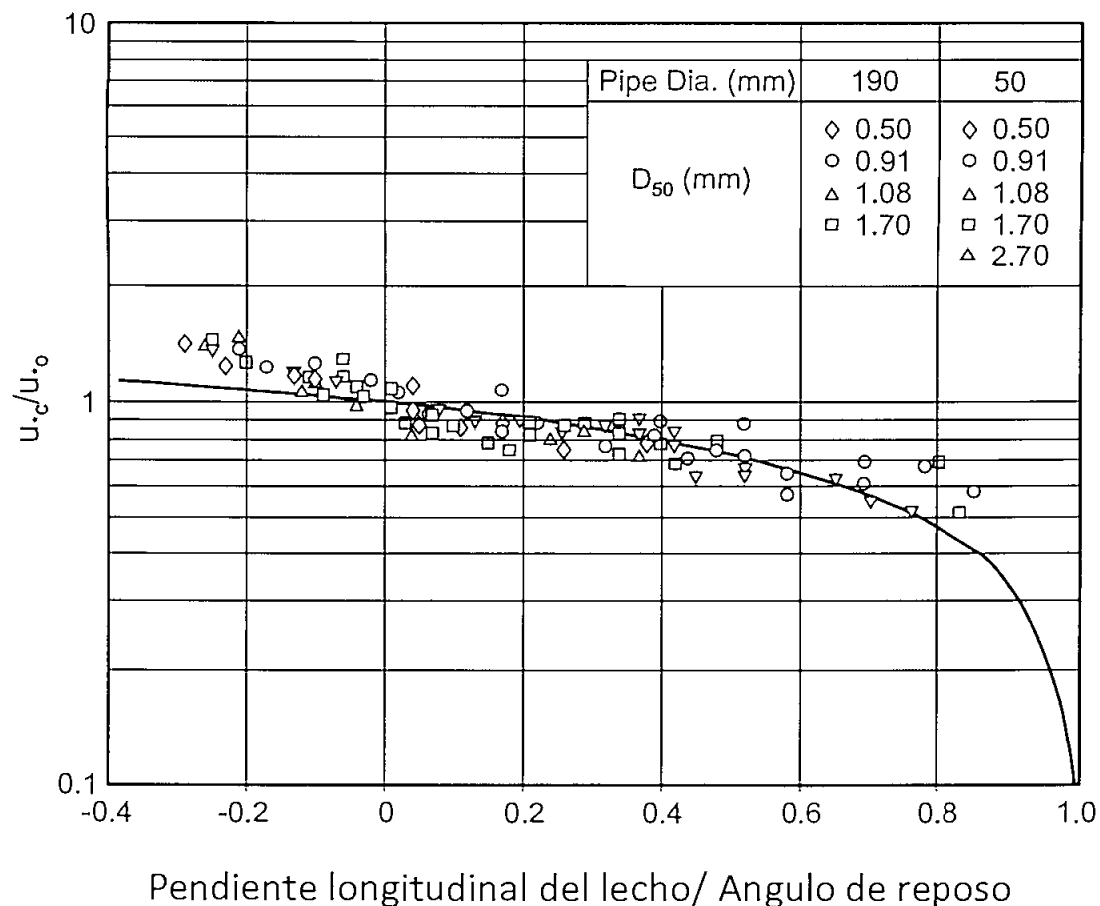
Donde:

ϕ = ángulo de reposo

$\tau_{c\alpha}^*$ = el esfuerzo crítico para sedimentos en el lecho con una pendiente longitudinal α

τ_{co}^* = esfuerzo crítico para el lecho con una pequeña pendiente. (se puede estimar del gráfico de Shields, ecuación 18, 19)

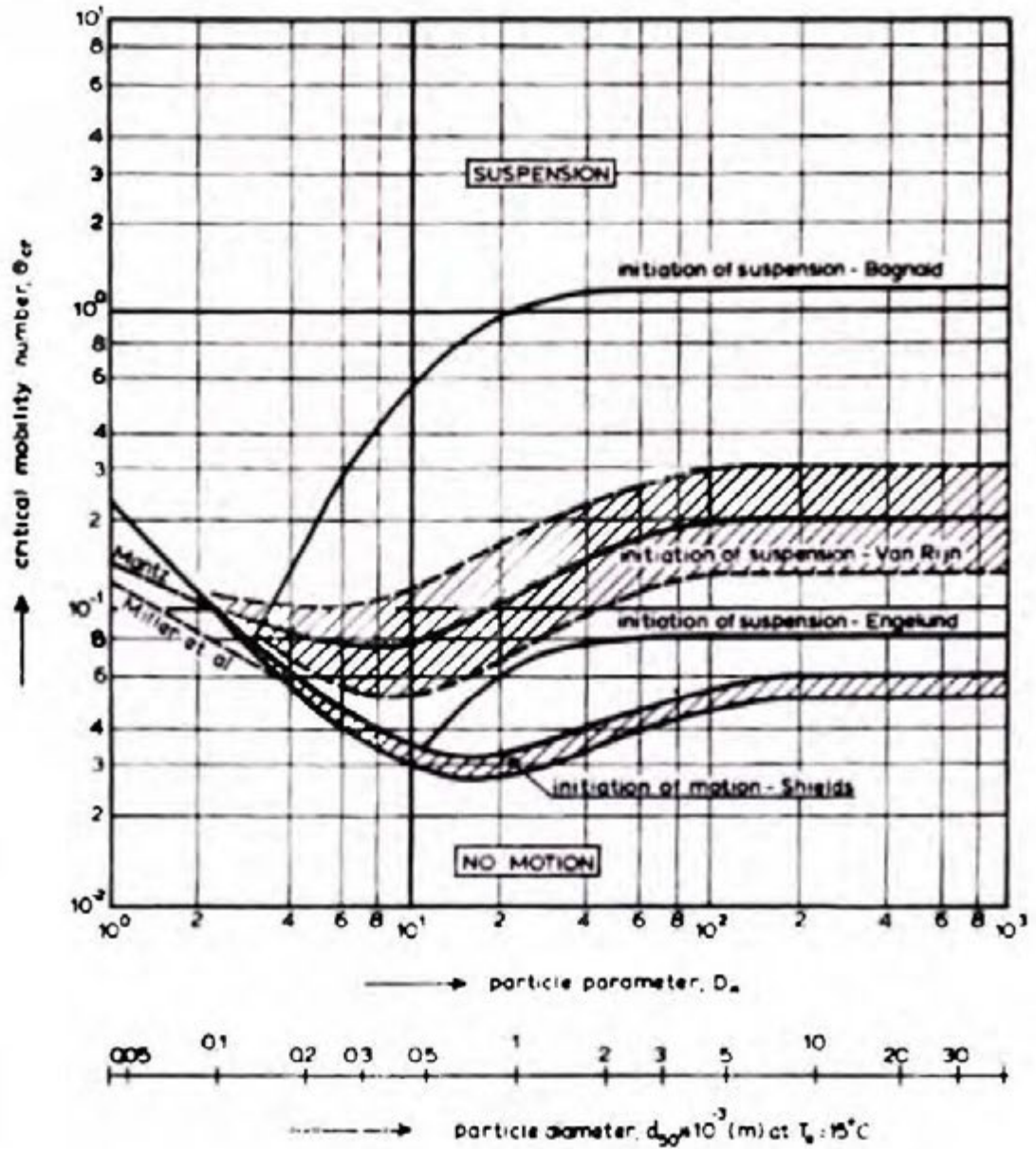
Figura 2-15: Efecto de la pendiente longitudinal y es esfuerzo cortante, según la ecuación y análisis de Chiew y Parker (1994) (Modificado por García, 2009)



h) Van Rijn (1993)

Van Rijn (1993) desarrolló el gráfico que se muestra en la Figura 2-16, el cual determina el movimiento de las partículas en función del esfuerzo crítico y el diámetro, además integra los resultados de otros estudios, como el del Bagnold, Engelund y Shields. Nótese la variabilidad del rango si hay movimiento o no, asociado al criterio de ajustes de cuando inicia el movimiento: con una partícula, varias o movimiento generalizado.

Figura 2-16: Iniciación del movimiento y suspensión para una superficie plana, (Van Rijn, 1984)

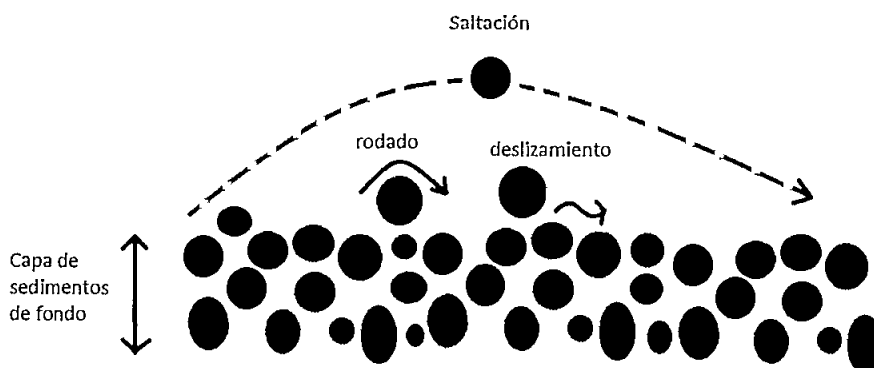


2.6. Transporte de sedimentos de fondo

El transporte de fondo ocurre cuando las partículas en el lecho de un río se mueven porque el esfuerzo cortante excede el valor crítico. En un principio las partículas se moverán deslizando o rodando, y cuando se presentan valores aún más altos del valor crítico, los granos se moverán por saltos que siguen una trayectoria balística. (Figura 2-17) Esta saltación se describe como un transporte no suspendido, el cual es gobernado por las fuerzas hidrodinámicas del flujo, que vencen las fuerzas de la gravedad.

Esta capa de sedimentos también sirve como una zona de intercambio entre la capa de sedimentos en suspensión y de fondo. La dinámica de esta capa y su tipo de movimiento va depender de los esfuerzos cortantes, a tal punto que el lecho puede deformarse y moverse, lo que se conoce como formas de fondo.

Figura 2-17: Movimiento de las partículas del sedimento de fondo (Fuente: Elaboración propia)



El transporte de fondo se desarrolla tangencialmente al fondo del río, este volumen de sedimentos que pasa a través de una sección del río se puede definir como q_b , donde las unidades corresponden a longitud³/ longitud/tiempo ó longitud²/tiempo, está en función del esfuerzo cortante τ_b , una componente q_{bs} y q_{bn} donde "s" va en sentido de la corriente y "n" en la dirección lateral, y se define de la siguiente forma:

$$q_b = u_b c_b \delta_b \quad (25)$$

Donde q_b es el volumen de sedimentos que transporta (m^2/s), c_b es la concentración de sedimentos (volumen de sedimentos/volumen mezcla de sedimentos en agua), u_b es la velocidad de las partículas (m/s), y δ_b el espesor de la capa de sedimentos (m). Definiendo la carga de sedimentos como el producto de la concentración de partículas por la velocidad y el espesor de la capa en movimiento.

García (2008), propone otra definición para determinar el volumen de sedimentos en función de la cantidad de partículas que se movieron por unidad de área:

$$q_b = N_b V_b u_b \quad (26)$$

Donde N_b es el número de partículas por unidad de área (m^{-2}), V_b es el volumen de partícula (m^3) y u_b es la velocidad de la partícula (m/s).

2.6.1. Relaciones de transporte de fondo

Existen gran cantidad de relaciones que estiman la producción de sedimentos de fondo, a continuación, se presentan algunas de ellas:

a) Meyer-Peter y Müller (1948)

Esta es una relación empírica, que ha sido verificada para datos uniformes de gravas y arenas, la cual fue desarrollada para los ríos de en los Alpes de Suiza y se define de la siguiente manera:

$$\phi_b = 8(\mu\theta - 0.047)^{3/2} \quad (27)$$

$$\phi_b = \text{carga de transporte de sedimentos de fondo} = \frac{q^*}{(s-1)^{0.5} g^{0.5} d_0^{1.5}}$$

$$\theta = \text{parametro del moviento de las partículas} = \frac{\tau^*}{(\rho_s - \rho) g d_m}$$

$$\mu = \text{factor de eficiencia} = (C/C^*)^{1.5}$$

$$C = \text{Coeficiente de Chezy} = 18 \log(12h/K_s)$$

$$C = \text{Relación de Chezy para el tamaño de la partícula} = 18 \log(12h/K_s)$$

Donde el τ_* es el esfuerzo crítico, K_s es la rugosidad efectiva, h es la altura del agua, d_m es el diámetro medio la partícula, y q^* es la carga de transporte de fondo (m^2/s).

b) Bagnold (1966)

Desarrollo la ecuación con base en el análisis de fuerzas de sobre las partículas.

$$q^* = \frac{e_b \tau_c^* \bar{\mu}}{(\rho_s - \rho) g \cos \beta (\tan \phi - \tan \beta)} \quad (28)$$

Donde $\tan \beta$ es la pendiente de fondo, $\tan \phi$ coeficiente dinámico de fricción (0.6), μ velocidad media, e_b factor de eficiencia (0.1-0.2), τ_c^* esfuerzo cortante evaluado del gráfico de Shields.

c) Yalin (1963)

Yalin (1963) obtuvo la siguiente relación:

$$q^* = 0.635 s (\tau^*)^{1/2} \left[1 - \frac{\ln(1+a_2 s)}{a_2 s} \right] \quad (29)$$

$$a_2 = \frac{\tau^* - \tau_c^*}{\tau_c^*} \quad (30)$$

τ_c^* es el esfuerzo cortante evaluado del gráfico de Shields.

d) Paintantal (1971)

Fue obtenida para mediciones extensivas de transporte de fondo, es válida para materiales entre 1 mm y 25 mm de diámetro, y τ^* entre 0.007 y 0.06.

$$q^* = 6.56 \times 10^{18} (\tau^*)^{16} \quad (31)$$

e) Van Rijn (1984)

$$q^* = 0.053 \frac{\tau^{2.1}}{D^{0.3}} \quad (32)$$

$$D_* = D_{50} \left(\frac{gR}{v^2} \right)^{1/3} \quad (33)$$

$$T = \frac{\tau_s^* - \tau_c^*}{\tau_c^*} \quad (34)$$

τ_s^* es el esfuerzo cortante para la fuerza de fricción en el grano. Esta relación puede ser utilizada para tamaño de partículas entre los 0.2 a 2.0 mm.

f) Madsen (1991)

$$q^* = F_M \left(\tau^{*1/2} - 0.7\tau_c^{*1/2} \right) (\tau^* - \tau_c^*) \quad (35)$$

Donde $F_M = 8/\tan\phi$ para partículas de arena que ruedan y se deslizan y $F_M = 9.5$ para partículas de arena que saltan.

g) Niño y García (1998)

$$q^* = \frac{12}{\mu_d} (\tau^* - \tau_c^*) \left(\tau^{*1/2} - 0.7\tau_c^{*1/2} \right) \quad (36)$$

Se obtuvo a partir de experimentos con arenas y gravas, y propone utilizar un coeficiente de $\mu_d = 0.23$

h) Cheng (2002)

$$q^* = 13 \tau^{*3/2} \exp\left(-\frac{0.05}{\tau^{*3/2}}\right) \quad (37)$$

Esta relación proporciona resultados similares a los de Meyer-Peter y Müller (García, 2008)

2.6.2. Formas de fondo

Las formas de fondo son el relieve que se inicia por la oscilación de flujo generado por obstáculos en el fondo. Las formas que lo aproximan están basadas en características hidráulicas y no en la dinámica de sedimentos. Estas se clasifican según la geometría: rizos, dunas y antidunas. (Figura 2-18) Los rizos se caracterizan por tener una longitud mucho menor que las dunas y antidunas. La cresta de las dunas y rizos tienen una forma más triangular y las antidunas tienen formas más suaves. (Figura 2-19.)

Figura 2-18: Tipos de forma de fondo según Simons y Richardson (1966), (Van Rijn, 1993)

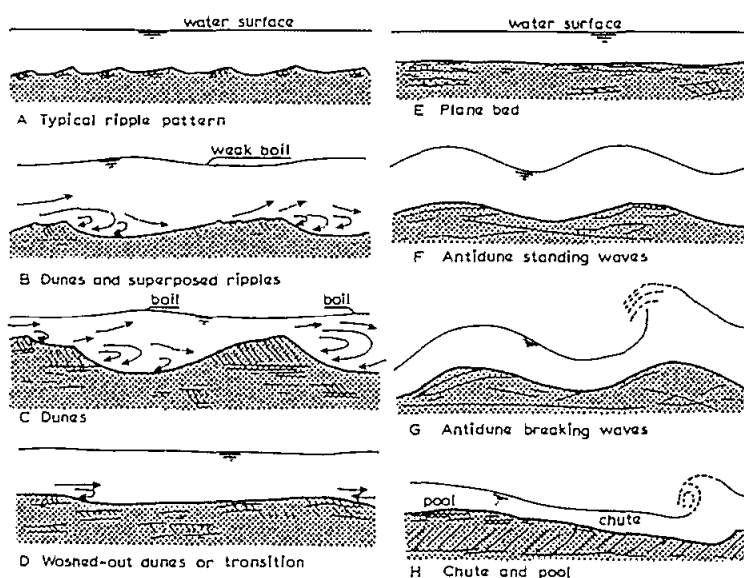
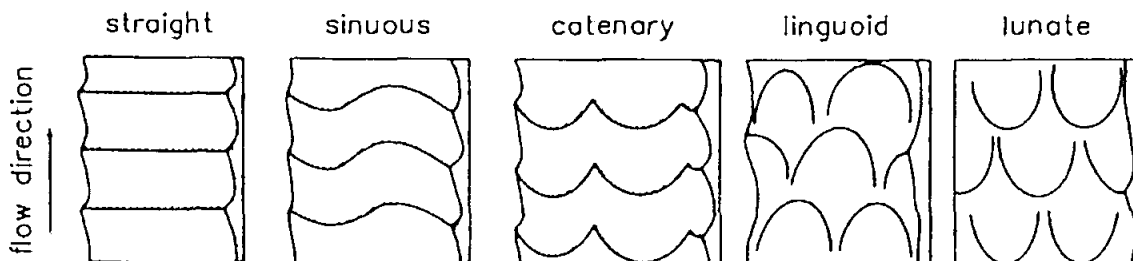
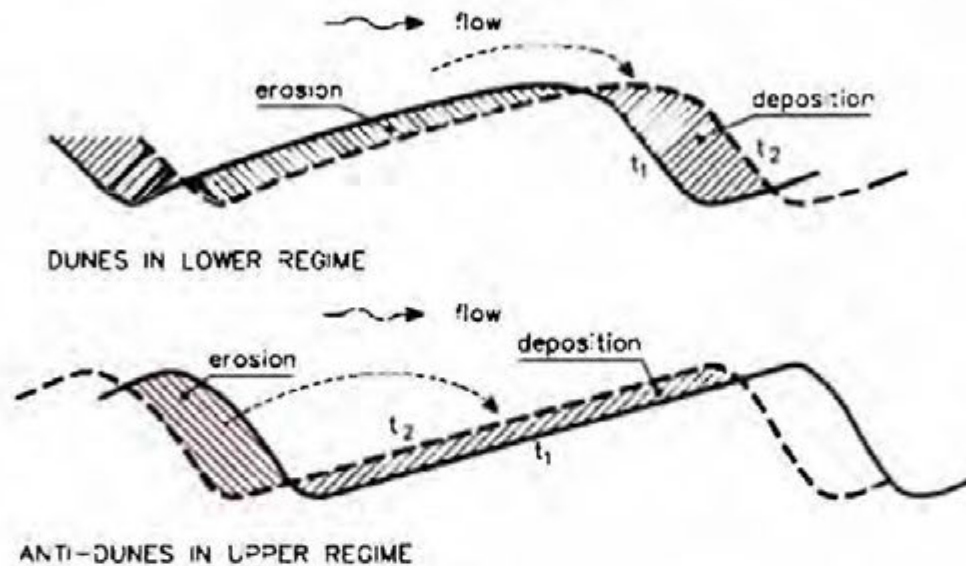


Figura 2-19: Tipos de patrones de cresta de formas de fondo (Van Rijn, 1993)



Los rizos y dunas viajan hacia aguas abajo porque la erosión ocurre en la cara de aguas arriba y depositan en la cara de aguas abajo. Las antidunas erosionan la cara de aguas abajo y depositan en la cara de aguas arriba (Ver Figura 2-20)

Figura 2-20: Migración de las dunas y antidunas en regímenes de flujo altos y bajos. (Van Rijn, 1993)



Van Rijn (1984, 1989) derivó una ecuación para determinar el tipo y geometría de las formas de fondo de las arenas, la cual se define según la información de la Tabla 2-3, donde T está definido por la ecuación 38 y D .

$$D = \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \frac{g}{v^2} \right]^{1/3} d_{50} \quad (38)$$

Tabla 2-3: Clasificación de las formas de fondo según Van Rijn (1993)

Tipo de régimen	Tamaño de Partículas		
	$1 \leq D \leq 10$	$D > 10$	
Bajo	$0 < T \leq 3$	Mini rizos	Dunas
	$3 < T \leq 10$	Mega-rizos y dunas	Dunas
	$10 < T \leq 15$	Dunas "desteñidas"	Dunas
Transición	$15 < T < 25$	Dunas, ondas de arenas	
Alto	$T \geq 25, Fr < 0.8$	Ondas de arenas (simétricas)	
	$T \geq 25, Fr \geq 0.8$	Fondo plano y/o antidunas	

Lo anterior se ha sido derivado para arenas, según Van Rijn (1993) aún no hay derivaciones para formas de fondo en gravas.

2.7. Mediciones de sedimentos de fondo y tipos de muestreadores

La importancia de muestrear el sedimento de fondo está asociada a aspectos fundamentales para el diseño de estructuras en cauces, como por ejemplo el conocer el diámetro medio de la muestra de sedimentos. En campo se encuentra una amplia gama de tamaños de sedimentos, los cuales pueden presentar una estratificación vertical y variabilidad espacial, además generalmente se pueden ubicar varias capas de sedimentos de fondo donde la primera suele ser la que tiene el material más grueso, y es la que interactúa más frecuentemente con el flujo del río. Para determinar la composición del depósito de sedimentos lo ideal es identificar las capas en campo y poder analizarlas todas con una misma metodología.

2.7.1. Recolección de muestras y análisis

Los métodos de recolección de muestras de sedimentos incluyen métodos volumétricos, fotografías, tamizaje, entre otros.

a) Muestreo volumétrico

Es el método más comúnmente utilizado en la obtención de la distribución del tamaño de los granos en un depósito de sedimentos. La muestra extraída se compone de un volumen predeterminado que es lo suficientemente grande como para que sus dimensiones sean independientes de las dimensiones de los granos individuales (Kellerhals y Bray 1971). La muestra se tamiza y los resultados se representan gráficamente en términos del tamaño del grano (tamiz) con respecto al porcentaje en peso que pasan a través del tamaño de tamiz.

Una pregunta que surge es con respecto a la profundidad mínima de excavación necesario para obtener una adecuada muestra volumétrica. Los experimentos han indicado que la profundidad mínima requerida para que una muestra sea volumétrica es aproximadamente

dos veces el tamaño de la partícula más grande presente en el depósito de la muestra (Diplas y Fripp, 1992).

b) Muestreo por conteo

Wolman (1954) fue el primero en introducir el uso del método de la cuadrícula para el muestreo de sedimentos fluviales. El método consiste en utilizar una cuadrícula de determinado tamaño y medir todas las partículas que encuentran debajo de ella. Existe una variante que consiste en muestrear el tamaño de partícula por intervalos regulares.

El tamaño de partícula suele medirse por medio de un gravelómetro, es una plantilla de agujeros cuadrados, cuyo lado corresponde a la dimensión de la abertura del tamiz. Los tamaños más grandes de partículas se pueden medir con cinta métrica. La curva granulométrica se obtiene graficando el tamaño de partícula versus el porcentaje de piedras en la muestra que es más fina.

c) Muestreo fotográfico

Existe otra variante del método de Wolman, la cual reduce el trabajo de campo, esta implica tomar una fotografía de la muestra con una escala determinada. Sin embargo la determinación de las dimensiones de las partículas reales puede volverse erróneo, ya que existe un sesgo de efectos de sombra, distorsión de la escala, ángulo donde se tomó la fotografía. Esto se puede reducir tomando la fotografía lo más paralelo posible a la muestra para evitar la deformación y utilizando programas que deformen la fotografía a la escala que se tiene referencia (Figura 2-21) Este muestreo se recomienda para depósitos de sedimentos que contienen sobretamaños.

Figura 2-21: Corrección de deformación de fotografía para determinar el tamaño de partículas, por medio de un programa (Fuente: Elaboración propia).



e) Muestreo según Klingeman (1979)

Klingeman (1979), propuso un método para obtener curvas granulométricas para mezclas de sedimento. El propone muestrear el material en superficie, para esto se debe llegar al campo y dibujar un círculo con un radio igual o mayor a 10 veces el diámetro de la mayor partícula expuesta en superficie., y muestrear todas las partículas que se ubican adentro, con ayuda de gravelómetros. Luego para muestrear el material del substrato se debe remover la mayor partícula y excavar hasta la profundidad dejada por esta partícula, y muestrear el material del substrato. (Este material del substrato se puede realizar un muestreo volumétrico en laboratorio).

2.7.2. Recolección de muestras de sedimento de fondo

Los muestreadores de sedimentos se pueden clasificar tres tipos: instalados en el lecho de un canal, portátiles y no invasivos.

a) Muestreadores portátiles

Estos se utilizan para medir carga de fondo de manera manual, para partículas de hasta 30 cm. Estos se clasifican dependiendo de cómo funcionen y el tipo de cesta donde se recogen los sedimentos. Para que funcione correctamente debe ser utilizado para el rango de partículas que fueron creados. Su funcionamiento consiste en bajar la cesta al fondo del río y recolectar los sedimentos de fondo que están teniendo movimiento. Dentro de las

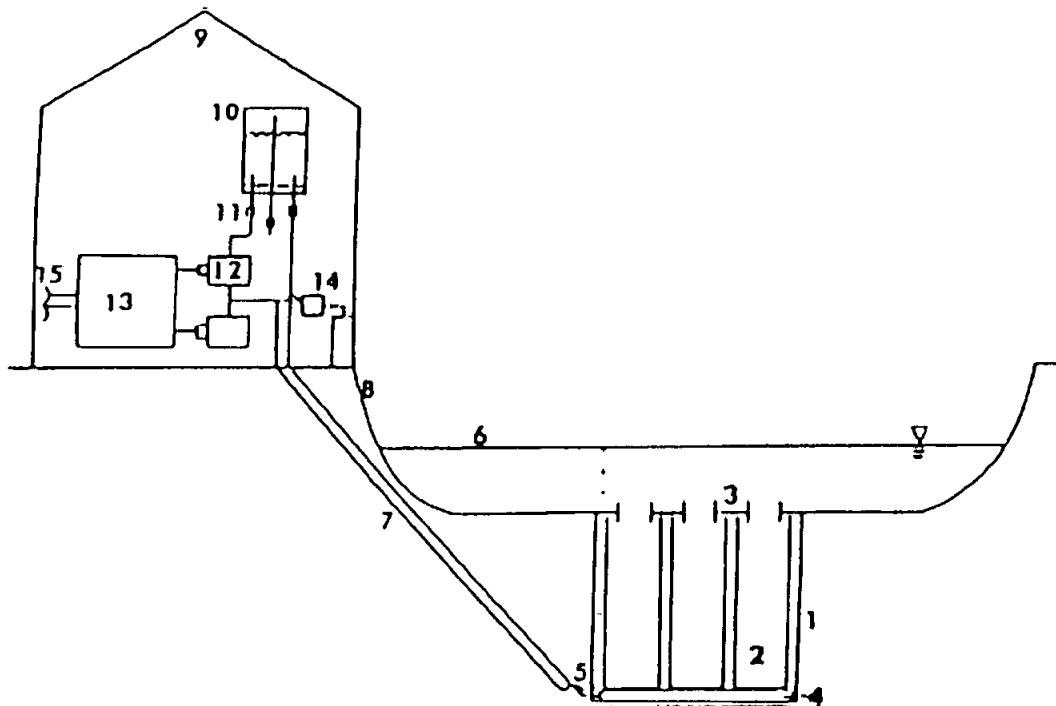
limitantes se puede mencionar que partículas más finas como las arenas que se ubican en el fondo del río, pueden ser removidas cuando se coloca la cesta en el fondo del río.

b) Muestreadores en el lecho de un canal (muestreador de pozos)

Estos son instalados en lecho del río de manera que quede enterrado (Figura 2-22) Por medio de recipientes se capturan la carga de fondo, y son pesados en la caseta de instrumentación. Entre las limitantes del sistema se puede mencionar:

- El muestreador se puede llenar de sedimentos por completo en un tiempo desconocido, durante el periodo de medición,
- Antes de una creciente deben estar vacíos

Figura 2-22: Esquema de un muestreador de pozo: (1) caja externa, (2) la caja interna, (3) ancho de la cubierta, (4) la almohadilla de presión, (5) salida del tubo de burbuja, (6) la superficie del agua, (7) tubos de burbujeador y almohada, (8) riberas, (9) Caseta de instrumentación, (10) atrapan el aire, (11) válvulas, (12) transductor de presión (13), fuente de alimentación, (14) de calibre burbuja, y (15) cables a sistema de telemetría remota (Kuhnle 1991), (García, 2008).



c) Muestreador no invasivo (tubo de vórtice)

Consiste en una ranura a 45° diagonal a un vertedor de cresta ancha construido a través del canal de medición. La ranura genera un vórtice que capta entre el 5%-15% del

sedimento transportado, los cuales caen a una trampa al lado del canal, ahí se determina su volumen y luego se devuelve al canal.

Se han desarrollado otros métodos que incluyen imágenes de partículas, técnicas acústicas y seguimiento magnéticas. Ninguno se ha desarrollado en la medida en que se puede considerar una técnica estándar para el muestreo de carga de fondo en arroyos y ríos. (García, 2008).

Capítulo 3: Caracterización física de los agentes que controlan el transporte del sedimento en los puntos de muestreo

3.1. Delimitación y caracterización de las cuencas hasta los sitios

La investigación se realizó en la cuenca del río Grande de Térraba, la cual se ubica en el Pacífico Sur del país, en los cantones de Pérez Zeledón, Osa y Buenos Aires, provincias San José y Puntarenas. Esta tiene un área de 5060 km², un perímetro de 473 km, nace a la elevación 3820 msnm y desemboca en el Océano Pacífico. Al norte y al este limita con la cordillera de Talamanca, al oeste limita con la fila Costeña, y al Sur con la fila Cruces, Sankraua, Grisera y Huacas. Dentro de los ríos principales que la forma la cuenca se encuentran el río General y el río Coto Brus.

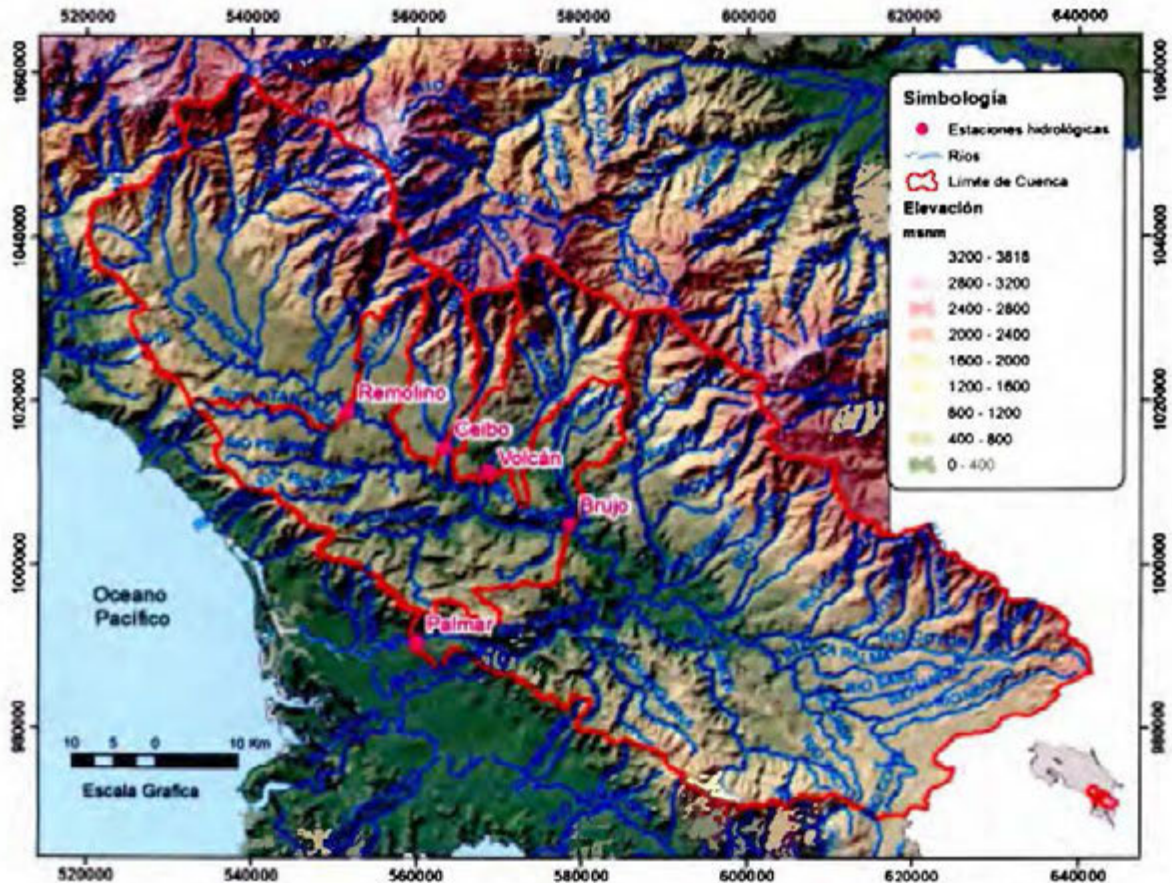
Los cinco puntos de muestreo se ubicaron en las barras de sedimento ubicadas en las márgenes del río General a la elevación 475 msnm y 135 msnm, estación hidrológica Remolino y Brujo, respectivamente; estación hidrológica en el Río Ceibo, elevación 269 msnm, Estación hidrológica en el Río Volcán, elevación 320 msnm y Río Grande de Térraba, estación Palmar, ubicada en la elevación 13 msnm.

En la Tabla 3-1 se muestra las áreas, el perímetro, la elevación máxima y elevación mínima de cada una de las cuencas. La cuenca con menor área es la estación Volcán con 144 km² y un perímetro 58 km, la de mayor área es Palmar la cual mide el 94% de la cuenca del río Grande de Térraba, 4767 km² y tiene un perímetro 413 km. Brujo y Remolino, se ubican sobre el Río General, tienen un área de 2401 km² y 1076 km², respectivamente. El río Ceibo, al igual que el río Volcán son tributarios del río General. La cuenca del río Ceibo hasta la estación hidrológica mide un área de 284 km² y encierra un perímetro de 97 km. En la Figura 3-1 se muestra la ubicación geográfica de cada una de las cuencas.

Tabla 3-1: Características generales de las cuencas hasta los sitios de muestreo

Estación Hidrológica	Coordenadas X, Y (CRTM005)	Río	Área (km ²)	Perímetro (km)	Elevación Máxima (msnm)	Elevación Mínima (msnm)
31-01 Palmar	559358 990452	Grande de Térraba	4767	413	3820	13
31-3 Brujo	579717 1005285	General	2401	337	3820	136
31-04 Remolino	550810 1019643	General	1076	207	3820	330
31-18 Volcán	568301 1010659	Volcán	144	58	3120	340
31-20 Ceibo	562997 1014776	Ceibo	284	97	3020	269

Figura 3-1. Ubicación de los 5 puntos de muestreo (Fuente : elaboración propia)



3.1.1. Forma de la cuenca

El índice de compacidad es un factor que permite clasificar la cuenca por su geometría, este índice relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro equivalente de una circunferencia que tiene la misma área. El valor del índice de compacidad se muestra en el Tabla 3-2, los valores para las cuencas estudiadas rondan entre los 1.36 y 1.94, lo que la clasifica a todas las cuencas como alargadas.

Tabla 3-2: Índice de compacidad para las cuencas hasta los sitios de muestreos

Estación	Índice de compacidad
31-01 Palmar	1.69
31-3 Brujo	1.94
31-04 Remolino	1.78
31-18 Volcán	1.36
31-20 Ceibo	1.62

3.1.2. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración de la cuenca se define como la duración del recorrido que hace una gota de agua que cae en el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida. Existen varias fórmulas empíricas que calculan el tiempo de concentración, basándose en parámetros como la longitud del cauce principal, diferencia de elevación entre la parte más alta y el punto de salida de la cuenca. Para calcular el tiempo de concentración de la cuenca de los ríos se utilizó la fórmula de Kirpich, la cual fue elaborada por el Servicio de Conservación de Suelos en 1940 a partir de cuencas rurales en Tennessee, con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10%).

Fórmula de Kirpich para el cálculo del tiempo de concentración se define:

$$t_c = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (39)$$

Donde:

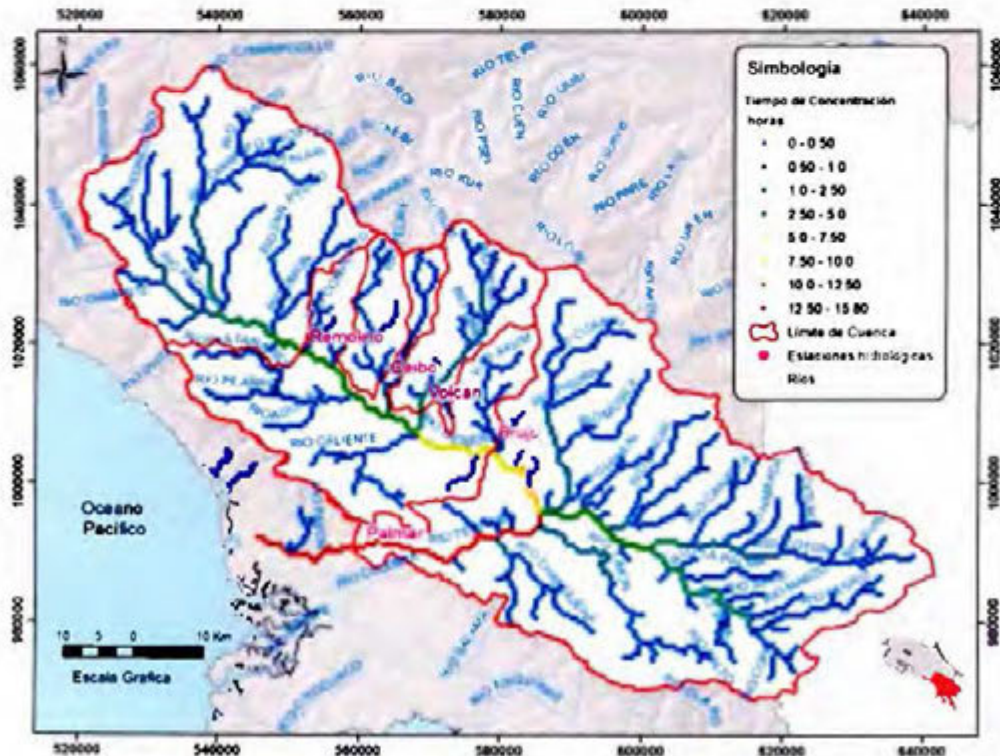
t_c = tiempo de concentración en minutos

L = máxima longitud del recorrido en metros

H = Diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal, en m

Utilizando una diferencia de elevación 3820 m y la longitud del cauce más largo de la cuenca (178 km) se obtiene un tiempo de concentración de 15.8 horas para la toda cuenca del Río Grande de Térraba. Para obtener el tiempo de concentración de las cuencas en estudio, se aplicó una metodología que utiliza los sistemas de información geográfica y crea un mapa de la distribución del tiempo en toda la cuenca. De este modelo se estima que el tiempo de concentración a la estación Remolino es de 3.2 horas, a la estación Brujo 7 horas, río Ceibo una hora y 10 minutos min, Volcán 45 min, y Palmar 14 horas y 30 min. (Figura 3-2)

Figura 3-2. Distribución del tiempo de concentración en la cuenca del río Grande de Térraba. (fuente: elaboración propia)



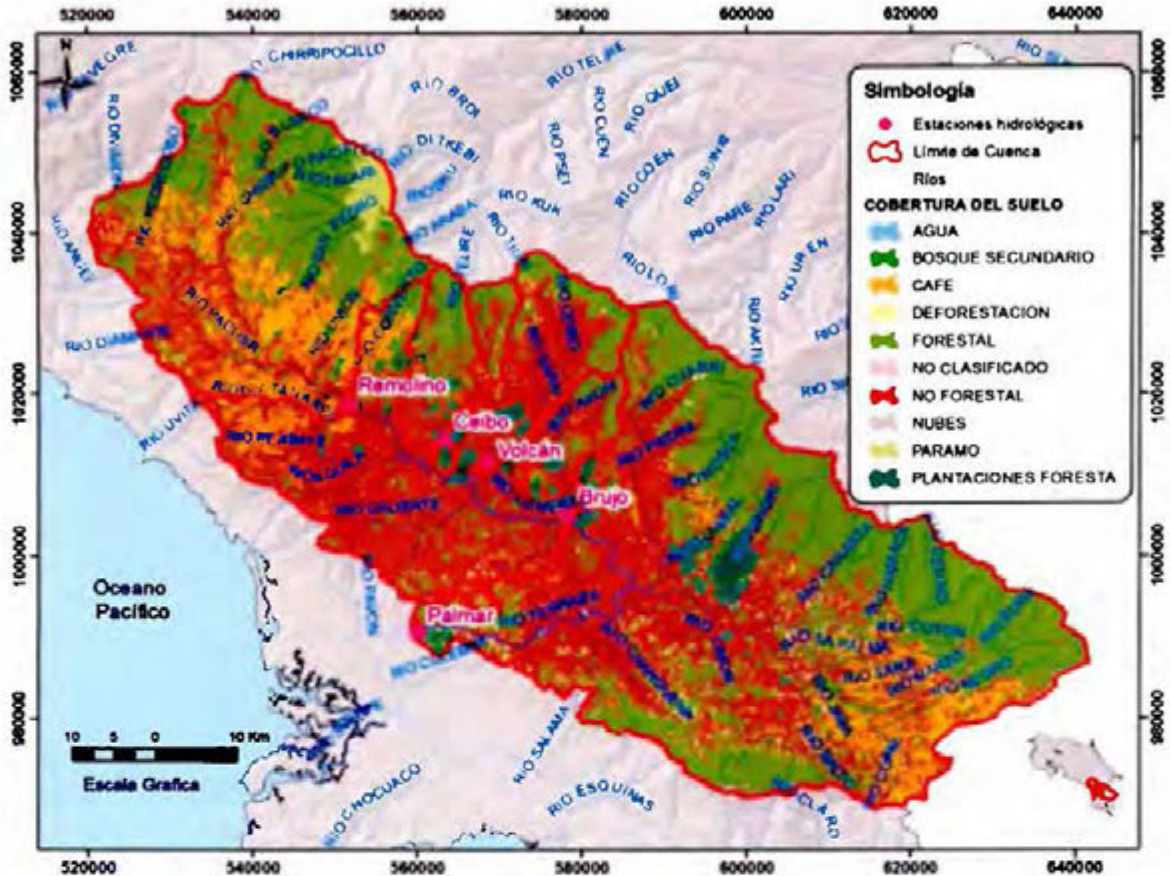
3.1.3. Cobertura de las cuencas

En la Figura 3-3 se muestra la cobertura de la cuenca del Río Grande de Térraba, según el Atlas Digital del Instituto Tecnológico de Costa Rica del 2008, y en la Tabla 3-3 se muestra como se distribuye la cobertura. La cuenca del río Volcán es la que se encuentra con una mayor cobertura forestal, 44%. La cuenca del río Ceibo es la más intervenida, ya que es la que abarca el mayor porcentaje de uso no forestal, 71%. En las cuencas restantes los porcentajes de cobertura no forestales rondan el 50%. El cultivo de café también toma importancia en las cuencas de las estaciones Palmar, Brujo y Remolino, entre 7.5% y 16%. En cuanto a la distribución espacial, las partes altas es donde se ubica la mayor cantidad de cobertura forestal, relacionado a que en esta zona se encuentra dos áreas protegidas, el Parque Nacional Chirripó y Parque Nacional La Amistad, las partes medias y bajas se encuentran con usos no forestales y cultivos. (Figura 3-3)

Tabla 3-3. Cobertura del suelo de la cuencas (Fuente: TEC, 2008)

Categoría	Palmar	Brujo	Remolino	Ceibo	Volcán
	Porcentaje del área (%)				
Agua	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0
Bosque Secundario	3.5	4.1	7.2	2.6	0.7
Café	7.5	9.7	16.0	0.2	1.6
Deforestación	1.5	0.6	0.6	1.2	0.3
Forestal	32.4	24.9	32.9	21.8	43.8
No Forestal	51.8	56.8	38.4	70.5	49.8
Nubes	0.1	-	-	-	-
Páramo	1.0	2.0	4.4	-	0.2
Plantaciones forestales	1.9	1.6	0.4	3.6	3.6
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Figura 3-3.: Cobertura del suelo de las cuencas (Fuente: Atlas Digital, TEC, 2008)



3.1.4. Descripción del cauce

El cauce principal de la cuenca del Río Grande de Térraba nace a la elevación 3820 msnm, en el Cerro Chirripó, este recorre 120.5 km hasta elevación 95 msnm, donde confluye con el río Coto Brus. Aguas abajo de la confluencia el cauce principal recorre 58 km hasta desembocar en el Humedal Térraba.

El parámetro densidad de drenaje expresa la cantidad longitud de las corrientes por unidad de área, y para la cuenca del río Grande de Térraba tiene un valor de 1.1 km/km². De acuerdo con Monsalve (1999), una densidad de drenaje pobre es 0.5 km/km², y una cuenca excepcionalmente bien drenada alcanza valores de 3.5 km/km².

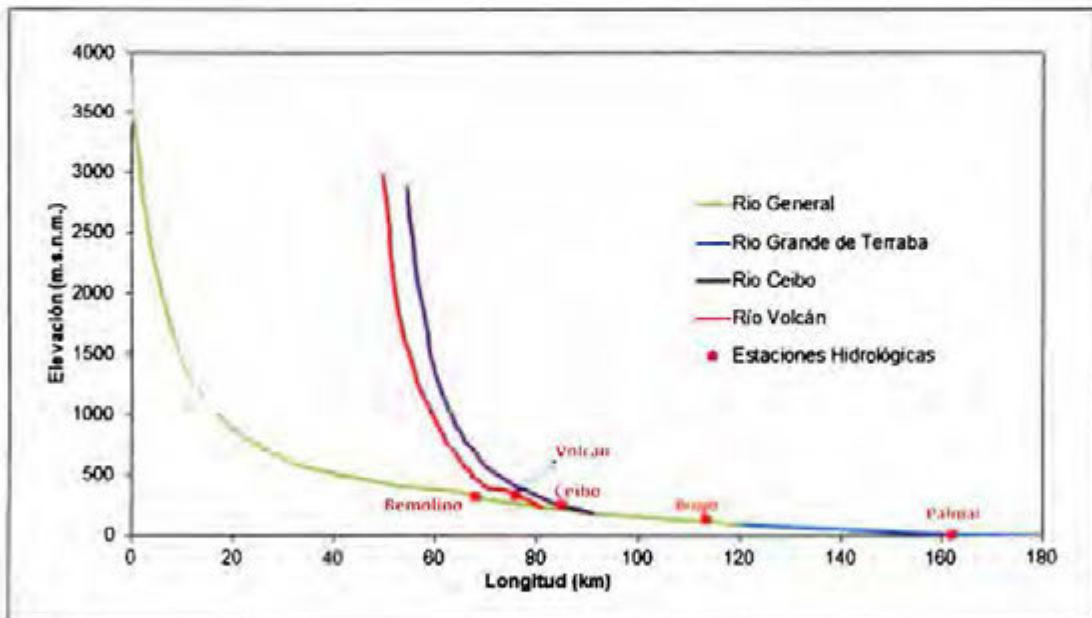
En la Figura 3-4 se muestra los perfiles de los ríos en estudio, con un punto anaranjado se indica la ubicación de las estaciones hidrológicas. La estación Remolino y Brujo, se ubican

sobre el río General, en el sitio de muestreo tienen una pendiente de 0.006 m/m y 0.004 m/m, respectivamente. El río Ceibo nace a la elevación 3020 msnm, este recorre 37 km hasta desembocar al río General. El sitio de la estación hidrológica se ubica a unos 6 km aguas arriba de esta confluencia y registra una pendiente de 0.006 m/m.

El río Volcán nace a la elevación 2980 msnm y recorre 31 km hasta la confluencia con el río General. En el sitio de la estación hidrológica se registra una pendiente de 0.0013 m/m, la cual se ubica a unos 3.5 km aguas arriba de la confluencia con el río General.

El río Grande de Terraba en el sitio de la estación tiene una pendiente es de 0.0013 m/m y su cauce principal ha recorrido alrededor de los 160 km desde su punto más alto.

Figura 3-4.: Perfil del cauce principal de los sitios de muestreo (Fuente: elaboración propia)



En la Figura 3.5. se observan fotografías aéreas de los cinco ríos donde se situaron los sitios de muestreo. El punto de Volcán se ubica en una zona donde confluyen los ríos Ángel y Volcán, lo que hace que el río presente un grado de inestabilidad. Durante el periodo de muestreo se observó que existía socavación en la margen izquierda, lo que provocó pérdida de vegetación. En el punto de muestreo en Ceibo, el río tiene una trayectoria relativamente recta ya que su margen derecha está formada por una pared roca que impide su movimiento

lateral. En Brujo, el punto de muestreo se ubicó aguas arriba del puente de la Ruta Nacional N°2, donde el río General tiene un cauce de 150 m de ancho y forma un meandro con una longitud de 1.5 km, un ancho de 400 m donde el río gira 360°. En Palmar, el punto de muestreo se ubica en un meandro del río Grande de Térraba el cual tiene una longitud de 2 km y una ancho de 300 m. Remolino se ubica en una zona donde el río General, al igual que Ceibo, tiene una trayectoria relativamente recta ya que su margen derecha está formada por una pared roca que impide su movimiento lateral. Por las pendientes de los cauces y su ubicación en la cuenca, los puntos Volcán, Ceibo y Remolino se clasifican como ríos de montaña y Brujo y Palmar como ríos de planicie.

Figura 3-5.: Fotografías aéreas de los puntos de muestreo (Fuente: ICE, 2009 y Google Earth, 2017)





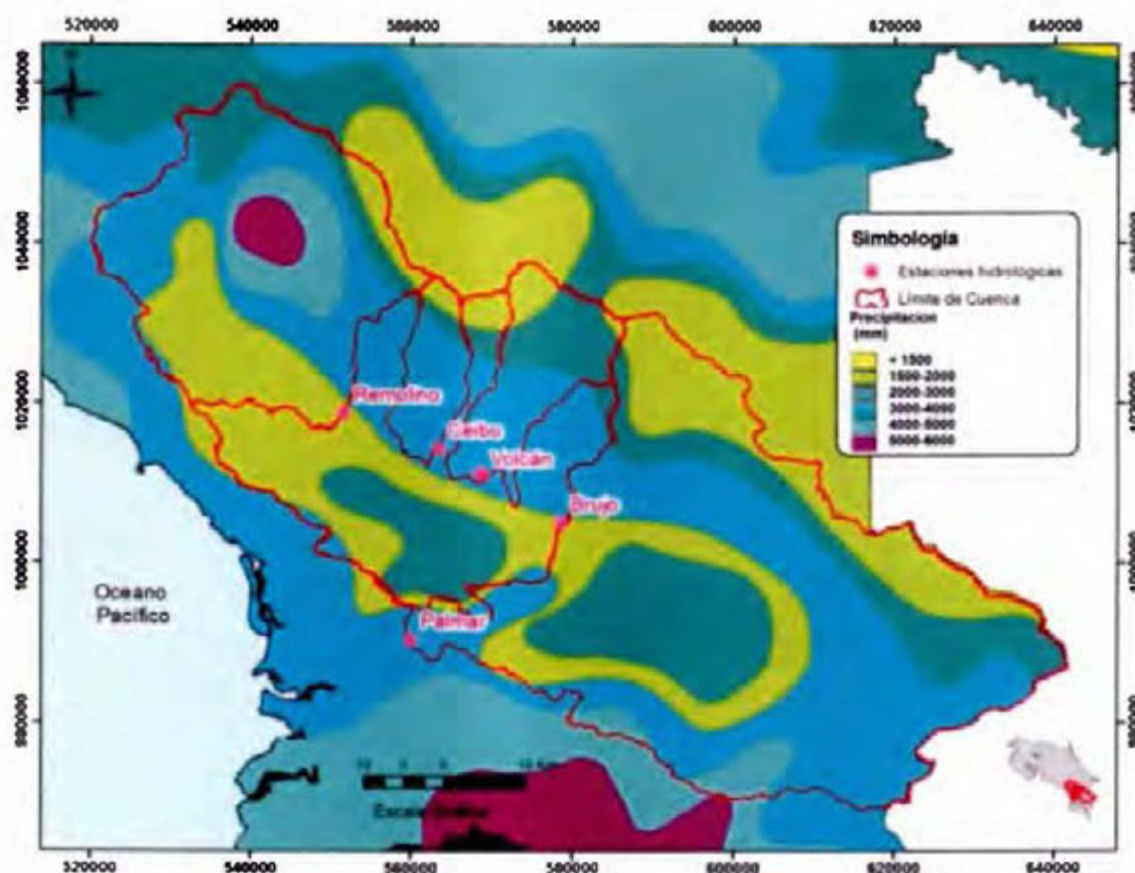
3.2. Descripción climática

La cuenca en estudio se ubica en la vertiente del Pacífico del país, esta zona se caracteriza por tener un régimen de precipitación con una marcada y bien definida época seca de diciembre a abril y una época lluviosa de mayo a noviembre, con una disminución en la precipitación durante el "veranillo o canícula" en los meses de julio y agosto. Estas variaciones están relacionadas con la ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical

(ZCIT), que es una extensa línea de confluencia de los vientos alisios del noreste en el Hemisferio Norte y los vientos alisios del sureste en el Hemisferio Sur. (IMN, 2009)

Según el mapa de distribución de la precipitación del Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2009) en la cuenca caen 2970 mm al año. Las menores precipitaciones se registran en el sector sur de la cuenca (1500-2000 mm), mientras que al sector norte se presentan un núcleo de lluvia en donde se alcanzan acumulados de hasta 5000 mm al año. (Figura 3-6.)

Figura 3-6. Distribución espacial de la cuenca (Fuente: IMN, 2009)



En la cuenca del río Grande de Térraba hasta el sitio de la estación hidrológica Palmar llueven 2805 mm, en el río General, hasta Brujo 2851 mm. La parte alta de la cuenca del río General, hasta Remolino, registra una precipitación de 3100 mm. Los ríos Ceibo y Volcán, registran 2854 y 3219 mm de lluvia al año, respectivamente. Las variaciones entre una cuenca y otra no son mayores a los 400 mm. (Tabla 3-4)

Tabla 3-4. Precipitación promedio anual en las cuencas (Fuente: IMN 2009)

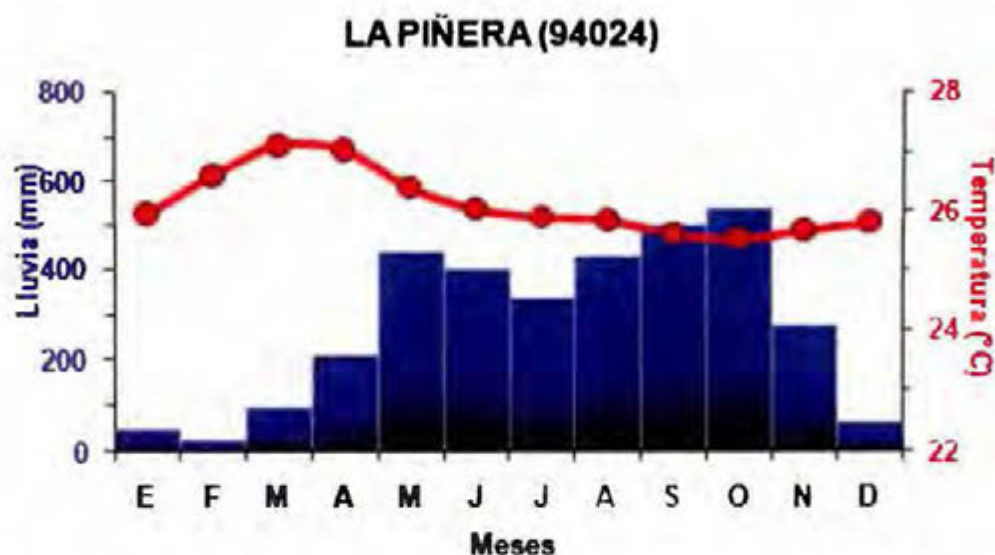
Estación Hidrológica	Precipitación Promedio Anual (mm)
Palmar	2805
Brujo	2851
Remolino	3100
Ceibo	2854
Volcán	3219

La distribución temporal de la lluvia de las cuencas se puede describir por medio de la estación de lluvia 94024 La Piñera, la cual se ubica muy cercana al centroide de la cuenca del río Grande de Térraba. Esta estación registra una precipitación promedio anual de 3360 mm en los meses más húmedos (setiembre octubre) se registran acumulados alrededor de los 500 mm al mes y en los meses más secos (enero-febrero) se alcanza valores entre los 26 y 30 mm al mes (Ver Figura 3-7). En la época húmeda se debe esperar entre 21 a 27 días de lluvia por mes. (IMN, 2009)

La estación la Piñera registra durante todo el año una temperatura promedio entre los 25 y 27°C. La cuenca se encuentra en una zona donde el brillo solar se presenta de 5 a 6 horas diarias, y la evapotranspiración tiene un promedio anual entre los 1200-1300 mm. (IMN, 2009)

Por otro lado, según el Instituto Meteorológico Nacional el año 2014 (IMN, 2015), en el cual se realizó el trabajo de muestreo, inicio con el fenómeno natural del Niño Oscilación del Sur (ENOS) en su estado neutral, a partir del mes marzo cambia su fase "Niño" y así se mantiene hasta finales del año, lo que indica que fue un periodo seco.

Figura 3-7. Distribución temporal de la precipitación para la estación Pindeco (Fuente: IMN, 2009)



El comportamiento del hidrograma y la influencia de las tormentas en la cuenca en estudio, se puede medir a través del patrón de desarrollo de nubosidad en la zona. Este se debe principalmente a dos tipos de mecanismos, el primero consiste en el ingreso de humedad desde el océano Pacífico y el segundo es la nubosidad proveniente de algún sistema atmosférico (sistema de baja presión, ciclón, depresión tropical). En los meses secos las tormentas afectan una pequeña parte de la cuenca generando un hidrograma con un solo pico de caudal, y en los meses húmedos las tormentas se den en gran parte de la cuenca, lo que implica una producción de caudal alta y la posibilidad de un hidrograma con varios picos. (IMN, 2009)

3.3. Caracterización hídrica

Para realizar la caracterización hídrica de las cinco cuencas, se utilizó el registro de caudales de las estaciones hidrológicas. Las estaciones Remolino, Brujo y Palmar se encuentran en operación desde los años 60, por lo que sus registros son confiables. Las estaciones Volcán y Ceibo se encuentran instalados desde el 2006, a pesar de que ya tienen 11 años de operación, la estación Ceibo tiene faltantes de un 25% del tiempo.

En la Tabla 3-5 y Figura 3-8 se presentan los caudales mensuales, para todas las estaciones, nótese como en todas las estaciones se refleja el patrón de lluvia de la vertiente

del Pacífico Sur. La estación Palmar registra un caudal promedio anual de 328 m³/s, un caudal promedio máximo en el mes de octubre de 777 m³/s y un mínimo en marzo de 67 m³/s. Los caudales promedio diarios el 90% del tiempo son superiores a los 66 m³/s y el 50% superiores a los 270 m³/s. Se estima que su producción anual de este río es de 69 l/s/km².

Figura 3-8. Caudales promedio mensuales para las estaciones hidrológicas en estudio. (Fuente: ICE, 2014)



La estación Brujo registra aproximadamente la mitad del área de la estación Palmar. El caudal promedio anual de esta cuenca es de 180 m³/s, registrando una producción más alta en este sector de la cuenca del río Grande de Térraba. El caudal mínimo es de 30 m³/s y el máximo de 439 m³/s. El caudal el 90 % del tiempo es superior al 31m³/s y el 50 % del tiempo a 141 m³/s. Se estima que su producción anual de 75 l/s/km².

La estación Remolino, mide el 45% de la cuenca del Río General hasta la estación Brujo. Presenta una producción de 77 l/s/km², un caudal promedio anual de 83 m³/s, con un máximo en octubre de 186 m³/s y un mínimo en marzo de 18 m³/s.

Ceibo y Volcán, son dos afluentes del río General que miden parte de producción hídrica entre las estaciones Remolino y Brujo. Ambas estaciones registran un caudal promedio anual es de 29 m³/s y 14 m³/s, respectivamente, un mínimo de 6.9 m³/s para Ceibo y 1.9

m³/s para Volcán y el máximo en octubre de 69 m³/s y 28 m³/s. La producción de caudal por km² de estas dos cuencas sobrepasan en un 25%, a las estaciones anteriores, ya que ambas se ubican en el sector de la cuenca del Río Grande de Térraba con el régimen de precipitación más alto.

Tabla 3-5: Caudales promedio mensuales en las estaciones hidrológicas seleccionadas (Fuente: ICE, 2014)

Área (km ²)	4767	2401	1076	284	144
Estación Hidrológica	31-01 Palmar	31-03 Brujo	31-09 Remolino	31-20 Ceibo	31-18 Volcán
Ene	120	56	32	12	4.1
Feb	78	36	21	7.9	1.9
Mar	67	30	18	6.9	1.9
Abr	100	50	29	9.5	7.1
May	281	157	74	28	17
Jun	399	219	99	37	18
Jul	339	184	85	30	11
Ago	395	225	104	38	17
Sep	591	349	149	48	21
Oct	777	439	186	69	28
Nov	555	292	131	42	25
Dic	238	119	64	21	10
Promedio	328	180	83	29	14
Caudal 90%	66	31	18	5.5	1.83
Caudal 50%	270	141	72	23	12
Producción (l/s/km ²)	69	75	77	103	95

En la Tabla 3-6, se muestra el análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos, de las estaciones hidrológicas, el cual se utilizará como referencia para realizar el análisis de las crecientes que provocaron el umbral del movimiento incipiente del sedimento de fondo. Este análisis de frecuencia fue proporcionada por el departamento de Hidrología del ICE en el 2015. Para el caso de la estación Volcán, no se pudo obtener los datos de análisis de frecuencia de máximos, porque la información de máximos instantáneos no estaba disponible.

Tabla 3-6: Análisis de frecuencia de caudales máximos instantáneos para las estaciones hidrológicas (m^3/s) (Fuente: ICE, 2014)

Estación Hidrológica	31-01 Palmar	31-3 Brujo	31-04 Remolino	31-20 Ceibo
Periodo	1962-2010	1968-2010	1968-2010	2006-2012
Tipo de análisis estadístico	Individual Parcial	Individual Parcial	Individual Parcial	Individual Parcial
Distribución	Gen normal	Gen normal	Pearson III	Gen normal
1.01	2071	1460	538	376
1.05	2296	1613	585	399
1.25	2781	1926	749	445
2	3731	2505	1135	517
5	5689	3628	1865	625
10	7509	4624	2427	700
20	9726	5799	3003	772
50	13410	7686	3784	866
100	16877	9410	4388	937
200	21035	11430	5002	1007
300	23830	12764	5365	1049
400	25990	13785	5624	1078
500	27773	14621	5826	1100

3.4. Caracterización del sedimento en los sitios de muestreo.

Para caracterizar las partículas en la barra de sedimentos de fondo de los ríos seleccionados, se realizaron levantamientos de campo de la distribución granulométrica del material, forma y densidad. Todas las pruebas se realizaron a la capa superficial de sedimento que es la que interesa en este estudio. Esta caracterización permitió describir la composición del depósito de sedimento y determinar su relación con el movimiento observado de las partículas.

3.4.1. Granulometría

Para identificar la distribución de los tamaños de partículas de sedimento de fondo se utilizaron 3 metodologías: de Klingeman, la de Wolman y fotográfica, para determinar cuál es la que mejor describe la muestra de sedimento de fondo en superficie. De las tres metodologías, se seleccionó el método fotográfico como la que mejor representa la muestra de sedimento, ya que es la única que permitió incluir todo el rango de diámetros de la muestra. En el Anexo 1 se detallan todas las metodologías utilizadas y se presenta un

cuadro resumen de las limitantes encontradas en campo, que justificaban la elección de este método como el representativo de esta investigación.

El método fotográfico es otra variante del método de Wolman, implica tomar una fotografía de la muestra con una escala determinada. Para realizar este tipo de granulometrías se utilizó una cuadrícula de 1 m x 1 m, la cual se colocó en la barra de sedimento de cada sitio de muestreo y se le capturó una fotografía, tratando de que quedará lo más paralelo posible para disminuir los efectos de deformación que tienen las fotografías por el ángulo y distancia que se capturaron. Utilizando un programa de información geográfica se escaló la fotografía, para eliminar el efecto de deformación. Con ayuda de la malla de referencia se pudo corroborar que el escalado de la fotografía fue bastante preciso, ya que según la escala del programa cada cuadro tenía un error en la medición de alrededor de un 1 mm. (Figura 3-9, c)

Se midió el diámetro medio de cada partícula con las herramientas del mismo programa de información geográfica, el cual se tomó como la dimensión menor que se encontraba en planta. Esta es una limitante de la metodología porque se desconoce si la dimensión visible en la fotografía realmente corresponde al diámetro pasando.

Es importante mencionar que como la fotografía tiene una alta resolución se pudo muestrear partículas menores a 1.0 cm, y se realizó un esfuerzo por medir todas las partículas que se encontraban dentro del cuadro, siempre y cuando la resolución de la fotografía lo permitiera. Esto garantizó no separar la muestra y obtener una curva granulométrica desde gravas finas hasta bloques pequeños. La menor partícula que se midió fue de 2 mm y la mayor de 60 cm. En la Figura 3-9 se puede observar un ejemplo de los resultados obtenidos por el método fotográfico, en (a) se muestra la fotografía capturada en campo, en (b) se muestra la misma fotografía escalada en el programa, y finalmente en (c) se observa el detalle que se pudo obtener en la identificación del diámetro de las partículas. Este método fotográfico permitió muestrear la parte del material grueso que se ubicaba en las barras de sedimento, se desprecia la arena y limo porque este se considera como sedimento en suspensión.

Una de las principales adaptaciones que se tuvo que realizar en el método fotográfico fue calcular los porcentajes pasando de la curva granulométrica por conteo y no por peso. Ya que la distribución de la muestra está compuesta por un alto porcentaje de gravas, y la cantidad de cantos y bloques es mínima, resultados que no se van a reflejar si calcula la

masa de cada partícula en función de su diámetro. Por ejemplo, en la estación Brujo se midió que una sola partícula con un diámetro medio de 20 cm de diámetro pesa 6.80 kg y se ubican 22 partículas con diámetros entre 5 cm y 7 cm para igualar el mismo peso. Por lo tanto, se considera que los diámetros característicos están bien representados al sacar los porcentajes pasando por conteo, porque si se determinan por peso los diámetros característicos estarán sobrestimados.

En la Figura 3-10 se observan las curvas granulométricas y en el Tabla 3-7 los valores del D_{10} , D_{50} , D_{84} y D_{90} de cada uno de los ríos, según el método fotográfico.

Figura 3-9: Corrección de deformación de fotografía para determinar el tamaño de partículas: (a) fotografía capturado en campo. (c) fotografía escalada. (b) Medición del tamaño de partícula en la estación Palmar, las letras indican el diámetro que se identificó y las unidades son cm. (Elaboración propia).



A pesar de la ubicación espacial de los sitios Brujo y Palmar, ambos puntos de la cuenca del río Grande de Térraba muestran una granulometría similar, donde el D_{10} = 0.5 cm, D_{50} = 1.63 y un D_{90} = 6.0 cm.

Las estaciones Remolino, Volcán y Ceibo contienen granulometrías más grandes, el D_{10} ronda entre los 3 cm a 5 cm y el D_{90} entre variaciones entre los 20 a 40 cm, y el d_{50} entre los 8 y 13 cm. En orden Remolino, muestra el material más grueso, luego Ceibo y finalmente Volcán.

Figura 3-10: Curva granulométrica de los sitios de muestreo según el método fotográfico
(Fuente: Elaboración propia)

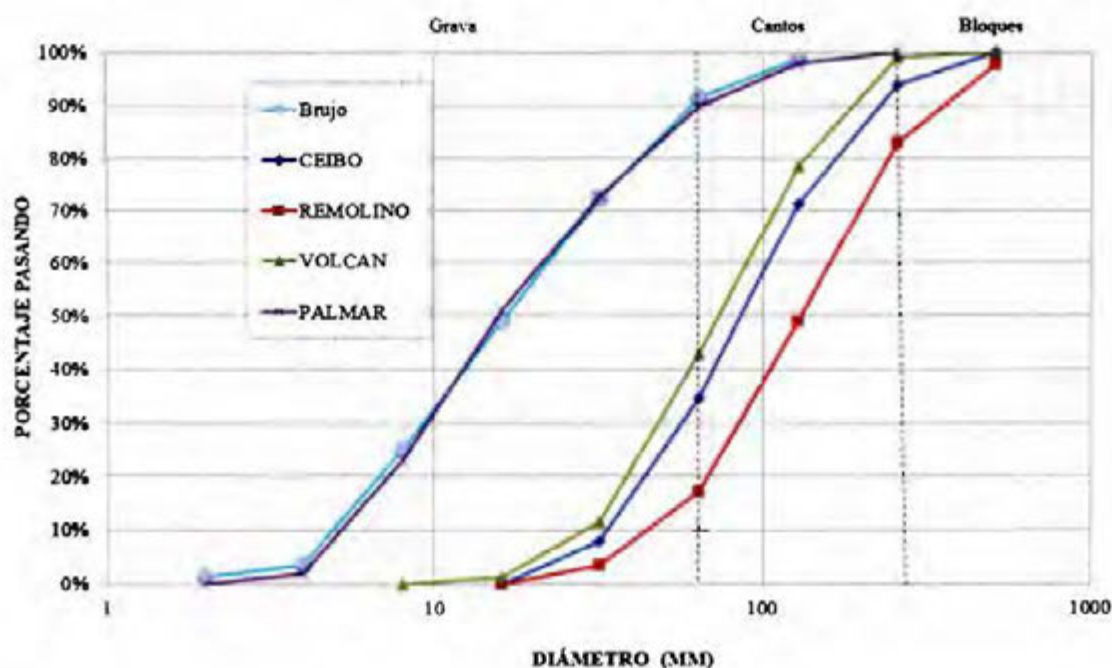


Tabla 3-7: D_{10} , D_{50} , D_{84} y D_{90} de las muestras granulométricas, según el método fotográfico (Fuente: Elaboración propia)

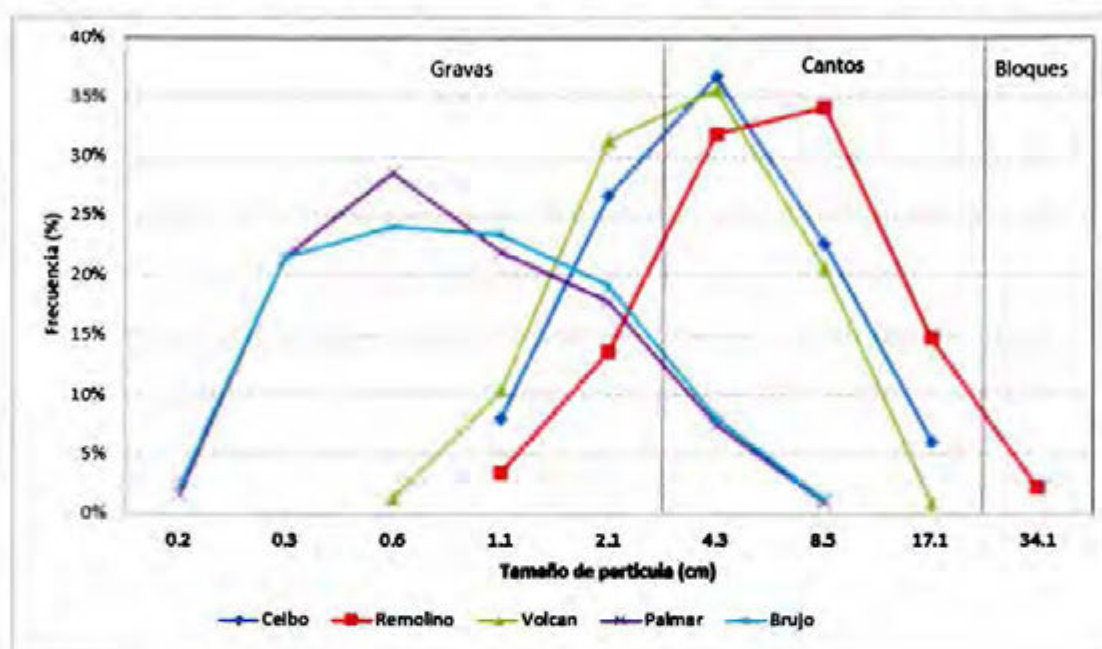
Estación Hidrológica	D_{10} (cm)	D_{50} (cm)	D_{84} (cm)	D_{90} (cm)
Palmar	0.55	1.55	5.05	6.13
Brujo	0.52	1.67	5.14	6.14
Remolino	4.75	13.23	27.12	37.81
Ceibo	3.44	9.08	20.0	23.34
Volcán	2.95	7.67	16.2	19.92

En cuanto a la frecuencia de tamaños Palmar y Brujo prácticamente están compuesto de un 99 % de gravas, y un 1% cantos; mientras que Ceibo y Volcán contienen un promedio de 75% de gravas y 25% de cantos. Muy definido se encuentra el material más grueso en Remolino con 49% de gravas, 49% de cantos y un 2% de bloques. (Figura 3-11)

A nivel general se identificaron los ríos Volcán, Ceibo y General a la altura de la estación hidrológica Remolino, con la distribución de tamaños de partículas más grandes, asociado a la ubicación en las partes intermedias de la cuenca y se clasifican como ríos de montaña. Además, son cuencas que nacen al norte, en la cordillera de Talamanca en las elevaciones

3800 msnm a 2800 msnm, y en menos de 60 km alcanzan alturas menores a los 500 msnm, lo que justifica su alta capacidad de arrastre de material hacia las partes intermedias. Y en cuanto al río General a la altura de la estación hidrológica Brujo y la estación Palmar, ubicada en el río Grande de Térraba, se identifican distribuciones de sedimento más finas, asociado a su ubicación en las partes más bajas de la cuenca y son ríos de planicie.

Figura 3-11. Frecuencia de tamaños de los sitios de muestreo (Elaboración propia)



3.4.2. Forma de las partículas

La forma se refiere a la relación de los tres ejes longitudes de la partícula de sedimento. La forma de las partículas afecta la zona expuesta a las fuerzas de flujo, las fuerzas de arrastre, las fuerzas de elevación y arrastre de partículas, por lo tanto, el transporte y deposición. Dos partículas con la misma masa, pero con diferentes formas pueden responder de manera muy diferente al flujo de agua. (K. Bunte, 2001)

Para determinar la forma de la partícula de las barras de sedimento se le midieron los 3 ejes a todas las partículas que se encontraban en un cuadro de un metro de lado. Para esto se elaboró una escuadra de madera que contenía una escala de medición en cm, y con la ayuda de una escuadra metálica o regla se realizaron las mediciones de las 3 dimensiones de cada partícula. (Figura 3-12) En total se midieron 77 partículas en Palmar, en Brujo 95 partículas, 56 partículas en Remolino, 119 en Celbo y 78 en Volcán.

Figura 3-12: Medición de las 3 dimensiones de las partículas de sedimento, sitio Volcán
(Fuente: Elaboración propia)



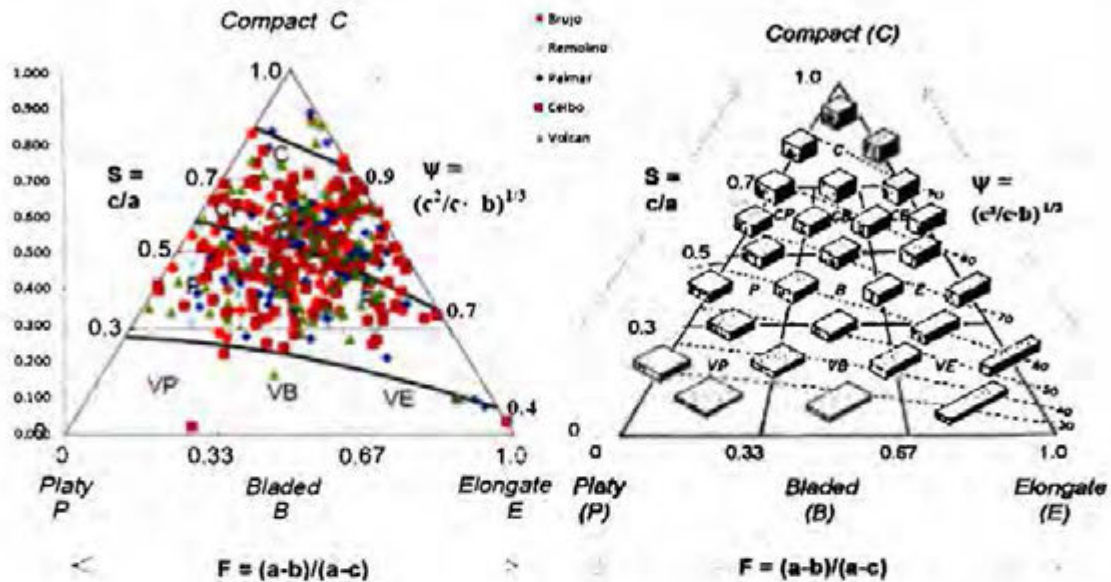
Con los resultados obtenidos se determinaron los parámetros de Sneed y Folk (1985), los cuales clasifican las partículas de sedimento según la forma en compactas, disco, barra o cuchilla. Para esto es necesario calcular el parámetro de F, el cual distingue si la partícula tiene forma de disco, barra o cuchilla; y el parámetro S el cual relaciona que tan compacta es la partícula, ambos se determinan de la siguiente forma:

$$F = \frac{a-b}{a-c} \quad (40)$$

$$S = \frac{c}{a} \quad (41)$$

Donde "a" es la dimensión más corta, "b" es la mediana y "c" la larga. En la Figura 3-13, se observa los resultados obtenidos para los cinco ríos, en el cual se observa que las partículas de sedimento de fondo muestreadas se aglomeran dentro del centro del triángulo, y prácticamente no hay partículas en los extremos superior e inferior. Las partículas tienen formas ovaladas, y se presentan variaciones en sus 3 dimensiones y casi no existen partículas con formas extremadamente compactas, disco, barra o cuchilla.

Figura 3-13: Clasificación de las partículas de cada sitio según el diagrama de forma Sneed y Folk (1985)



Otro parámetro relacionado con la forma de la partícula es el de Krumbein (1941) y el de Pye y Pye (1943), el cual sugiere que el factor de esfericidad se puede determinar de la siguiente forma:

$$\psi = \left(\frac{bc}{a^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (42)$$

Un valor de $\psi = 1$ corresponde a una esfera y cero para partículas extremadamente planas o alargadas. Este factor de esfericidad crece con la distancia de transporte, y el valor promedio de cada río se resume en la Tabla 3-8, del cual obtiene un valor promedio de 0.70 para todos los sitios, lo que se concluye que las partículas han tenido recorridos similares y no se identifica ninguna diferencia de este factor por la ubicación espacial de las cuencas.

El factor de Corey es utilizado para determinar la distancia de recorrido, y se define por la fórmula 2. Una partícula que ha recorrido largas distancias tiene un valor alrededor de 0.7, y partículas de ríos de montaña tienen un valor de 0.5. En la Tabla 3-8, también se resumen los valores promedio para todas las estaciones, los cuales rondan los valores cercanos a 0.6, lo que implica que los recorridos de las partículas son intermedios.

Tabla 3-8. Factores promedio de los parámetros de forma para los sitios de muestreo

Estación	Factor de Krumbein	Factor de Corey	Factor de Sneed y Folk
Palmar	0.69	0.57	0.68
Brujo	0.72	0.59	0.70
Remolino	0.72	0.60	0.71
Ceibo	0.69	0.58	0.69
Volcán	0.71	0.59	0.69

De los resultados obtenidos anteriormente se puede inferir que no hay diferencia entre la forma de la partícula entre los 5 puntos muestreados de la cuenca y no se identifica ninguna diferencia de estos factores por la ubicación espacial de las cuencas. El sedimento de fondo de la cuenca tiene una forma ovalada, con variaciones en sus 3 dimensiones y prácticamente no existen partículas con formas extremadamente compactas, disco, barra o cuchilla. Además, las partículas han tenido recorridos similares y no representan largas distancias.

3.4.3. Densidad de las partículas

Para determinar la densidad del material de las partículas, de cada río se utilizó una balanza digital con capacidad para medir 30 kg. Para determinar el volumen, se calibraron diferentes recipientes de plástico para obtener el volumen de la partícula cuando se sumergía en el recipiente. (Figura 3-14) En la Tabla 3-9 se resumen la estadística obtenida de la prueba realizada, se puede observar que tanto la mediana como el valor promedio ronda entre un rango 2416 a 2669 kg/m³.

Figura 3-14. Medición del volumen y peso del sedimento de fondo en la capa superficial, izquierda Remolino y derecha Palmar. (Fuente: Elaboración propia)



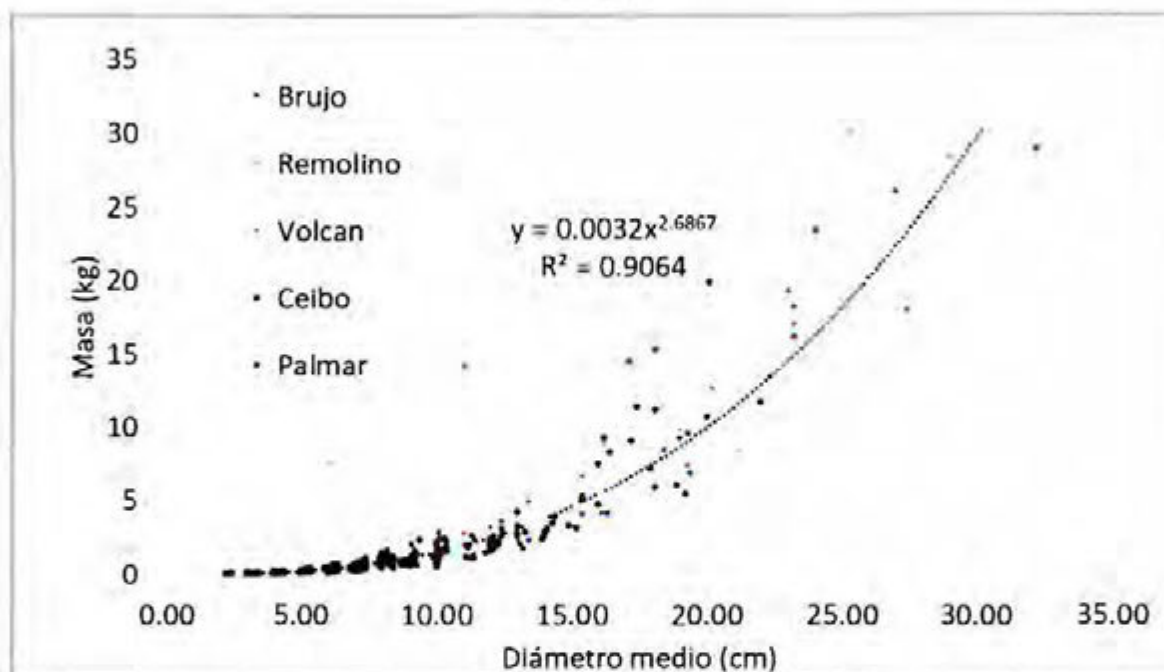
Tabla 3-9. Resultados de la prueba de densidad realizada a los sitios de muestreo

Parámetro	Densidad (kg/m ³)				
	Palmar	Brujo	Remolino	Ceibo	Volcán
Promedio	2669	2663	2437	2565	2552
Max	3920	3680	3304	3853	3390
Min	1456	1650	1733	1091	1190
Percentil 75	2960	2932	2670	2843	2718
Percentil 25	2338	2334	2140	2296	2406
Mediana	2656	2511	2416	2640	2563

En la Figura 3-15 se grafica la masa de la partícula vrs el diámetro medio("b") medido en 3.4.2., del cual se infiere que existe una buena correlación entre estos dos parámetros, lo que justifica que para los ríos analizados el diámetro medio es una medida adecuada para el estudio del movimiento incipiente, ya que a pesar de su forma hay una correlación con su peso. Esta relación ya ha sido sugerida para cauces de montañas formados por gravas. Kristin B y Steven R (2001), mencionan que la ecuación de mejor ajuste de la relación de

la masa vs el diámetro corresponde a una ecuación potencial con la forma $M (kg) = a D(m)^b$, donde el coeficiente "a" varía entre los 0.0024 a 0.0036 y exponente "b" varía entre 2.92 a 3.04. Como se puede observar en la Figura 3-15, los coeficientes de la ecuación de mejor ajuste obtenida para los cinco ríos se encuentran dentro de este rango recomendado: $a = 0.00032$ y $b = 2.6867$.

Figura 3-15. Correlación del diámetro medio de la partícula vs masa (Fuente: Elaboración propia)



3.5. Síntesis de las caracterizaciones físicas de los agentes que controlan el transporte del sedimento en los puntos de muestreo

El río Volcán es la cuenca con menor área que se muestreó en esta investigación, esta tiene un área de 144 km² y nace a la elevación 3120 msnm, en la cordillera de Talamanca, es un afluente del Río General y se clasifica como una cuenca de río de montaña. La estación hidrológica se ubica a la elevación 340 msnm, donde el río tiene una pendiente de 0.025 m/m. A este punto se delimita una cuenca alargada donde el río recorre 65 km, y registra un tiempo de concentración de menos de una hora. Tiene una cobertura compuesta por 50% de usos no forestales y 47 % de usos forestales, es la cuenca más conservada a

nivel de cobertura forestal. En cuanto a su régimen de lluvia se registra una precipitación promedio anual de 3219 mm, un caudal promedio anual de 14 m³/s, lo que representa una de las producciones más altas dentro de las cuencas en estudio (95 l/s/km²). En cuanto al material disponible en la barra de sedimentos se identificó que está compuesto por 75% grava y 25% de cantos, en los cuadros muestreados sí se registraron bloques en porcentajes muy pequeños, para un D₅₀ de 7.67 cm y una densidad promedio de 2550 kg/m³.

El río Ceibo es la segunda cuenca con menor área muestreada, esta tiene un área de 284 km² y nace a la elevación 3020 msnm, en la cordillera de Talamanca y es un afluente del Río General. La estación hidrológica se ubica a la elevación 340 msnm, donde el río tiene una pendiente de 0.003 m/m. A este punto se forma una cuenca con una forma alargada donde el río recorre 28 km. Se le estima un tiempo de concentración de un poco más de una hora y la cobertura de la cuenca está compuesta por un 25% de usos forestales y 70 % de usos no forestales. En cuanto a su régimen de lluvia se estima que llueve en promedio alrededor de 2854 mm al año. Su caudal promedio anual es de 29 m³/s, una de las producciones más altas dentro de las cuencas en estudio (103 l/s/km²). El material disponible en la barra de sedimentos se identificó que está compuesto por 75% gravas y 25% de cantos, en los cuadros muestreados sí se registraron bloques, pero en porcentajes muy pequeños, para un D₅₀ de 9.08 cm y una densidad promedio de 2565 kg/m³.

El río General, a la altura de la estación hidrológica Remolino, define una cuenca con área de 1076 km², nace a la elevación 3820 msnm, en la cordillera de Talamanca y se ubica aguas arriba de la confluencia de los Ríos Ceibo y Volcán. Esta se ubica a la elevación 330 msnm y el río tiene una pendiente de 0.006 m/m. A este punto el río General se considera como un río de montaña, formado por una cuenca alargada donde el río recorre 70 km. Se le estima un tiempo de concentración de más de 3 horas y su cobertura está compuesta por 38% de usos no forestales, 45 % de usos forestales y 16% de plantaciones de café. En la cuenca se registra una precipitación promedio de 3100 mm, un caudal promedio anual de 83 m³/s, lo que representa una de producción de 77 l/s/km². En cuanto al material disponible en la barra de sedimentos se identificó el material más grueso compuesto por 17% gravas, 66% de cantos y 17% de bloques, para un D₅₀ de 13.23 cm y una densidad promedio de 2437 kg/m³.

A la altura de la estación hidrológica Brujo, se ubica en el Río General, sobre el mismo se define una cuenca con un área de 2401 km². El río nace a la elevación 3820 msnm, en la cordillera de Talamanca, y se ubica aguas abajo de la confluencia de los Ríos Ceibo y Volcán en la elevación 139 msnm, donde el río tiene una pendiente de 0.0015 m/m. A este punto se forma una cuenca alargada donde el río ha recorrido 115 km y se considera de planicie. Se estima un tiempo de concentración de más de 7 horas. La cobertura de la cuenca está compuesta por 57% de usos no forestales, 33% de usos forestales y un 10% de plantaciones de café. En la cuenca se registra una precipitación promedio anual de 2851 mm, un caudal promedio anual de 180 m³/s, lo que representa una producción de 75 l/s/km². En cuanto al material disponible de sedimento en la barra de sedimentos se identificó el material menos grueso, compuesto por 90% gravas, 10% de cantos, en los cuadros muestreados si se registraron bloques, pero en porcentajes muy pequeños; para un D₅₀ de 1.67 cm y una densidad promedio de 2663 kg/m³.

La estación hidrológica Palmar, se ubica en el Río Grande de Térraba, y es la cuenca más grande donde se ubicó un punto de muestreo, esta tiene un área de 4674 km² y nace a la elevación 3820 msnm, en la cordillera de Talamanca, se ubica unos 30 km aguas arriba del Océano Pacífico en la elevación 13 msnm y una pendiente de 0.0003 m/m. A este punto se forma una cuenca alargada donde el río recorre 165 km. Se estima que la cuenca tiene un tiempo de concentración de más de 14 horas y 30 minutos. La cobertura de la cuenca está compuesta por 52% de usos no forestales, 39 % de usos forestales y un 8% de plantaciones de café. En la cuenca se registra una precipitación promedio de 2805 mm al año, un caudal promedio anual de 328 m³/s, lo que representa una producción de 69 l/s/km². En cuanto al material disponible de sedimento en la barra de sedimentos se identificó el material menos grueso, muy similar al del Río General, a la altura de la estación Brujo, compuesto por 90% gravas y 10% de cantos, en este caso no se identifican bloques en los cuadros de muestreo; para un D₅₀ de 1.55 cm y una densidad promedio de 2669 kg/m³.

El material disponible en las estaciones hidrológicas se compone de partículas de gravas hasta bloques pequeños. El sedimento de fondo tiene una forma ovalada, con variaciones en sus 3 dimensiones y prácticamente no existen partículas con formas extremadamente compactas, disco, barra o cuchilla. Los ríos Volcán, Ceibo y General a la altura de la estación hidrológica Remolino, contienen la distribución de tamaños de partículas más grandes, asociado a la ubicación en las partes intermedias de la cuenca y se clasifican

como ríos de montaña. En cuanto al río General a la altura de la estación hidrológica Brujo y la estación Palmar, ubicada en el río Grande de Térraba, se identifican distribuciones de sedimento más finas, asociado a su ubicación en las partes más bajas de la cuenca y ríos de planicie. El sedimento tiene una densidad promedio de 2577 kg/m^3 , y existe fuerte correlación entre el diámetro medio de las partículas y su masa.

Capítulo 4: Comportamiento del movimiento incipiente del material del fondo en los cinco puntos de análisis de la cuenca del Río Grande de Térraba

4.1. Trabajo realizado

Para determinar el movimiento incipiente del sedimento de fondo en los ríos, se realizó una campaña de muestreo por medio de una demarcación y observación, durante toda la época lluviosa del año 2014. En cada barra de sedimento de las estaciones hidrológicas seleccionadas se pintaron cuadros de 2 m de lado, antes de que iniciara la época húmeda (abril-mayo) y en la canícula (julio-agosto).

Por medio de las visitas al sitio, se compiló un registro fotográfico de los cambios ocurridos en el cuadro de sedimentos. La frecuencia de las visitas se realizó aproximadamente cada mes. En cada visita se tomó una fotografía al cuadro de muestreo con la ayuda de una escala, la cual consistió en una cuadrícula con marcas cada 5 cm (Figura 4-1), con el fin de comparar las fotografías iniciales y determinar cuáles partículas de sedimento de fondo habían tenido movimiento. En un principio se visualizó que solo se iba a demarcar un cuadro en cada sitio durante toda la época húmeda, sin embargo, una vez que inició la canícula se observó que en la muestra solo permanecían las partículas de mayor tamaño, obteniéndose el resultado deseado antes de lo esperado, por lo que se decidió volver a demarcar otro cuadro con el fin obtener más datos.

En la Figura 4-1 se esquematiza el procedimiento que se realizó en cada uno de los ríos. Con la ayuda de la cinta métrica se delimitaba el cuadro a pintar, luego con pintura en aerosol se demarcaban todas las partículas de sedimento que había en el interior, se colocaba la escala encima del sedimento y se capturaba la muestra por medio de fotografías, se intentaba que fueran los más paralelo para disminuir el efecto de profundidad de la cámara. Al paso de aproximadamente un mes se realizaba una visita al sitio y se fotografiaba nuevamente el cuadro de sedimentos, se utilizaba la escala para no perder la referencia de los tamaños. Luego con ayuda de sistemas de información geográfica se escalaron las fotografías iniciales para determinar los diámetros de las partículas de la muestra, se comparan las fotos de cada una de las visitas y se identificaron las partículas que desaparecieron del cuadro inicial.

Figura 4-1. Medición del movimiento incipiente del sedimento de fondo de los ríos a) Delimitación el cuadro de 2 m de lado con ayuda de la cinta métrica y cinta adhesiva en la estación hidrológica Remolino. b) demarcado de las piedras dentro del cuadro por medio de pintura de aerosol, estación Remolino. c) Colocación de la escala encima de la muestra, Estación Palmar d) Captación de fotografía lo más paralela posible para disminuir el efecto de profundidad de las fotografías. d) escalado de fotografías de la muestra inicial y medición de los diámetros medios de partículas. e) Identificación de las partículas que tuvieron movimiento. (Fuente: elaboración propia)

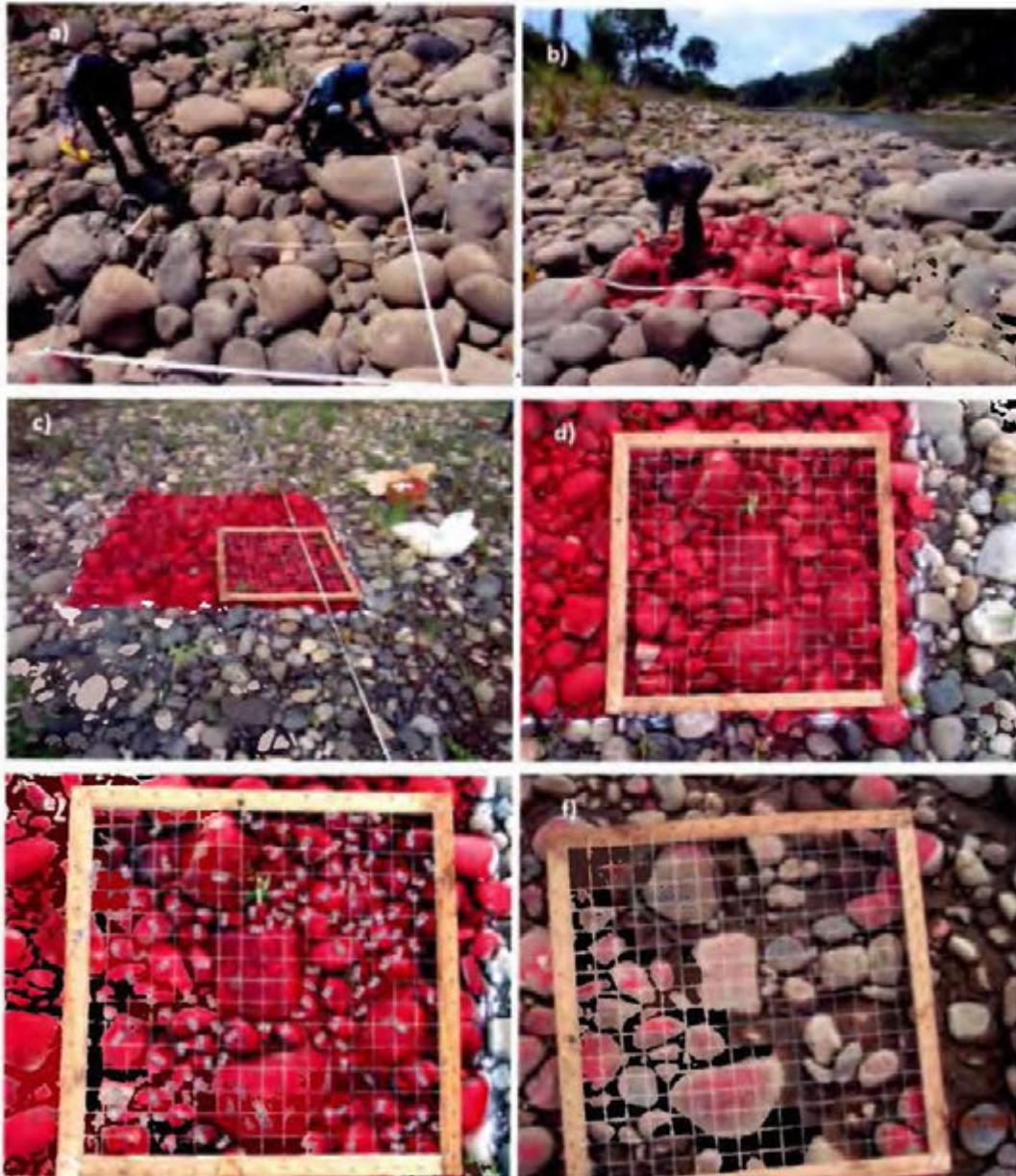


Tabla 4-1. Recopilación de las actividades realizadas durante el periodo de muestreo (Fuente: Elaboración propia)

Fecha de la visita	Palmar		Brujo		Remolino	Ceibo		Volcán		
	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	
2014	27-mar				Demarcado			Demarcado		
	09-abr					Demarcado				
	02-may	Demarcado		Demarcado						
	15-may			Observación nula (río crecido)	Observación	Observación	Observación	Observación (capa agua)		
	19-jun	Observación nula (río crecido)		Observación		Observación				
	26-jun				Observación nula (río crecido)			Observación (capa agua)		
	17-jul	Observación		Observación	Demarcado	Observación (capa agua)	Observación	Demarcado	Observación (capa agua)	
	13-ago	Observación nula (río crecido)	Demarcado		Observación		Observación		Observación nula (río crecido)	Demarcado
	03-sep		Observación	Observación	Observación		Observación		Observación	
	01-oct						Observación (capa agua)		Observación (capa agua)	
	06-nov	Observación	Observación nula (río crecido)		Observación nula (río crecido)					Observación
	07-dic	Observación	Observación							
16-dic			Observación	Observación		Observación	Observación	Observación	Observación	
28-abril 2015					Observación					

Este proceso se repitió en cada una de las estaciones hidrológicas. En la Tabla 4-1 se recapitula la cronología de visitas para cada sitio, cuál fue la actividad que se realizó y si se observó o no las partículas. Se realizaron entre 7 a 8 visitas en cada uno de las estaciones hidrológicas, se demarcaron dos cuadros uno al principio de la época húmeda (abril-mayo) y otro en la canícula (julio-agosto), en algunas visitas no se pudo observar la muestra porque el río estaba crecido o tenía una capa delgada de agua sobre la muestra.

4.2. Análisis de los registros fotográficos

Para determinar el movimiento obtenido en campo de las partículas de sedimento, se realizó un análisis fotográfico detallado de cada uno de los cuadros. Se escalaron las fotos iniciales de la muestra, para determinar los diámetros de las partículas mediante el uso de los sistemas de información geográfica. Una vez se tenían todos los diámetros identificados dentro del cuadro, se iniciaba el análisis de fotos, el cual consistía en utilizar las fotos de las visitas posteriores al demarcado, y empezar a identificar cuáles partículas aún se encontraban en la misma posición dentro del cuadro.

De esta forma se identificó las partículas de sedimento que fueron sometidas a esfuerzos cortantes superiores a su umbral de movimiento. Como era de esperarse por la aleatoriedad del fenómeno, conforme aumenta el diámetro disminuían la cantidad de partículas que tenían movimiento, y no se identifica un umbral claro, al ser un fenómeno estocástico. Para facilitar la descripción de esta zona de aleatoriedad, se decidió llamarla como "zona de transición", la cual está limitada por la menor partícula de sedimento que no tuvo movimiento y la mayor partícula de sedimento que tuvo movimiento. Al grupo de partículas ubicadas por debajo de la zona de transición se le llamo "zona con movimiento" y al grupo de partículas ubicadas por encima de la zona de transición se llamó como la "zona sin movimiento".

Dependiendo del tipo del río se observaron resultados distintos, los cuales se describen a continuación. En el Anexo 2 se hace una recopilación fotográfica de lo que se identificó en cada una de las visitas a los ríos.

4.2.1. Volcán

a) Cuadro 1

El Cuadro 1, en Volcán se pintó aguas arriba de la estación hidrológica en las coordenadas CRTM05 562957-1014741, el 27 de marzo del 2014, en una barra de sedimento en la margen izquierda del río, aguas arriba de la estación hidrológica. En este, se identificaron 233 partículas de sedimento de fondo, distribuidas en 43% de gravas, 56% cantos y 1% de bloques pequeños.

En la segunda visita que se realizó a este Cuadro (15 mayo 2014) prácticamente ya todas las partículas habían tenido movimiento, como la muestra estaba con una capa de agua no fue posible identificar el diámetro de las partículas (Figura 4-2). Finalmente, el 17 de julio se pudo identificar que de 233 partículas de sedimento entre los 1.4 cm hasta los 34.4 cm, únicamente la partícula de 34.4 cm permaneció en el sitio. Aguas abajo del sitio a unos 25 m fueron encontradas varias partículas, evidenciando su movimiento.

Figura 4-2. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Volcán, entre abril y mayo 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro, derecha, observación de la muestra mayo 2014)



b) Cuadro 2

El Cuadro 2, se demarcó el 13 de agosto a unos 30 m aguas arriba del Cuadro 1, en las coordenadas CRTM05 562937-10146718. En este Cuadro 2 se identificaron 272 partículas, compuestas por 1% de bloques pequeños, 30% de cantos y 69% de gravas.

En la visita del 03 de setiembre se observa la muestra sin embargo no se identificó algún cambio significativo, solo algunas partículas de gravas tuvieron movimiento. Luego en la visita del 1 de octubre la muestra se encontraba con agua, y las partículas de grava y cantos tuvieron movimiento, esta condición se mantuvo durante la siguiente visita el 6 de noviembre. La última visita se realizó el 16 de diciembre, en donde se encontró que la mayoría de las partículas de sedimento dentro del cuadro habían tenido movimiento. En la Figura 4-3 se muestra la fotografía inicial y final del Cuadro 2 de Volcán.

En la Tabla 4-2 se muestra los resultados obtenidos para el Cuadro 2 en la visita final del periodo húmedo. De las 272 partículas identificadas dentro del cuadro con diámetros desde los 0.57 cm hasta los 30.09 cm, por debajo los 9.39 cm de diámetro todas las partículas tuvieron movimiento (zona con movimiento). Luego se identificó la zona de transición entre los 9.40 cm hasta los 30.09 cm, en la cual, de 44 partículas, solo 17 permanecen en el sitio. Aunque la última partícula permaneció en el sitio, no se pudo considerar dentro la zona sin movimiento, porque no existen partículas superiores a este diámetro que hayan permanecido en él sitio y se consideró más lógico incluirla en la zona de transición. En total se movilizaron el 100% de las gravas, el 72% de los cantos y 2 de los 3 bloques pequeños. Eso representa, el 94% de toda la muestra.

Figura 4-3. Movimiento del sedimento del cuadro 2 en Volcán, entre agosto y diciembre del 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro, derecha, observación de la muestra diciembre 2014)



Tabla 4-2. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 2, Volcán

N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado
1	0.57		233	9.63		253	17.00	Se quedó
2	0.63		234	9.63		254	17.59	Se quedó
3	0.73		235	9.64		255	17.66	
4	0.84		236	9.69		256	18.15	Se quedó
5	0.90		237	10.06		257	19.42	Se quedó
6	0.93		238	10.71		258	20.04	Se quedó
7	0.94		239	11.46		259	20.14	Se quedó
			240	11.78		260	21.49	
...			241	12.13		261	22.31	Se quedó
			242	12.16		262	22.31	
222	8.84		243	12.21		263	22.31	
223	8.86		244	13.27		264	22.31	
224	8.99		245	13.46		265	22.65	
225	9.07		246	13.52		266	23.44	Se quedó
226	9.32		247	13.89		267	23.78	Se quedó
227	9.39		248	14.23	Se quedó	268	24.02	Se quedó
228	9.40	Se quedó	249	14.60	Se quedó	269	24.68	Se quedó
229	9.46		250	15.11	Se quedó	270	26.33	Se quedó
230	9.48		251	15.47		271	26.60	
231	9.49		252	15.55		272	30.09	Se quedó

4.2.2. Ceibo

a) Cuadro 1

En la Figura 4-4 se observa los resultados obtenidos para el Cuadro 1 el cual se pintó el 09 de abril de 2014, en las coordenadas CRTM05 568330 y 1010561, en una barra de sedimentos en la margen izquierda del río Ceibo aguas abajo de la estación hidrológica. En este cuadro se identificaron 154 partículas de sedimento de fondo, compuestas por un 34% de gravas, 59% de cantos y 7% de bloques

La segunda vista se realizó el 15 mayo del 2014, en la cual se encontró que había pasado una creciente que fue capaz de movilizar una gran parte de la muestra, las partículas que quedaron corresponden en su mayoría a bloques pequeños y medianos.

En la Tabla 4-3 se resumen los resultados obtenidos entre la visita 1 y 2 de la muestra, de las 154 partículas identificadas dentro del cuadro, con diámetros desde los 1.85 cm hasta los 35.6 cm, por debajo de los 8.95 cm diámetro todas las partículas tuvieron movimiento. Luego se identificó la zona de transición entre los 8.95 cm y 28.6 cm, en el cual, de 65 partículas, solo 6 permanecen en el sitio. De ahí en adelante se identificó la zona sin movimiento, conformado únicamente por 4 partículas. En total el 90.0% de las partículas de la muestra tuvieron movimiento, de las cuales incluye el 100% de las gravas, 91% de los cantos y 27% de los bloques.

Las siguientes dos visitas del 19 y 17 de julio no se observan cambios significativos, finalmente a finales del periodo húmedo en la visita del 16 de diciembre solo se logra identificar 5 partículas en el cuadro, con diámetros superiores a los 26 cm, clasificados como bloques pequeños.

Figura 4-4. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Ceibo, entre abril y mayo 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro, derecha, observación de la muestra mayo 2014)



Tabla 4-3. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 1, Ceibo

N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado
1	1.85		95	10.31		115	14.95		135	22.04	Se quedó
2	1.90		96	10.50		116	14.95		136	22.04	
3	2.28		97	10.56		117	15.13		137	22.04	
4	2.42		98	10.70		118	15.66		138	22.29	
5	2.55		99	10.74		119	15.75		139	22.88	
			100	11.30	Se quedó	120	15.87		140	23.71	
	...		101	11.59		121	15.94		141	23.80	Se quedó
			102	11.90		122	16.51		142	24.10	
83	8.86		103	11.90		123	17.20		143	24.74	Se quedó
84	8.91		104	11.99		124	17.86		144	25.99	Se quedó
85	8.95	Se quedó	105	12.06		125	18.17		145	26.16	Se quedó
86	9.01		106	12.16		126	19.43		146	26.16	Se quedó
87	9.06		107	12.68		127	19.45		147	26.61	Se quedó
88	9.42		108	12.85		128	19.81	Se quedó	148	26.61	
89	9.57		109	13.00		129	20.11		149	26.61	
90	9.78		110	13.25		130	20.28		150	27.58	
91	9.87		111	13.67		131	20.48	Se quedó	151	28.61	Se quedó
92	10.16		112	13.86		132	21.36		152	34.02	Se quedó
93	10.27		113	14.43		133	21.63		153	35.42	Se quedó
94	10.28		114	14.67		134	22.03		154	35.60	Se quedó

b) Cuadro 2

En Figura 4-5 se observa los resultados obtenidos para el Cuadro 2, el cual se demarcó 5 m aguas abajo del Cuadro 1, en las coordenadas CRTM05 568331 y 1010563. Este cuadro se pintó 17 de julio del 2014, y su distribución granulométrica se caracterizó por estar compuesta de 6% de bloques, 44% de cantos y 50% de gravas.

En las visitas del 13 de agosto y 03 de setiembre, se identifican movimientos de algunas partículas de gravas, luego en la visita del 01 de octubre se observa la muestra con una

capa de agua y no fue posible identificar cuáles partículas habían tenido movimiento. Finalmente, en la última visita del 19 de diciembre se encontró que, de las 125 partículas identificadas dentro del cuadro, con diámetros desde los 0.5 cm hasta los 40.0 cm, todas las partículas debajo de los 23.0 cm (cantos largos) de diámetro tuvieron movimiento (Ver Tabla 4-4.) La zona de transición se dio entre los 23.1 cm y 40.3 cm, en la cual, de 10 partículas solo 5 permanecen en el sitio. En total el 96% de las partículas tuvieron movimiento dentro del rango de gravas y cantos pequeños, únicamente, permaneció un canto largo y 4 bloques pequeños. Muy similar al dato obtenido para el Cuadro 1, a finales del periodo.

Figura 4-5. Movimiento del sedimento del cuadro 2 en Ceibo, entre julio diciembre 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro 2, derecha, observación de la muestra diciembre 2014)



Tabla 4-4. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 2, Ceibo

N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado
1	0.46		116	23.1	Se quedó
2	0.61		117	24.2	
3	0.78		118	24.9	
4	0.92		119	25.7	Se quedó
5	0.97		120	25.8	
6	0.99		121	26.2	Se quedó
...	...		122	27.6	
			123	31.0	Se quedó
114	21.1		124	33.1	
115	21.6		125	40.3	Se quedó

4.2.3. Brujo

a) Cuadro 1

En el Tabla 4.6 y Figura 4.5. se observa los resultados obtenidos para el Cuadro 1, el cual se pintó el 09 de mayo de 2014, en las coordenadas CRTM05 580020 y 1005512, en la barra de sedimentos en la margen izquierda del río General, aguas arriba del puente de Brujo, a unos 400 m aguas de la estación hidrológica. Esta muestra estuvo compuesta por 825 partículas de sedimento de fondo, clasificadas en 89.7% gravas, 10.2% de cantos y menos de 0.1% de bloques.

La primera visita se dio el 15 de mayo pero el río estaba crecido y se logró observar la muestra hasta el 19 de junio. Para este periodo de tiempo se encontró que, de las 825 partículas identificadas dentro del cuadro, con diámetros desde los 0.27 cm hasta los 27.0 cm, todas las partículas por debajo de los 3.17 cm de diámetro (gravas) tuvieron movimiento. La zona de transición se presentó entre 3.24 cm a los 14.89 cm, en la cual 51 partículas de 255 permanecieron en el sitio. La zona sin movimiento se presentó por encima de los 15.28 cm. En total el 92.0% de las partículas de sedimento de la muestra tuvo movimiento, de las cuales se identificaron el 98% de las gravas y el 36% de los cantos que se identificaron en la muestra. En este caso en comparación con Volcán y Ceibo, la muestra es tiene mayor cantidad gravas y el rango donde se presenta la aleatoriedad del fenómeno aumenta considerablemente, tal como se observa en el Tabla 4.6.

Figura 4-6. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Brujo, entre mayo y junio 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro 1, derecha, observación de la muestra junio 2014)



Tabla 4-5. Diámetros de las partículas que tuvieron movimiento en el Cuadro 1, Brujo, entre mayo y junio 2014

N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado
1	0.27		701	5.30					788	9.98	Se quedó
2	0.32		702	5.33	Se quedó	751	6.87		789	10.03	Se quedó
3	0.33		703	5.34		752	6.96	Se quedó	790	10.05	
			704	5.36		753	6.99	Se quedó	791	10.17	
579	3.17		705	5.36		754	7.04	Se quedó	792	10.45	Se quedó
580	3.24	Se quedó	706	5.41	Se quedó	755	7.06	Se quedó	793	10.51	
581	3.25		707	5.45		756	7.15	Se quedó	794	10.53	Se quedó
			708	5.45		757	7.17		795	10.71	Se quedó
595	3.50		709	5.46		758	7.21	Se quedó	796	10.72	Se quedó
596	3.50	Se quedó	710	5.46	Se quedó	759	7.26		797	10.78	
597	3.53		711	5.49		760	7.32	Se quedó	798	10.84	Se quedó
						761			799	10.90	
630	3.97		717	5.61		762	7.43	Se quedó	800	10.92	
631	3.98	Se quedó	718	5.63	Se quedó	763	7.52		801	11.07	Se quedó
632	3.98		719	5.76		764	7.64		802	11.57	Se quedó
			720	5.81		765	7.64	Se quedó	803	11.67	Se quedó
639	4.10		721	5.87	Se quedó	766	7.69		804	12.06	Se quedó
640	4.11	Se quedó	722	5.87		767	7.82	Se quedó	805	12.24	Se quedó
641	4.15		723	5.89		768	7.90		806	12.55	Se quedó
			724	5.91	Se quedó	769	7.91		807	12.71	Se quedó
652	4.37		725	5.93	Se quedó	770	7.92		808	13.92	
653	4.40	Se quedó	726	5.94	Se quedó	771	7.95		809	13.96	Se quedó
654	4.40		727	5.95		772	7.96		810	14.20	Se quedó
			728	5.96		773	8.11		811	14.49	
673	4.77		729	6.05		774	8.20	Se quedó	812	14.89	
674	4.78	Se quedó	730	6.07		775	8.21		813	15.28	Se quedó
675	4.80		731	6.18		776	8.27		814	15.48	Se quedó
676	4.85		732	6.20	Se quedó	777	8.57		815	16.51	Se quedó
677	4.86	Se quedó	733	6.23		778	8.61		816	16.85	Se quedó
678	4.86		734	6.26		779	9.23		817	18.12	Se quedó
679	4.86		735	6.28		780	9.26	Se quedó	818	19.39	Se quedó
680	4.87	Se quedó	736	6.29		781	9.27	Se quedó	819	19.70	Se quedó
681	4.90		737	6.34		782	9.43		820	21.59	Se quedó
			738	6.34		783	9.69	Se quedó	821	23.31	Se quedó
691	5.15		739	6.35		784	9.70		822	23.84	Se quedó
692	5.19	Se quedó	740	6.36	Se quedó	785	9.70	Se quedó	823	24.94	Se quedó
693	5.23		741	6.43		786	9.91		824	25.34	Se quedó
			742	6.43		787	9.97	Se quedó	825	26.89	Se quedó

b) Cuadro 2

El cuadro 2 de Brujo se demarcó aguas arriba del cuadro 1, en las coordenadas CRTM005 579991 y 1005512, el 17 de julio del 2014. A esta altura de la época húmeda el sedimento fino que arrastra el río es depositado en la barra de sedimento y cubre gran parte de la grava de la muestra, por lo tanto, la cantidad de partículas de grava en la muestra disminuyó, se identificaron 168 partículas, compuestas por 64.3% de gravas, 32.7% de cantos y 3% de bloques. De las 157 partículas entre los 0.90 cm y 33.66 cm, la zona con movimiento se presentó por debajo de los 13.70 cm, la zona de transición se identificó entre los 13.96 cm y 27.68 cm, y por encima de los 30.40 cm ninguna partícula tuvo movimiento. En total el 94.0% de la muestra tuvo movimiento, 100% de las gravas, 80% cantos, y 20% de los bloques pequeños. (Tabla 4-6)

Figura 4-7. Movimiento del sedimento del cuadro 2 en Brujo, entre julio y diciembre 2014 (Izquierda, demarcado del cuadro 2, derecha, observación de la muestra)



Tabla 4-6. Diámetros de las partículas que tuvieron movimiento en el Cuadro 2 en Brujo, entre julio y diciembre 2014.

N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado
1	0.90		156	16.36	
2	1.21		157	17.55	
3	1.22		158	19.22	Se quedó
4	1.24		159	19.68	
...			160	19.69	
147	12.64		161	19.87	
148	12.76		162	20.51	
149	13.23		163	21.97	Se quedó
150	13.70		164	27.68	
151	13.96	Se quedó	165	30.40	Se quedó
152	14.15	Se quedó	166	32.21	Se quedó
153	14.15	Se quedó	167	32.49	Se quedó
154	14.22	Se quedó	168	33.66	Se quedó
155	15.14				

4.2.4. Palmar

a) Cuadro 1

En el Tabla 4-7 y Figura 4-8. se observa los resultados obtenidos para el Cuadro 1, el cual se pintó el 02 de mayo de 2014. Este cuadro se demarcó en la margen derecha del río Grande de Térraba, en una barra de sedimento aguas arriba del puente, en las coordenadas CRTM05 559848 y 990563. El cuadro estuvo compuesto por 1249 partículas, donde 90% corresponde a gravas y 10% de cantos.

En la visita del 19 Junio no se pudo observar el Cuadro 1, porque el río se encontraba crecido. En la visita del 17 de julio se encontró que, de las 1249 partículas identificadas dentro del cuadro todas las partículas por debajo de los 2.14 cm de diámetro tuvieron movimiento y luego hasta los 12.74 cm se da la zona de transición. Por encima de los 12.74 cm se presenta la zona sin movimiento (cantos pequeños).

En total el 90.0% de la muestra tuvo movimiento, de las cuales se movilizó el 95.0% de las gravas y un 35 % de los cantos. En este caso es muy similar a Brujo, la muestra es mayor y el rango donde se presenta la aleatoriedad del fenómeno aumenta considerablemente. Al final de todo el periodo húmedo en este cuadro solo permanecieron 2 cantos largos.

Figura 4-8. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Palmar, entre mayo y julio (Izquierda, demarcado del cuadro 1, derecha, observación de la muestra julio 2014)



Tabla 4-7. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 1, Palmar, entre mayo y julio del 2014

N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado	N°	Diámetro (cm)	Estado
1	0.212		1038	4.50		1111	5.99		1182	7.90	Se quedó
2	0.254		1039	4.55		1112	6.01	Se quedó	1183	7.96	Se quedó
3	0.257		1040	4.56		1113	6.03	Se quedó	1184	7.97	Se quedó
			1041	4.56	Se quedó	1114	6.04	Se quedó	1185	7.97	Se quedó
			1042	4.58		1115	6.11	Se quedó	1186	8.03	Se quedó
754	2.14	Se quedó	1043	4.59		1116	6.12		1187	8.03	
755	2.17		1044	4.60		1117	6.15		1188	8.17	Se quedó
			1045	4.61		1118	6.17		1189	8.18	
861	2.85		1046	4.65	Se quedó	1119	6.18	Se quedó	1190	8.18	
862	2.86	Se quedó	1047	4.70		1120	6.19		1191	8.23	Se quedó
			1048	4.70		1121	6.19		1192	8.24	
871	2.93		1049	4.73		1122	6.22		1193	8.26	Se quedó
872	2.93	Se quedó	1050	4.74		1123	6.25		1194	8.35	
			1051	4.76		1124	6.27	Se quedó	1195	8.42	Se quedó
873	2.94		1052	4.78		1125	6.32	Se quedó	1196	8.43	Se quedó
930	3.32		1053	4.82	Se quedó	1126	6.35		1197	8.44	Se quedó
931	3.33	Se quedó	1054	4.87		1127	6.35		1198	8.46	Se quedó
932	3.35		1055	4.90		1128	6.36		1199	8.46	Se quedó
			1056	4.90	Se quedó	1129	6.38	Se quedó	1200	8.46	Se quedó
945	3.45		1057	4.92		1130	6.38	Se quedó	1201	8.46	Se quedó
946	3.45	Se quedó	1058	4.93	Se quedó	1131	6.41	Se quedó	1202	8.65	
947	3.46		1059	4.96		1132	6.41		1203	8.66	Se quedó
			1060	5.00		1133	6.42	Se quedó	1204	8.73	Se quedó
958	3.55		1061	5.02		1134	6.44		1205	8.82	
959	3.56	Se quedó	1062	5.07		1135	6.47		1206	8.88	Se quedó
960	3.59		1063	5.10		1136	6.50		1207	8.95	Se quedó
			1064	5.12		1137	6.50	Se quedó	1208	9.12	Se quedó
967	3.68		1065	5.12	Se quedó	1138	6.51	Se quedó	1209	9.39	
968	3.68	Se quedó	1066	5.12	Se quedó	1139	6.51	Se quedó	1210	9.52	Se quedó
969	3.69		1067	5.15	Se quedó	1140	6.57	Se quedó	1211	9.64	
970	3.70		1068	5.18	Se quedó	1141	6.61	Se quedó	1212	9.73	Se quedó
971	3.72		1069	5.18		1142	6.61		1213	9.74	Se quedó
972	3.73		1070	5.18		1143	6.63	Se quedó	1214	9.78	Se quedó

973	3.75	Se quedó	1071	5.19		1144	6.63	Se quedó	1215	10.00	Se quedó
974	3.76		1072	5.20		1145	6.66	Se quedó	1216	10.07	
			1073	5.21		1146	6.69		1217	10.09	Se quedó
1006	4.13		1074	5.22		1147	6.69		1218	10.12	Se quedó
1007	4.14	Se quedó	1075	5.22	Se quedó	1148	6.70	Se quedó	1219	10.37	
1008	4.14		1076	5.24		1149	6.71		1220	10.46	Se quedó
1009	4.16		1077	5.27	Se quedó	1150	6.78		1221	10.62	Se quedó
1010	4.17		1078	5.27		1151	6.84	Se quedó	1222	10.67	Se quedó
1011	4.17					1152	6.91		1223	10.77	
1012	4.17		1085	5.48					1224	10.94	
1013	4.18		1086	5.49	Se quedó	1157	7.01		1225	11.26	
1014	4.18	Se quedó	1087	5.50	Se quedó	1158	7.02	Se quedó	1226	11.36	Se quedó
1015	4.18		1088	5.51	Se quedó	1159	7.09	Se quedó	1227	11.37	Se quedó
1016	4.19		1089	5.52		1160	7.13	Se quedó	1228	11.38	Se quedó
1017	4.19		1090	5.55	Se quedó	1161	7.14	Se quedó	1229	11.43	Se quedó
1018	4.20	Se quedó	1091	5.57		1162	7.16		1230	11.45	Se quedó
1019	4.20		1092	5.57		1163	7.25	Se quedó	1231	11.69	
1020	4.21		1093	5.61		1164	7.27		1232	11.71	Se quedó
1021	4.22		1094	5.62		1165	7.34	Se quedó	1233	11.81	Se quedó
1022	4.25	Se quedó	1095	5.65		1166	7.41	Se quedó	1234	12.18	Se quedó
1023	4.25		1096	5.66	Se quedó	1167	7.41		1235	12.64	Se quedó
1024	4.26		1097	5.68	Se quedó	1168	7.41	Se quedó	1236	12.71	
1025	4.29		1098	5.69		1169	7.42		1237	12.74	Se quedó
1026	4.31		1099	5.77		1170	7.49		1238	12.97	Se quedó
1027	4.41	Se quedó	1100	5.79		1171	7.50	Se quedó	1239	13.13	Se quedó
1028	4.42		1101	5.79	Se quedó	1172	7.62	Se quedó	1240	13.33	Se quedó
1029	4.43		1102	5.81		1173	7.63	Se quedó	1241	13.35	Se quedó
1030	4.44		1103	5.82	Se quedó	1174	7.65	Se quedó	1242	13.41	Se quedó
1031	4.44		1104	5.85		1175	7.65	Se quedó	1243	14.23	Se quedó
1032	4.46		1105	5.87	Se quedó	1176	7.74	Se quedó	1244	14.73	Se quedó
1033	4.46	Se quedó	1106	5.88		1177	7.76	Se quedó	1245	15.51	Se quedó
1034	4.47	Se quedó	1107	5.91	Se quedó	1178	7.81	Se quedó	1246	15.93	Se quedó
1035	4.47		1108	5.91		1179	7.85	Se quedó	1247	17.99	Se quedó
1036	4.47		1109	5.92	Se quedó	1180	7.86		1248	19.40	Se quedó
1037	4.48		1110	5.97		1181	7.88	Se quedó	1249	25.25	Se quedó

b) Cuadro 2

En la Tabla 4-8 y Figura 4-10. se observa los resultados obtenidos para el cuadro 2, el cual se demarcó 50 m aguas abajo del cuadro 1, en las coordenadas CRTM 05 559635 y 990563. Dentro del cuadro de muestreo se identificaron 238 partículas de sedimento de fondo, con diámetros desde los 1 cm hasta los 19.3 cm, 76% son gravas y 24% cantos. Al igual que en Brujo, en el cuadro 2 disminuyó la cantidad de gravas, porque estaban cubiertos por sedimento fino y no fue posible identificarlo en la muestra. Esto se muestra en la Figura 4-9, donde se compara una foto del Cuadro 1 con el Cuadro 2, cuando fueron demarcados. Muy similar a lo que se observó en Brujo, lo cual se le asocia a la capacidad de arrastre de sedimento en suspensión de la cuenca.

Figura 4-9. Disminución de la cantidad de gravas que se observan superficialmente sobre el río debido al depósito de sedimento en suspensión durante la época húmeda, izquierda Cuadro 2 y derecha Cuadro 1, en el río Palmar.



Este cuadro se pintó 13 de agosto del 2014, y se observó el 3 de setiembre, pero no se identificó ningún movimiento significativo, luego el 6 de noviembre el río estaba crecido y no se pudo observar, finalmente el 07 de diciembre se vio el sitio. Todas las partículas por debajo de los 8.18 cm de diámetro tuvieron movimiento; entre los 8.18 cm hasta los 17.45 cm se presenta la zona de transición en donde 13 de 37 partículas tuvieron movimiento. Por encima de los 18.38 cm se identifica la zona sin movimiento. En total el 93.7% de las partículas tuvieron movimiento, de los cuales se fueron el 100% de las gravas y 56% de los cantos.

Figura 4-10. Movimiento del sedimento del cuadro 2 en Palmar, entre agosto y diciembre (Izquierda, demarcado del cuadro 1, derecha, observación de la muestra diciembre 2014)



Tabla 4-8. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 2, Palmar, entre agosto y diciembre 2014

Nº	Diámetro (cm)	Estado	Nº	Diámetro (cm)	Estado
1	1.02		229	10.38	
2	1.03		230	10.57	
3	1.11		231	10.74	
			232	10.74	Se quedó
			233	11.08	Se quedó
209	7.51		234	11.16	
210	7.60		235	11.23	
211	7.67		236	11.35	Se quedó
212	7.69		237	11.44	
213	8.18	Se quedó	238	11.78	
214	8.38		239	11.97	
215	8.40	Se quedó	240	12.09	
216	8.45		241	12.40	
217	8.52		242	12.47	Se quedó
218	8.56		243	12.94	Se quedó
219	8.85		244	13.02	
220	8.93		245	13.15	Se quedó
221	9.45		246	14.45	Se quedó
222	9.65		247	15.73	
223	9.67		248	15.96	Se quedó
224	9.78	Se quedó	249	17.43	Se quedó
225	9.79		250	17.45	
226	9.81		251	18.38	Se quedó
227	10.22		252	18.95	Se quedó
228	10.33	Se quedó	253	19.58	Se quedó

4.2.5. Remolino

En la Tabla 4-9 y Figura 4-11 se observa los resultados obtenidos para el Cuadro 1, el cual se demarcó en las coordenadas CRTM05 550759 y 1019763, se pintó el 27 de marzo del 2014, aguas arriba de la estación Remolino sobre la margen izquierda en una barra de sedimento.

Esta muestra tuvo la particularidad que cuando se demarcó coincidió con uno de los caudales mínimos del año. Durante la época de muestreo en las visitas realizadas el caudal nunca regreso a este mismo nivel y la muestra se mantuvo sumergida, por lo tanto, nunca se pudo identificar que había pasado con esta muestra de sedimento de fondo, incluso en la visita de diciembre no se pudo identificar. Finalmente, hasta 28 de abril del 2015, se ubica el cuadro y se identifican algunas partículas permanecieron en el sitio, y no tuvieron movimiento.

Se encontró que, de las 88 partículas identificadas dentro del cuadro un 17% son gravas, un 66% cantos y 17% son bloques, con diámetros desde los 2.36 cm hasta los 58.4 cm. Todas las partículas por debajo de los 29.10 cm de diámetro tuvieron movimiento, la zona de transición se identificó entre los 34.0 cm y 42.0 cm, donde permanecieron 5 de 7 bloques. La zona sin movimiento se presentó por encima de los 51.9 cm. En total el 94.0% de la muestra tuvo movimiento. En Remolino no se pintó ningún cuadro 2, ya que en la barra de sedimento muestreada siempre estuvo cubierta de agua y no se encontró un lugar óptimo para demarcar el Cuadro 2.

Figura 4-11. Movimiento del sedimento del cuadro 1 en Remolino, entre marzo 2014 y abril 2015 (Izquierda, demarcado del cuadro 1, derecha, observación de la muestra abril 2015)



Tabla 4-9. Diámetros de las muestras que tuvieron movimiento en el Cuadro 1, Remolino, entre marzo 2014 y abril 2015

N°	Diámetro (cm)	Estado
1	2.4	
2	2.4	
3	3.0	
77	28.4	
78	28.9	
79	29.1	
80	34.0	Se quedó
81	36.7	Se quedó
82	36.7	
83	37.0	
84	37.0	
85	40.8	Se quedó
86	42.0	
87	51.9	Se quedó
88	58.4	Se quedó

4.3. Crecientes que generaron el movimiento de las partículas.

Se realizó un estudio de los registros de caudales máximos instantáneos de cada una de las estaciones hidrológicas para determinar la creciente que generó el movimiento de las partículas durante el periodo de análisis. Esta se definió como la creciente máxima que pasó en el periodo de demarcado y observación y se tenía certeza de las partículas que tuvieron movimiento. En la Tabla 4-10, se muestran las características de estas crecientes: fecha, duración en horas, caudal pico, periodo de retorno y escala máxima registrada para ese caudal pico. En general se registraron caudales pico unitarios entre 1.2 y 2.0 m³/s/km² para las cuencas más pequeñas Volcán y Ceibo, y para Palmar y Brujo caudales unitarios entre 0.2 y 0.8 m³/s/km².

Para el Cuadro 1 en Volcán se seleccionó la creciente con mayor caudal entre mayo y junio 2014, la cual tuvo un caudal pico de 291 m³/s, se presentó el 13 de junio. En el caso del Cuadro 2, se seleccionó la creciente mayor entre agosto y diciembre 2014, ya que para este caso hasta finales del periodo húmedo se logró identificar con certeza las partículas que tuvieron movimiento, la creciente registró un caudal pico de 274 m³/s y se presentó el 17 de setiembre.

En Ceibo para el Cuadro 1, la estación hidrológica tuvo problemas para este periodo y no se registraron los caudales, por lo tanto, no hay dato de creciente. Para el caso del Cuadro 2, se seleccionó la creciente máxima entre julio y diciembre 2014, la cual tuvo un caudal pico de 344 m³/s, se le asocia un periodo de retorno de 1.05 años y ocurrió el 17 de setiembre de 2014.

Para Brujo la creciente máxima que ocurrió en el periodo de observación del Cuadro 1 (mayo a junio) tuvo un caudal pico de 1059 m³/s, ocurrió el 31 de mayo del 2014 y se le asocia un periodo de retorno de un año. Para el Cuadro 2, se seleccionó la creciente mayor entre agosto y diciembre 2014, la cual registró un caudal pico de 1923 m³/s y su periodo de retorno fue de dos años.

En el caso de Palmar para el primer periodo de la época húmeda la creciente máxima del Río Grande de Térraba se dio el 31 junio del 2014, y tuvo un caudal pico de 1086 m³/s al cual se le asocia un año de periodo de retorno. Para el Cuadro 2, la creciente máxima del segundo periodo se presentó el 11 de noviembre del 2014 y registro un caudal pico de 2305 m³/s (1.75 años periodo de retorno).

Para la estación hidrológica Remolino se decidió no extraer la creciente, porque el periodo de observación fue de más de un año, y además existen faltantes de datos en la estación hidrológica, que no permiten identificar con certeza cuál fue la creciente mayor de la época húmeda.

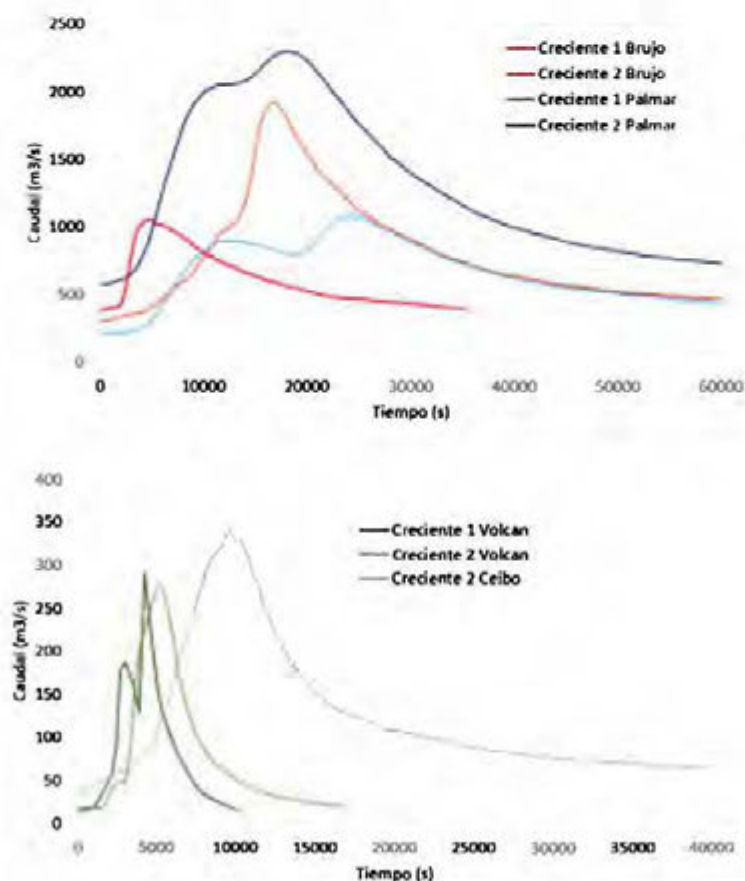
En la

Figura 4-12 se muestran los hidrogramas de las crecientes de la Tabla 4-10. En el caso de Palmar, las crecientes tienen dos picos de caudal asociados a una creciente, lo cual es característico del tamaño y forma de la cuenca, la cual recibe aporte de dos subcuencas muy diferentes entre sí: El General y Coto Brus. Como era de esperarse la creciente del segundo periodo (agosto -noviembre) es mayor que la del primer periodo (mayo-julio) de la época húmeda, asociado al régimen de lluvia de la cuenca. Como excepción se tiene Volcán, con un hidrograma con dos picos de caudal y una creciente mayor en el primer periodo, muy posiblemente esta creciente está asociada a dos tormentas que se presentaron seguidas en la cuenca. Es importante recalcar que todas las crecientes máximas que se presentaron no sobrepasaron un periodo de retorno de 2 años (creciente del caudal formativo de un río), y se le asocia al fenómeno del Niño influyendo en el periodo de muestreo.

Tabla 4-10. Crecientes máximas registradas entre el periodo de las visitas. (Fuente: ICE, 2014)

Estación Hidrológica	Fecha del caudal pico	Duración (horas)	Caudal pico (m ³ /s)	Periodo de Retorno (años)	Escala (m)
Cuadro 1					
Volcán	13-06-2014	3.0	291	Sin Dato	3.79
Ceibo			Sin Dato		
Brujo	31-05-2014	9.83	1059	1.0	4.38
Palmar	31-06-2014	29.3	1086	1.0	3.04
Remolino			Sin Dato		
Cuadro 2					
Volcán	07-11-2014	4.70	274	Sin Dato	3.73
Ceibo	17-09-2014	11.0	344	1.0	3.23
Brujo	31-10-2014	20.3	1923	2.0	5.53
Palmar	01-11-2014	15.25	2305	1.75	4.15

Figura 4-12. Hidrogramas de las crecientes identificadas máximas que generaron el movimiento incipiente de las partículas de sedimento (Fuente: ICE, 2014)



4.4. Análisis de la movilidad de las muestras de sedimentos de fondo

4.4.1. Muestra inicial

La muestra inicial corresponde a todas las partículas muestreadas dentro de los cuadros demarcados en cada uno de las estaciones hidrológicas. La distribución de tamaños que se encontró en los cuadros es muy similar a la obtenida en la caracterización del material que se encontraba en las barras de sedimento, que se describió en el apartado 3.4.1. de este documento. Para los cuadros de Palmar, el tamaño máximo de partículas muestreado fueron cantos largos y para el caso de Volcán, Ceibo, Remolino y Brujo el tamaño máximo de partículas fueron bloques pequeños. El tamaño mínimo de las muestras iniciales se ubicó entre gravas muy finas y grava gruesa. (Tabla 4-11)

Los cuadros de Brujo y Palmar, contienen las granulometrías más finas, compuestas en su mayoría por gravas, entre el 65% al 90%, y la fracción restante corresponden a cantos. En el caso del Cuadro 2 de Brujo sí se identificaron bloques pequeños. Los cuadros de Ceibo y Volcán, estuvieron compuestos entre un 35 a 70% de gravas, 30% a 59% de cantos y entre 1 a 7 % de bloques pequeños. Y bien definido el material más grueso Remolino, con 17% de gravas, 66% de cantos y 17% de bloques.

Tabla 4-11: Frecuencia de tamaños de la muestra inicial (Fuente: Elaboración propia)

Clasificación	Muestra Inicial								
	Volcán		Ceibo		Brujo		Palmar		Remolino
	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1
grava muy fina					1%		2%	0%	0%
grava fina		1%		2%	19%		21%	0%	0%
grava mediana	1%	9%		10%	24%	4%	28%	10%	0%
grava gruesa	10%	27%	8%	10%	26%	20%	22%	30%	3%
grava muy gruesa	31%	32%	26%	26%	20%	40%	18%	36%	14%
cantos pequeños	36%	20%	36%	29%	8%	24%	9%	20%	32%
cantos largos	20%	10%	23%	16%	2%	9%	1%	4%	34%
Bloques pequeños	1%	1%	7%	6%		3%			15%
bloques medianos									2%
Total gravas	43%	69%	34%	50%	90%	64%	90%	76%	17%
Total cantos	56%	30%	59%	45%	10%	33%	10%	24%	66%
Total bloques	1%	1%	7%	6%	0%	3%	0%	0%	17%

En Tabla 4-12 se muestran los diámetros característicos de la muestra inicial, el D_{50} varía entre los 1.6 cm a los 13 cm. Tal como se había mencionado en el Cuadros 2 de Brujo y Palmar, disminuyó la cantidad de gravas, porque estaban cubiertos por sedimento fino y no fue posible identificarlo en la muestra, lo que provocó que los diámetros característicos sean mucho mayores que el Cuadro 1.

Tabla 4-12: Diámetros característicos de la muestra inicial para cada uno de los cuadros demarcados en las barras de sedimento (Fuente: Elaboración propia)

Diámetros (cm)	Volcán		Ceibo		Brujo		Palmar		Remolino
	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1
D10	2.93	1.60	3.38	1.28	0.62	2.43	0.58	1.61	4.62
D16	3.56	1.96	4.01	2.12	0.74	2.72	0.67	1.93	6.33
D30	4.85	2.87	5.63	3.98	1.09	3.53	0.92	2.82	9.36
D50	7.13	3.96	8.32	6.41	1.90	4.76	1.56	3.86	13.05
D84	14.23	9.40	20.20	15.06	5.23	10.14	4.73	8.02	25.74
D90	16.27	13.44	22.70	19.96	6.44	14.02	6.28	10.31	30.59

4.4.2. Fracción movilizada

La fracción movilizada corresponde a todas las partículas del cuadro inicial que tuvieron movimiento. En la Tabla 4-13 se muestran los diámetros característicos de esta fracción movilizada, los cuales son más bajos que los diámetros de la muestra inicial, a excepción de Volcán Cuadro 1, que la muestra movilizada y la fracción movilizada son las mismas. En general para el Cuadro 2 se identificaron diámetros más grandes que en el Cuadro 1, asociado a que en todos los casos la creciente del segundo periodo es más grande y por lo tanto tiene una mayor capacidad de arrastre. Sin embargo, se da la excepción en Volcán, esto se debe a la disponibilidad de material para ser arrastrado y además que la creciente del periodo 1 fue mayor a la del periodo 2, ya que el D_{50} del Cuadro 1 es de 10.4 cm y el del Cuadro 2: $D_{50} = 3.95$ cm.

Tabla 4-13: Diámetros característicos de la fracción movilizada (Fuente: Elaboración propia).

Diámetros (cm)	Volcán		Ceibo		Brujo		Palmar		Remolino
	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1
D10	2.87	1.50	3.38	1.28	0.61	2.37	0.56	1.59	4.59
D16	3.50	1.92	4.01	2.12	0.71	2.67	0.65	1.89	5.85
D30	4.75	2.77	5.63	3.98	1.02	3.47	0.86	2.73	9.13
D50	6.88	3.72	8.32	6.41	1.69	4.69	1.36	3.69	12.67
D84	14.10	8.06	20.20	15.06	4.17	9.33	3.46	6.75	22.07
D90	15.94	9.46	22.70	19.96	5.25	10.27	4.21	8.41	26.59

En la Tabla 4-14 se calculan los porcentajes de movilización que ocurrieron en los Cuadros de muestreos, el cual se calcula como la cantidad de partículas de la fracción movilizada entre la cantidad de partículas de la muestra inicial. En general los ríos Volcán, Ceibo y Remolino, fueron capaces de generar movimiento en el 100% de las gravas, Palmar y Brujo generó movimiento en el 100% de la grava gruesa. Todos los ríos fueron capaces de mover partículas por debajo de los cantos largos y en el caso de Volcán, Ceibo, Remolino y Brujo se dieron movimientos de bloques pequeños, pero en porcentajes bajos. En todos los casos la movilización del sedimento fueron superiores al 90%, lo que indica una alta capacidad de transporte de sedimento entre gravas y bloques en la cuenca.

Tabla 4-14: Porcentajes de movilización de la muestra inicial por tamaño del material de sedimento de fondo. (Fuente: Elaboración propia)

Clasificación del material de sedimento	Volcán		Ceibo		Brujo		Palmar		Remolino
	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1
grava muy fina					100%		100%		
grava fina		100%		100%	100%		100%		
grava mediana	100%	100%		100%	100%	100%	100%	100%	
grava gruesa	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%
grava muy gruesa	100%	100%	100%	100%	88%	100%	80%	100%	100%
cantos pequeños	100%	98%	96%	100%	55%	100%	35%	84%	100%
Cantos largos	98%	46%	86%	95%	18%	60%		27%	100%
bloques pequeños	100%	33%	27%	43%		20%			67%
Total de la muestra	100%	94%	90%	96%	92%	94%	90%	94%	94%

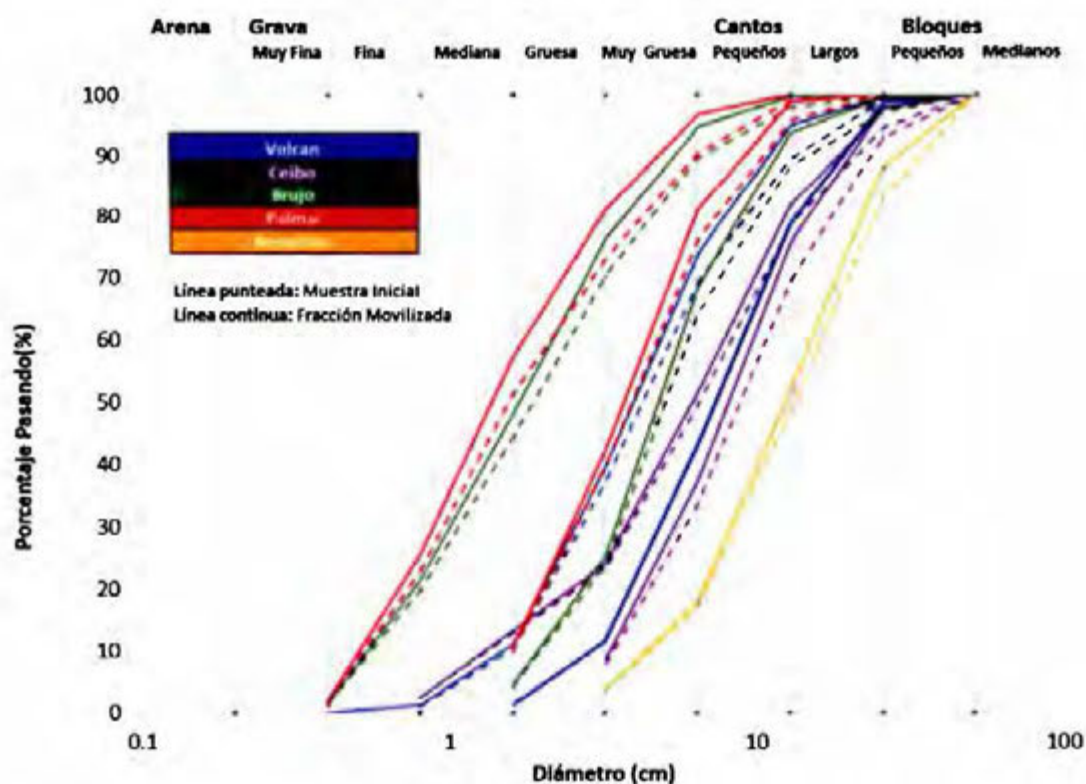
En la Figura 4-13 se grafica la distribución granulométrica de la muestra inicial del sedimento con una línea punteada y la que tuvo movimiento con una línea continua. Los cuadros de sedimento de Volcán están en azul, los de Ceibo en morado, los de Brujo en verde, Palmar en rojo y Remolino en anaranjado; las granulometrías más finas son las de Palmar y las más gruesas en Remolino, nótese que no hay una diferencia significativa entre la muestra inicial y la fracción movilizada, lo que permite concluir que existió un movimiento generalizado de la capa de sedimentos de fondo de los ríos. Los resultados obtenidos indican que el movimiento del sedimento está muy relacionado con la disponibilidad de material, para las crecientes menores de 2 años de periodo de retorno, el cual se le asocia al caudal formativo. Las partículas de sedimento ubicadas en la barra de sedimentos fueron reemplazadas en el primer periodo de lluvia y nuevamente en el segundo periodo de lluvia, lo que implica que existe un reemplazo constante de las partículas del sedimento de los ríos estudiados y hay un equilibrio en las barras de sedimentos. En el registro fotográfico de las visitas se identifican siempre partículas nuevas en los cuadros de muestreo, las cuales no se les realizó ningún tipo de análisis, pero es fácil identificarlas porque corresponden a todas las partículas que no estaban demarcadas con algún color. (Ver Figuras 4.2 a la Figura 4.10).

En el Anexo 3 se adjunta una tabla con los valores de ambas curvas granulométricas.

4.4.3. Fracción No Movilizada

La fracción no movilizada corresponde a las partículas que permanecieron dentro del cuadro y no tuvieron movimiento, esta fracción representa entre el 10% y 1% de la muestra inicial, y consistió en partículas entre gravas muy gruesas y bloques medianos.

Figura 4-13. Distribución granulométrica de la muestra de sedimentos inicial y la fracción movilizada para los cinco puntos estudiados de la Cuenca del Río Grande de Térraba (Fuente: Elaboración propia)



Los Cuadros 1 demarcados en las estaciones hidrológicas de Brujo y Palmar son los que contienen la mayor cantidad de partículas no movilizadas (64 y 130 respectivamente) y las más finas, esto asociado que son los ríos con el material más fino y a que la creciente del periodo 1 fue menor que la del periodo 2. En los cuadros restantes la cantidad de partículas que no tuvieron movimiento no superan las 16 partículas y representan menos del 6% de la muestra inicial, y además se caracterizan por ser partículas con diámetros superiores a los cantos largos. En la Figura 4-14, se grafica la curva granulométrica de muestra inicial y la fracción no movilizada, separadas por el Cuadro 1 y Cuadro 2; no se incluye la curva del Cuadro 1 de la estación hidrológica Volcán porque la fracción no movilizada está compuesta por una sola partícula. La resta de ambas curvas corresponde a la fracción movilizada.

Tabla 4-15: Cantidad de partículas según la clasificación del material de la fracción no movilizada (Fuente: Elaboración propia)

Clasificación del material de sedimento	Fracción No Movilizada								
	Volcán		Ceibo		Brujo		Palmar		Remolino
	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1
grava muy gruesa							5		
cantos pequeños					19		43		
cantos largos		1	2		30		70	8	
bloques pequeños	1	14	5	1	14	6	12	8	
bloque mediano		2	8	4	1	4			5
Total general	1	17	15	5	64	10	130	16	5

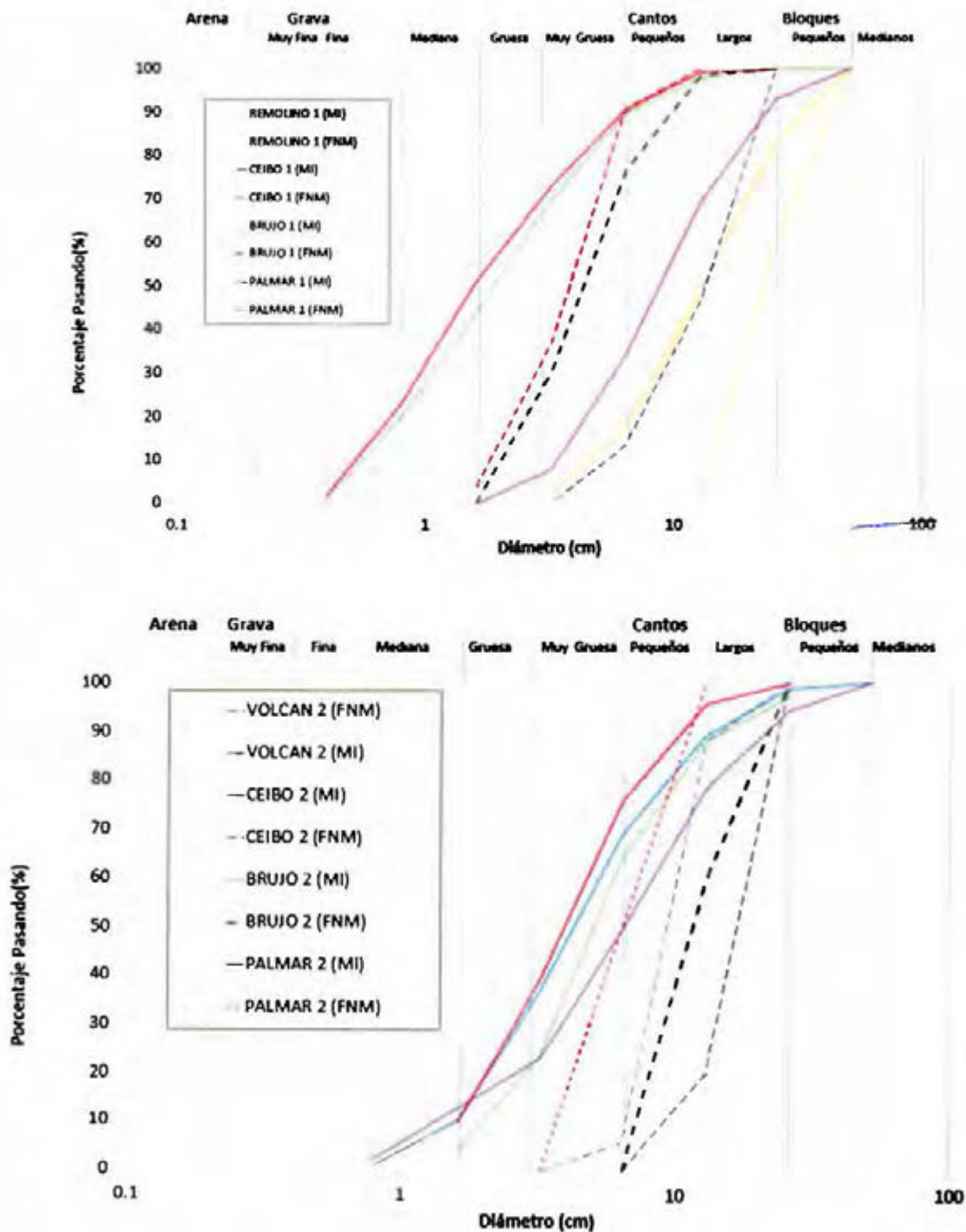
4.4.4. Resumen de los resultados

En la Figura 4-15 se grafican las distribuciones de frecuencia no acumuladas de la muestra inicial, la fracción movilizada y no movilizada, además se incluye la zona de transición y los D_{50} , D_{84} y D_{90} de la muestra inicial. De estos gráficos se observan que el comportamiento del movimiento de los cinco ríos estudiados es muy similar, ya que la distribución de frecuencia de la muestra inicial y la movilizada son asimétricas hacia la izquierda, su punta es elevada (ver coeficientes de curtosis y asimetría en anexo 4) y su rango de dispersión es alto (para todos los casos la desviación estándar toma valores entre 2 y 11, (Ver anexo 4))

Como se puede observar la zona de transición siempre estuvo por encima del D_{50} , y en algunos casos el D_{84} y D_{90} se ubican dentro, mostrando el comportamiento estocástico del fenómeno. El límite superior de la zona de transición siempre fue superior al D_{90} , justificando porque se considera un movimiento generalizado de la capa de sedimentos de fondo de los ríos analizados. Esta zona se caracterizó por ser indefinida, lo única característica que se

identificó es que conforme aumenta el diámetro disminuían la cantidad de partículas que tenían movimiento.

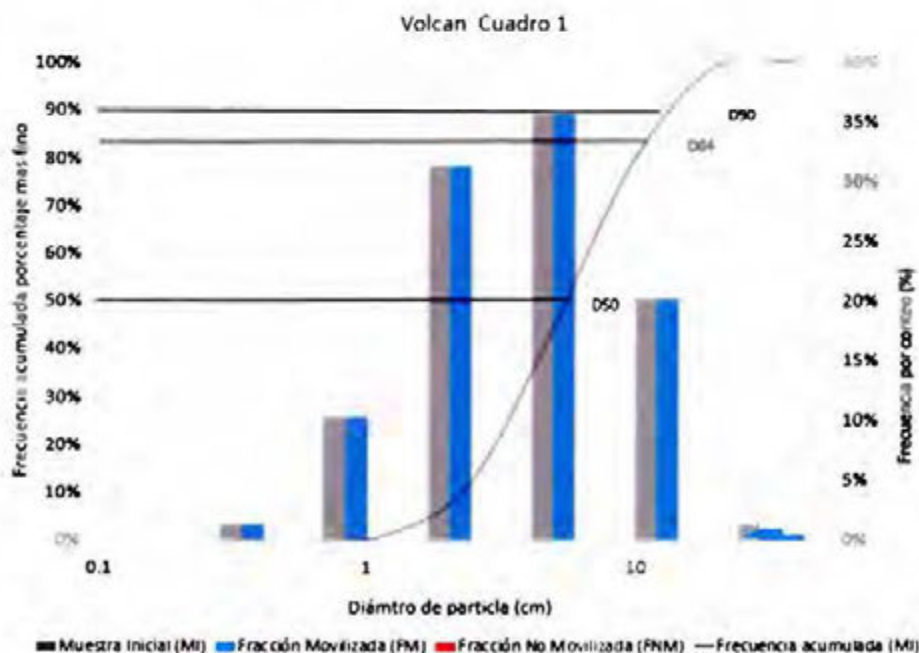
Figura 4-14. Distribución granulométrica de la muestra inicial y la fracción no movilizada para los cinco puntos estudiados de la Cuenca del Río Grande de Térraba, (Fuente: Elaboración propia)

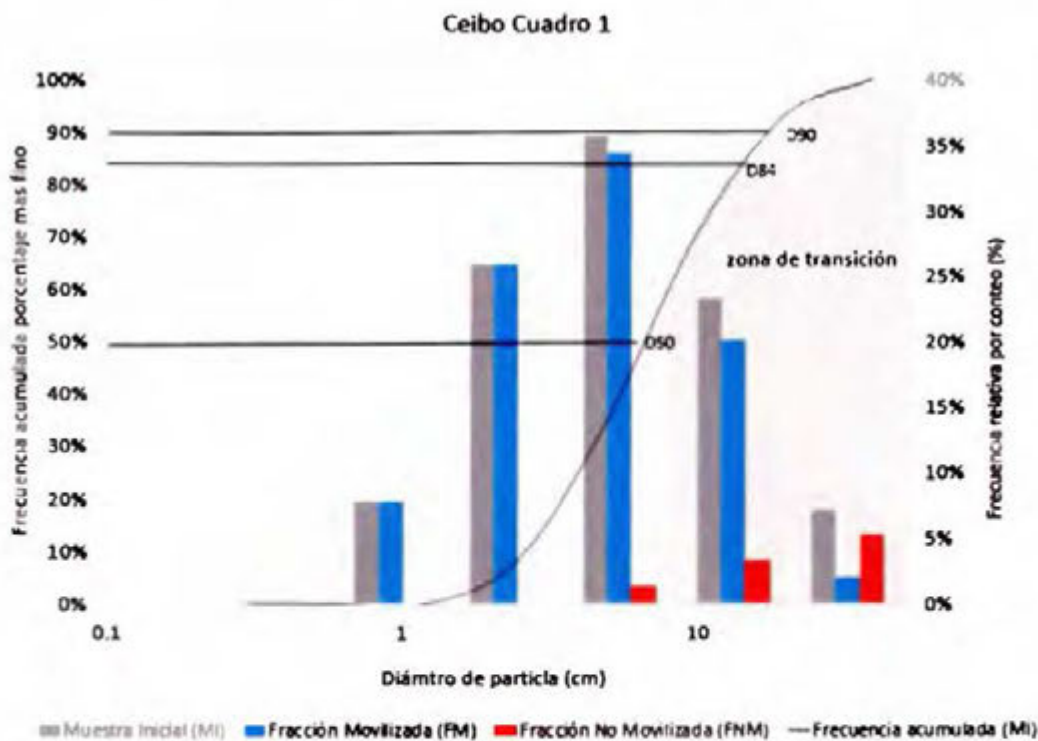
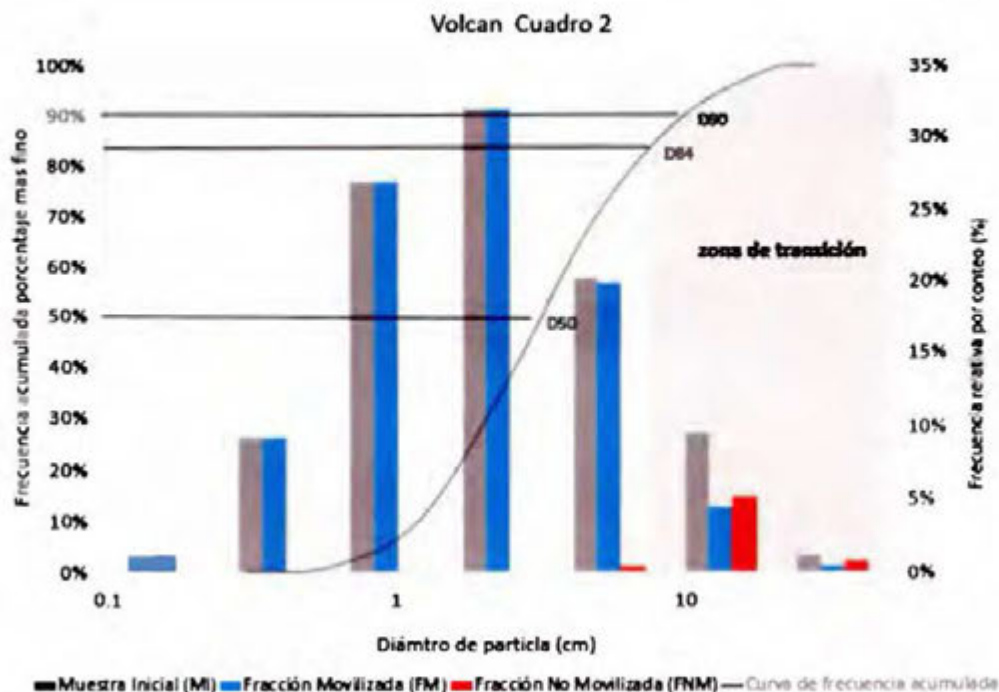


En estos gráficos se observa como el D_{50} , para este tipo de distribución no necesariamente representa la muestra inicial, ya que la distribución de tamaños de este tipo de muestras (cargas mixtas) no son uniformes y su dispersión de diámetros es muy grande (entre los 2.5 mm y 538 mm). Nótese que el D_{84} y D_{90} de la muestra movilizada se acercan o se ubican dentro de la zona de transición, reforzando por qué el uso del D_{50} para este tipo de muestra puede estar subestimando la condición real del movimiento para efectos de diseño o estimaciones de transportes. Lo que sugiere que es recomendable utilizar un D_n que no subestima o sobreestima el transporte, que este asociado a una probabilidad que cubre el rango donde las partículas que presentan la aleatoriedad del fenómeno.

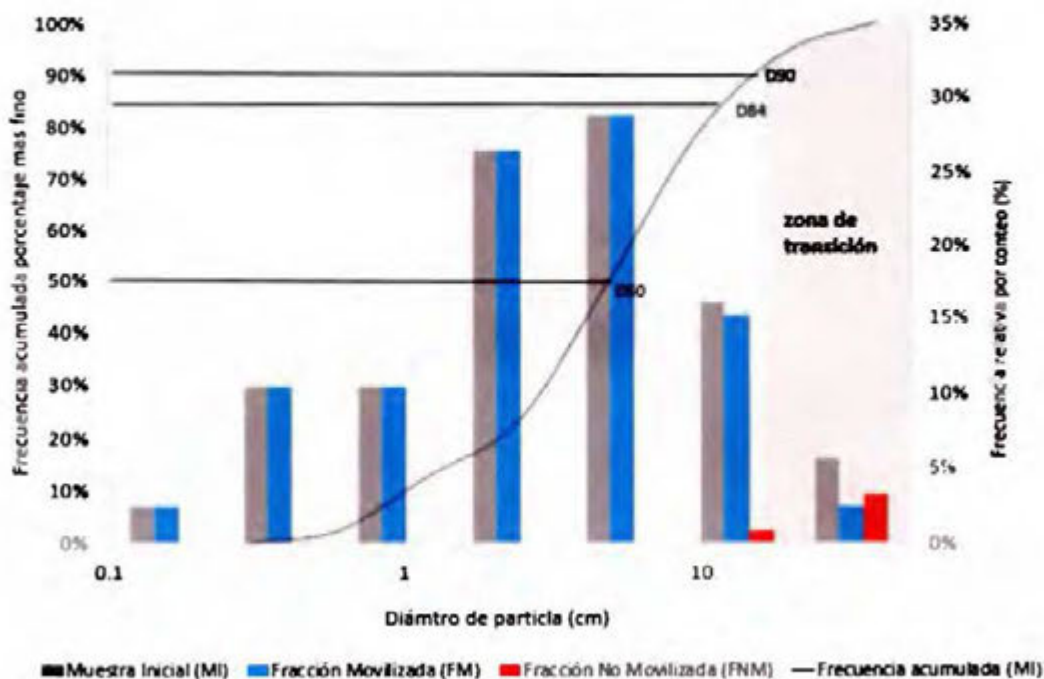
De este análisis se decide que para efectos de esta investigación se va incluir también el D_{84} de la muestra inicial como un diámetro para caracterizar el movimiento de la muestra, porque se considera que es un parámetro conservador, que está asociado a una probabilidad que cubre el rango donde las partículas presentan la aleatoriedad del fenómeno (zona de transición), y no subestima o sobreestima el transporte. Se considera que el D_{90} , no es adecuado porque este representa a las partículas más gruesas del material analizado, y por la forma de la distribución analizada se ubica en un sector donde la cola es muy pequeña.

Figura 4-15.: Comparación de las distribuciones de frecuencia del material inicial, material movilizado y material no movilizado.

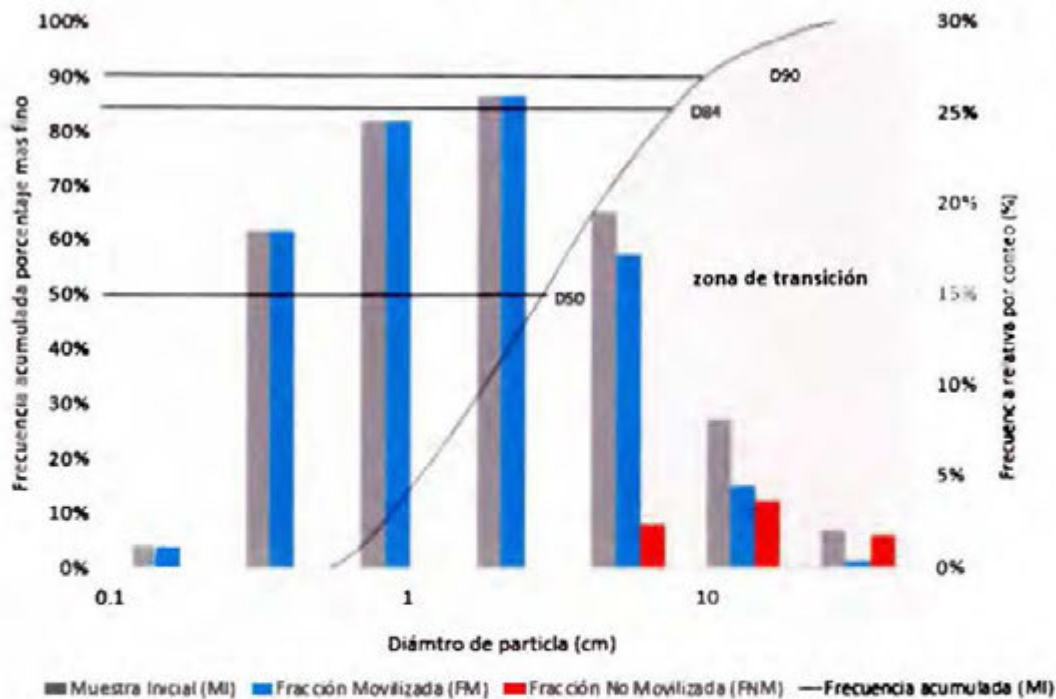


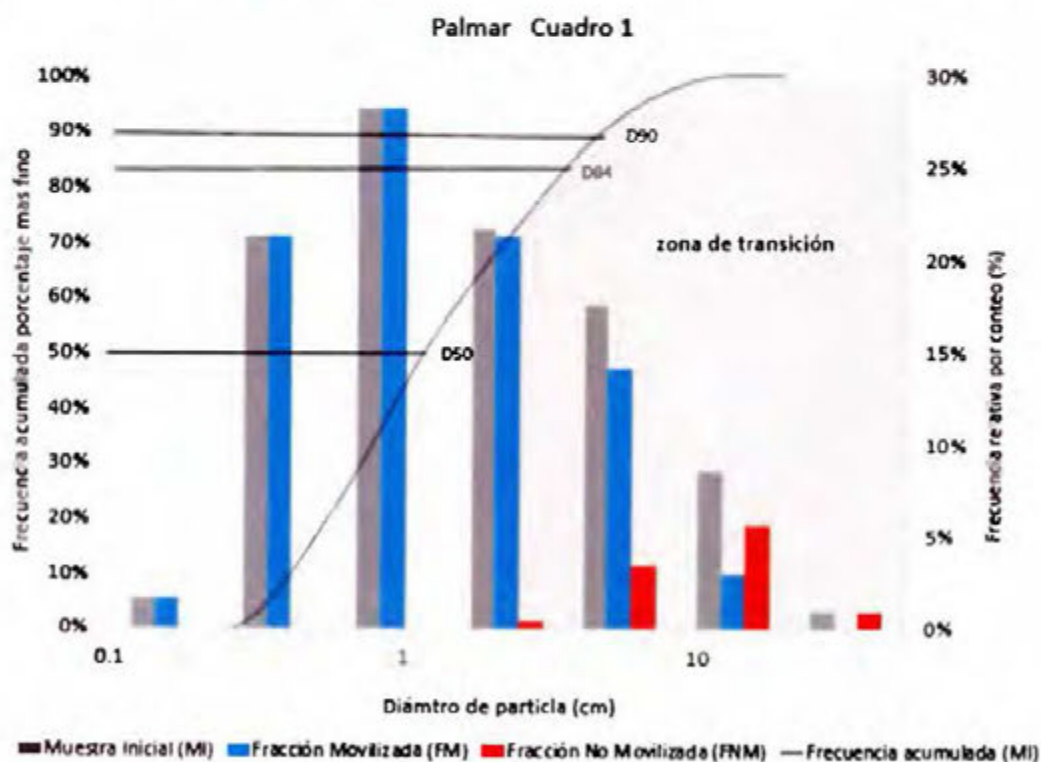
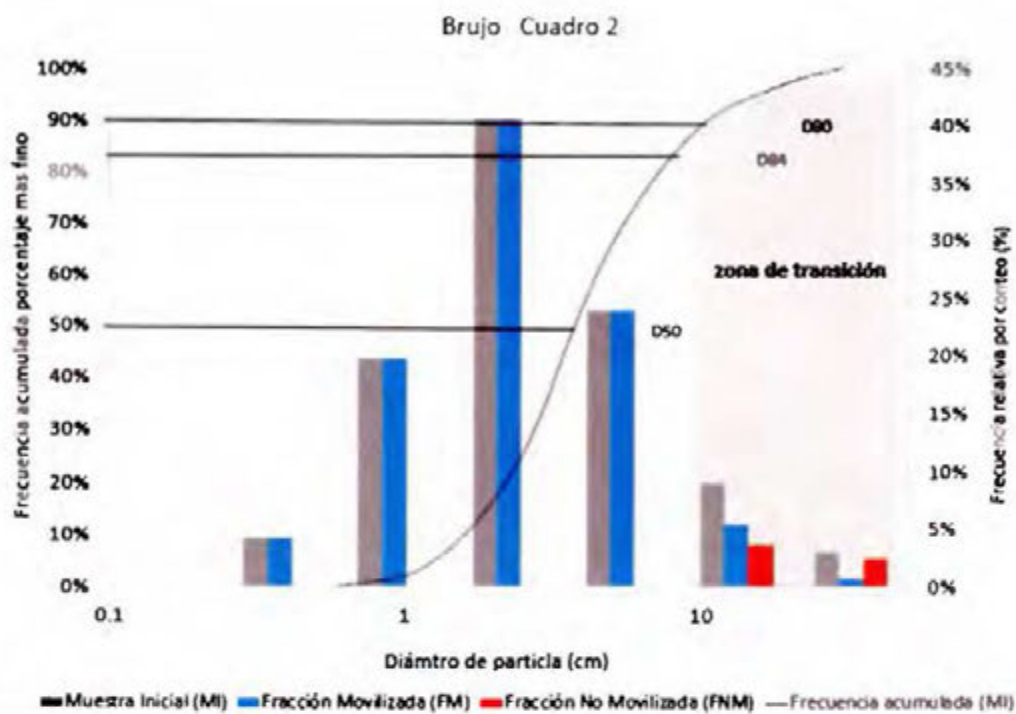


Ceibo Cuadro 2

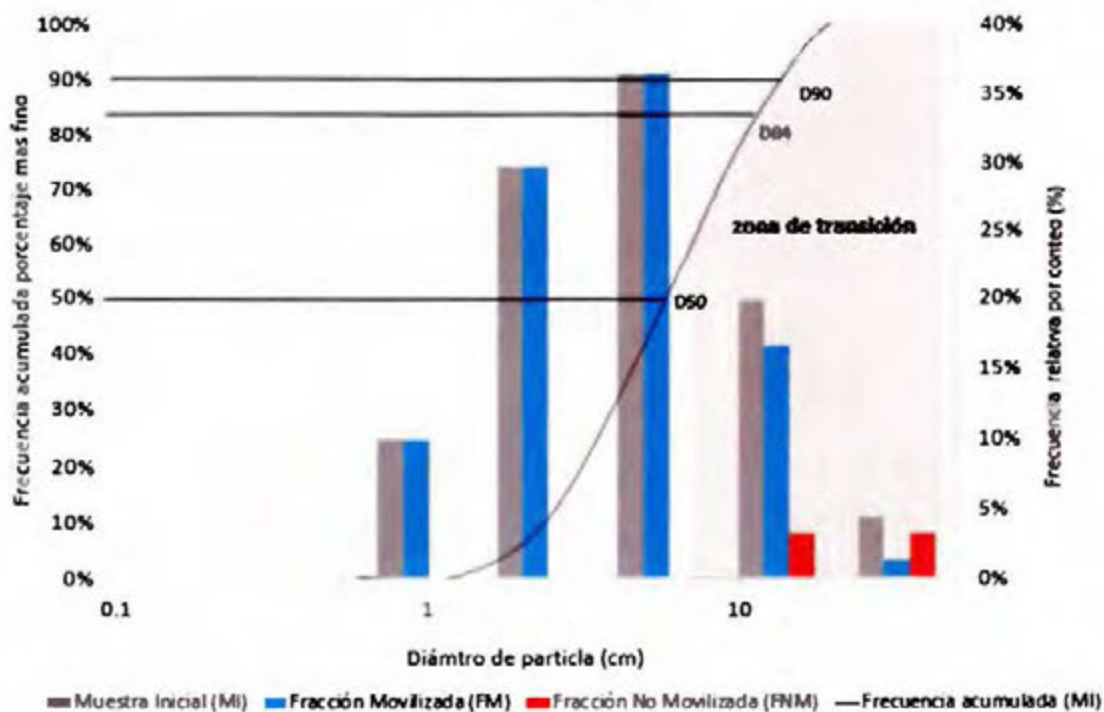


Brujo Cuadro 1

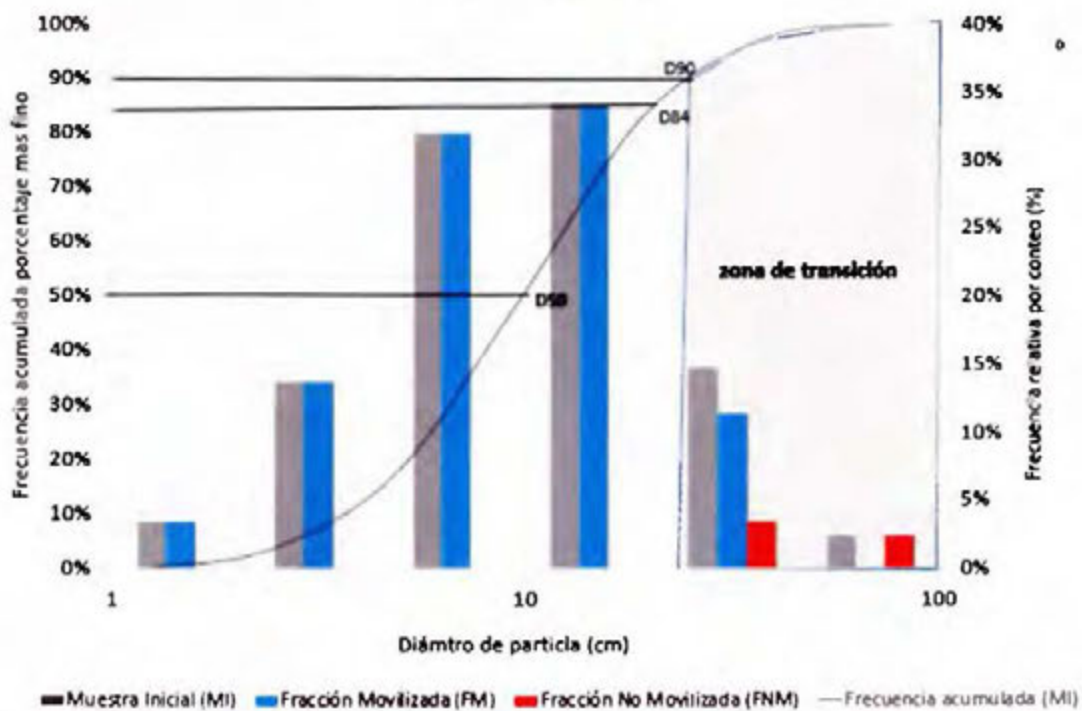




Palmar Cuadro 2



Remolino Cuadro 1



Capítulo 5: Umbral del movimiento

En este capítulo se emplea un modelo hidráulico numérico para representar las condiciones de flujo que ocurrieron en campo, para determinar el esfuerzo cortante, velocidad y profundidad del agua que provocaron el movimiento incipiente de las partículas de sedimento. Con estos parámetros hidráulicos y los resultados del seguimiento del movimiento incipiente en los cinco ríos de la Cuenca del Río Grande de Térraba, se determina cuáles de las relaciones existentes se ajustan a los datos observados en campo. No se incluyó en este análisis la estación hidrológica Remolino y el Cuadro 1 de la estación Hidrológica Ceibo, porque no se contó con los datos de las crecientes.

5.1. Modelos hidráulicos

Para realizar los modelos hidráulicos de los tramos de interés y caracterizar los niveles, velocidades y esfuerzos cortantes de los ríos, se utilizó el programa de flujo bidimensional Iber. Este es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios, desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), España.

Como datos de entrada se utilizaron las crecientes identificadas como la máxima en el periodo de observación (Tabla 4-10), y la topografía obtenida por medio de la tecnología LIDAR(Light Detection and Ranging), propiedad del ICE, la cual fue levantada en setiembre 2009. Como limitación de esta topografía se tiene que esta no incluye la geometría del fondo del río, pero sí el espejo de agua que se encontraba en el instante de la toma de los datos. Situación que se consideró en la calibración de los modelos, y se mitigó con el uso de una rugosidad menor en el cauce principal para darle mayor capacidad de caudal al cauce principal. Esto no afectó los resultados de esfuerzos cortantes ya que esta situación no se presenta en las barras de sedimento donde se ubicaron los cuadros de muestreo, además el objetivo en el uso de este modelo era extraer la información de la tensión de fondo, parámetro que depende del nivel de agua y pendiente de fondo del río. El modelado se realizó considerando la condición un fondo fijo.

Para la calibración de los modelos hidráulicos se utilizó las escalas registradas para cada creciente, la elevación "Z" de las escalas (ICE, 2015) y el registro de aforos de cada estación hidrológica. En la Tabla 5-1. se muestra las coordenadas geográficas y elevación en msnm de estas escalas.

Antes de iniciar la calibración se hizo una validación entre las elevaciones de las escalas y la elevación con respecto a la topografía LIDAR, para verificar que los datos sean congruentes. Para esto se utilizó la información del espejo de agua y los aforos de las estaciones hidrológicas. Se midió el espejo de agua identificado en el levantamiento LIDAR y la elevación sobre el nivel del mar. Luego con ayuda del registro de aforos del año 2009 (fecha que se realizó el levantamiento del LIDAR), se extrajo cuál era la escala para ese espejo de agua y se adoptó como la referencia de elevación, luego se trasladó esta elevación a la referencia que se tenía de la escala.

En el caso de Volcán y Brujo, se identificó que había una diferencia de elevación de más de un metro, por lo que se decidió mantener la referencia de elevación identificada por el espejo de agua. Para Ceibo y Palmar se identificaron diferencias de menos de 25 cm, por lo que se considera la elevación de la escala del ICE, como referencia para la calibración. Se decidió optar como la elevación correcta la indicada por LIDAR, ya que se considera un dato más confiable por el tipo de precisión y tecnología que conlleva este levantamiento, el cual fue verificado y depurado por el ICE. (Tabla 5-1)

Para calibrar los modelos hidráulicos se realizaron cambios de rugosidad en el cauce principal, hasta que el nivel máximo de la creciente determinado en el modelado coincidiera con el registrado en la estación hidrológica. Se aceptó una diferencia entre la escala modelada con la real de 10-15 cm, valor que se consideró aceptable, ya que durante las crecientes se presenta el oleaje que influyen en la toma de datos de la estación hidrológica.

Se utilizó una malla computacional no estructurada con una dimensión de 2 metros, para los ríos Ceibo y Volcán asociado a que todos los cuadros demarcados tenían esta geometría. Para Brujo y Palmar, como la malla de cálculo espacialmente es más grande, se decidió utilizar 10 metros para no extender demasiado el tiempo de cálculo. Para el río Grande de Térraba se modelaron 3.0 km de cauce, para el Río General 2.0 km, el Río Ceibo 600 m y 270 m para el río Volcán.

Tabla 5-1. Ubicación espacial y elevación en msnm de referencia de las escalas ubicadas en las hidrológicas

Estación Hidrológica	Volcán	Ceibo	Brujo	Palmar
Escala Nivel (m)	1.0	2.0	3.0	3.0
Coordenadas Norte	1014775.6	1010659.30	1005284.9	990452.4
Coordenada Este	562996.6	568301.2	579717.4	559358.3
Elevación levantamiento de campo (msnm)	345.71	231.11	140.77	14.86
Espejo de agua (LIDAR)	16.0	25.0	89.0	178
Escala identificada para espejo de agua	1.10	0.56	2.03	1.85
Escala Nivel (MSNM) LIDAR	344.70	231.07	140.27	14.62
Diferencias	1.10	0.04	0.50	0.24
Referencia seleccionada para la calibración	LIDAR	Levantamiento de campo	LIDAR	Levantamiento de campo

Tanto para la calibración como para la extracción de los parámetros hidráulicos en los sitios de muestreo, se trabajó con la pantalla de resultados de mapa de máximos, la cual despliega los valores máximos registrados en cada triángulo de la malla computacional durante el tiempo de modelado.

En la Tabla 5-2 se muestra los resultados de la calibración de los modelos hidráulicos, se detalla la rugosidad final del cauce principal, la escala real y modelada, y la diferencia entre estas. Los ríos Volcán y Ceibo, calibraron con rugosidades más altas, lo que era de esperarse porque los caudales bases suelen ser pequeños y tienen profundidades bajas, a diferencia de Brujo y Palmar, que corresponden a cuencas más grandes y su caudal base es alto durante la época de lluvia y deben manejar profundidades superiores a 1 m.

Tabla 5-2. Resultados de la calibración de los modelos hidráulicos

Estación hidrológica	Caudal pico de la creciente (m ³ /s)	Rugosidad	Escala real (msnm)	Escala modelada (msnm)	Diferencia (m)
Volcán	291	0.039	347.50	347.46	0.04
	274	0.039	347.43	347.53	0.10
Ceibo	344	0.039	232.34	232.39	0.05
	1059	0.013	141.64	141.81	0.16
Brujo	1923	0.015	142.80	142.87	0.07
	1087	0.018	14.98	15.04	0.05
Palmar	2305	0.020	16.01	15.95	0.06

Una vez calibrados los modelos, se extrajo la información de velocidad, tensión de fondo y profundidad del agua en el sitio donde se demarcó el cuadro. Para determinar cuál fue el parámetro hidráulico se decidió utilizar el promedio entre los 6 ó 8 valores más cercano de la malla computacional a las coordenadas del cuadro, en la dirección del flujo. Estos resultados se resumen en la Tabla 5-3. En el Anexo 5, se puede observar las salidas de mapa de máximos de los parámetros hidráulicos, además se muestran los valores utilizados alrededor del punto de muestreo y la malla computacional utilizada para cada río.

Tabla 5-3. Valores promedio de velocidad, tensión de fondo y profundidad del agua sobre la muestra de sedimento fondo, según el modelado hidráulico.

Estación Hidrológica	Creciente	Velocidad (m/s)	Tensión de fondo (N/m ²)	Tirante (m)
Volcán	Creciente 1	2.75	76	3.36
	Creciente 2	1.96	39	3.13
Ceibo	Creciente 1	2.86	88	2.60
	Creciente 2	3.04	54	1.29
Brujo	Creciente 1	2.06	21	0.67
	Creciente 2	3.04	54	1.29
Palmar	Creciente 1	0.64	15	1.20
	Creciente 2	0.81	30	1.57

5.2. Ecuaciones del movimiento incipiente

Para determinar cuáles de las relaciones existentes se ajustan a los datos observados en campo, se utilizaron los parámetros hidráulicos obtenidos por medio de los modelos hidráulicos (Tabla 5-3) y los resultados obtenidos del seguimiento del movimiento incipiente en los ríos de la Cuenca del Río Grande de Térraba (Tabla 4-12). Para esto se analizaron tres de las relaciones existentes descritas en apartado 2.4. de este trabajo de investigación: Shields, Yalin and Karaha y el gráfico Modificado de Shields de Parker (2005).

El gráfico de Shields (1936), es una de las investigaciones más antiguas en el tema y más utilizadas por los investigadores de la teoría de transporte de sedimentos. El experimento de Shields se desarrolló para partículas de ámbar, lignita, fragmentos de granito y barita, cuyos pesos específicos relativos se encontraban entre 1.06 hasta 4.2. Las muestras consistieron en partículas con diámetros entre los 0.25 mm y 5 mm (arena- grava muy fina). El modelado físico lo realizó en dos canales uno 80 cm y otro de 40 cm de ancho. La estimación del esfuerzo cortante crítico la realizó por medio de la medición de la altura del agua. En su investigación Shields, analiza la formación de formas de fondo y la forma del material. En la Tabla 5-4 se muestra las características del material de sedimento que utilizó Shields.

Uno de los aportes más importantes de Shields es el determinar el esfuerzo cortante crítico τ_c^* y su relación con el número de Reynolds. En la Figura 5.1 se muestra el gráfico original del experimento, en el cual el autor identificó cuatro regiones según las condiciones de flujo., en la primera región I la fuerza tractiva se proyecta en la capa lamina. En la región II, la capa laminar es del mismo orden de magnitud que la capa rugosa, y se detecta un valor mínimo de $\tau_c^* = 0.033$. En la región III el τ_c^* empieza aumentar gradualmente y en la región IV τ_c^* adopta un valor constante de 0.06. Nótese como dentro de su gráfico, Shields, identifica las formas de fondo que se produjeron durante el experimento: rizos y barras. .

Tabla 5-4: Características del sedimento de fondo que utilizó Shields en su investigación (Shields, 1936)

Tipo	Peso específico	Tamaño de partícula		Forma del grano
		Máximo (mm)	Diámetro medio (mm)	
Ambar	1.06	0.38-3.0	1.56	Bordes afilados
Lignita I	2.69	0.75-2.0	1.77	Angular con los extremos redondeadas
Lignita II	2.71	0.75-5.0	1.88	
Lignita III	2.70	2-5	2.53	
Granito I	2.69	2-3	2.44	Angular con los bordes y extremos redondeadas
Granito II	2.71	1.02-1.5	1.23	
Granito III	2.70	0.75 -1.02	0.85	
Barita I	4.2	3-4	3.44	Angular con los bordes y extremos redondeadas
Barita II	4.19	2-3	2.46	
Barita III	4.2	1-2	1.52	
Barita IV	4.25	0.49-0.75	0.69	
Barita V	4.3	0.25-0.49	0.36	
Barita V	4.2	2-5	2.76	

Figura 5-1. Gráfico original del experimentos de Shields .(Shields, 1936)

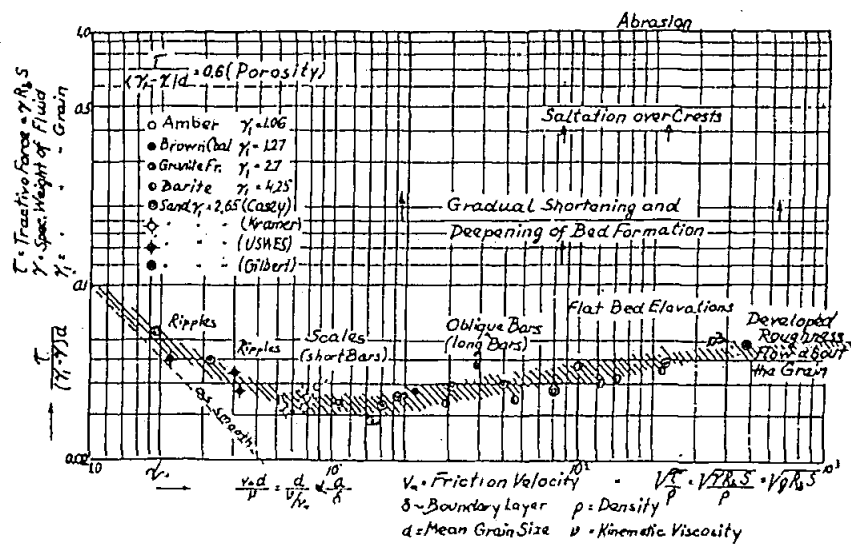


Fig. 6. Tractive - force coefficient $\frac{\tau}{(\gamma_1 - \gamma)d}$ against the Reynolds number of the grain $\frac{V_* d}{\nu}$.

Ahora bien, para analizar si los resultados obtenidos se ajustan al experimento de Shields, se va utilizar el D_{50} y D_{84} de la muestra de sedimento inicial y los esfuerzos cortantes máximos obtenidos en el modelo hidráulico, considerado como el esfuerzo crítico que generó el movimiento incipiente, además se incorpora los resultados de la densidad promedio obtenida para cada río.

En la Figura 5-2 se muestran los resultados obtenidos al graficar los datos de campo en el gráfico de Shields. Como se puede ver los registros identificados para la cuenca se salen del rango del gráfico. Para realizar el análisis se tomará como referencia la indicación de Shields de que $\tau_c^* = 0.06$. Si se considera esto como válido para el caso D_{50} , los puntos se ubican en el área con movimiento y para el caso D_{84} , los puntos se ubican en el área sin movimiento. Desde esta perspectiva simple existe congruencia entre lo observado en campo y lo sugerido por Shields

Para el análisis del D_{50} (diámetro que recomienda Shields) el Gráfico de Shields sí se ajusta a los resultados que se observaron en campo, ya que existió un movimiento generalizado de la muestra de sedimento y se tuvo porcentajes de movilidad mayores al 90% en todas las muestras. Sin embargo, como se mencionó en el Capítulo 4, el D_{50} podría no ser el parámetro más adecuado para representar el tipo de muestra analizada (granulometrías mixtas) ya que deja de lado la fracción más gruesa de los sedimentos analizados y que de acuerdo con las observaciones sí tuvo.

Además, el material que utiliza Shields para su investigación consiste en granulometrías más uniformes con diámetros entre 0.38 mm y 5 mm, lo que justifica el uso de un D_{50} como un parámetro representativo, en contraste en este proyecto de investigación, la dispersión de tamaños se encuentra entre los 2.5 mm a los 538 mm. Por lo anterior, así como lo mencionado en el Capítulo 4, se continuará el análisis del D_{84} , diámetro que se considera más representativo para las muestras de sedimentos analizadas.

Si se analizan los umbrales del movimiento del D_{84} , los cuales se registran en el rango de cantos, los puntos caen muy por debajo a $\tau_c^* = 0.06$. Este resultado ya se ha sugerido para para material granular, por ejemplo, Neill (1968) indica que en este sector del gráfico el $\tau_c^* = 0.03$; mientras que Gessler (1971) sugiere $\tau_c^* = 0.046$ (García, 2008). Ahora bien, si se analizan los resultados obtenidos de τ_c^* para los ríos estudiados, se determina que estos

se ubican muy cercanos a $\tau_c^* = 0.03$ (Figura 5-3), ajustándose a la recomendación de Neill (1968). Por lo tanto, se determina que el esfuerzo crítico de las partículas más gruesas analizadas ronda un valor de $\tau_c^* = 0.03$.

Figura 5-2. Umbral del movimiento incipiente del D_{50} y D_{84} del sedimento de fondo obtenidos para los ríos de la Cuenca del Río Grande de Térraba según el gráfico de Shields. (Shields, 1936)

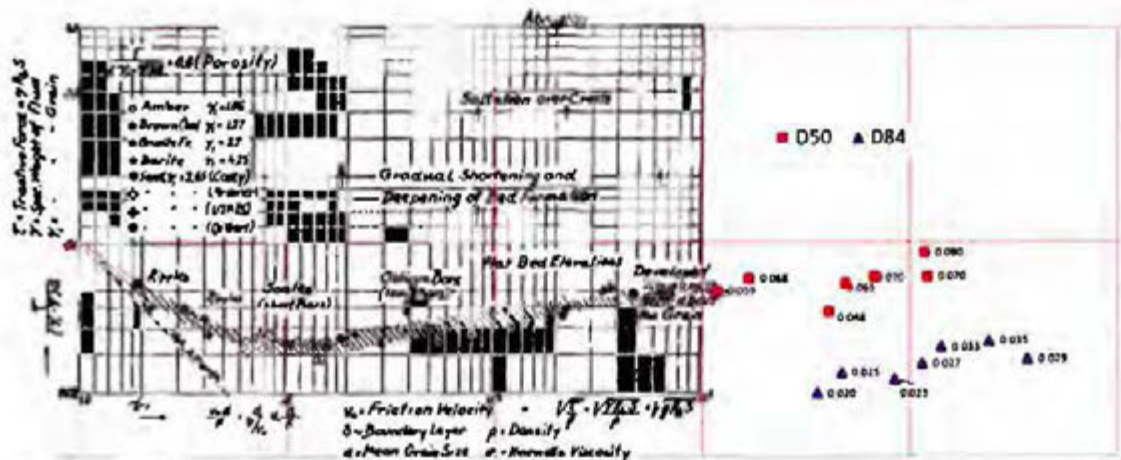


Fig. 6. Tractive - force coefficient $\frac{\tau}{(\gamma_1 - \gamma)d}$ against the Reynolds number of the grain $\frac{V_{ed}}{\nu}$.

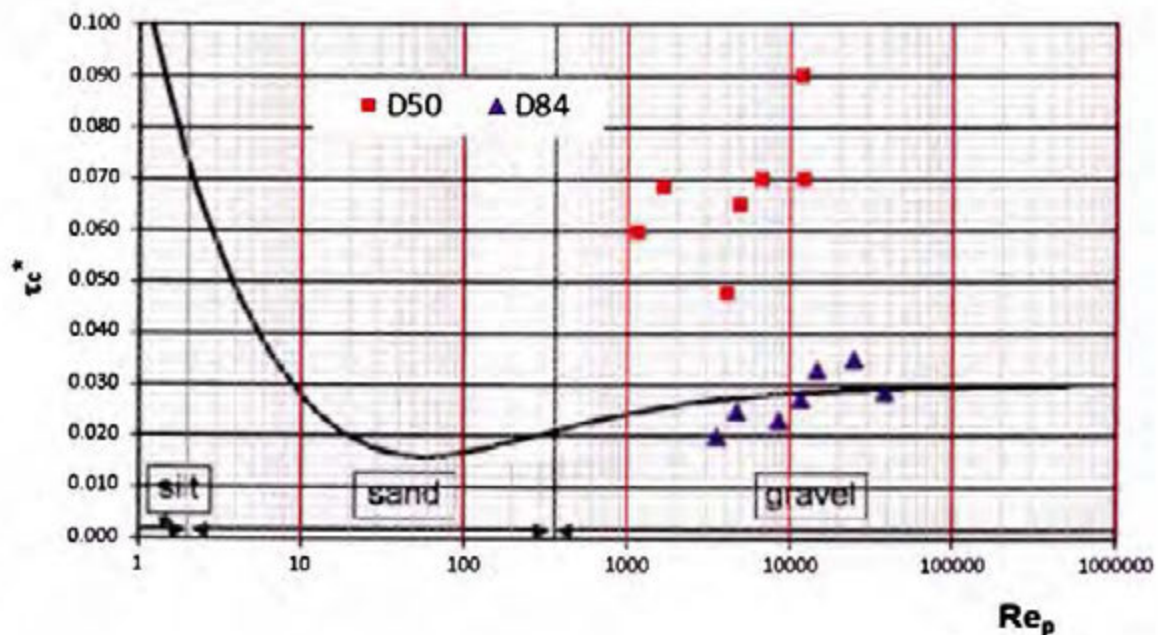
Al ser el gráfico de Shields el pionero en la iniciación del movimiento de las partículas de sedimento, han surgido muchos estudios sobre este como por ejemplo se puede mencionar el de Parker (2005), en el cual se recomienda calcular τ_c^* según la Ecuación 17, del apartado 2.5. Este gráfico modificado de Parker se desarrolló a partir de la ecuación de Browlie (1981), la cual corresponde a una fórmula que se ajusta al gráfico de Shields, y luego basada en la información de Neill (1968) de $\tau_c^* = 0.03$, Parker divide la ecuación entre dos. Además, Parker (2005) también menciona para el caso de cargas mixtas con diferentes D_i , se puede asumir la simplificación que la mezcla es suficiente gruesa, y que para cada D_i el esfuerzo crítico de Shields sea $\tau_c^* = 0.03$.

En la Figura 5-3 se muestra este gráfico y se incluyen los resultados obtenidos para el D_{84} y D_{50} de los ríos analizados. Para este caso se evidencia mejor los resultados obtenidos en campo, ya que todas partículas superiores al D_{50} de la muestra inicial tuvieron movimiento, y se ubican muy por encima de la línea del umbral del movimiento. Para el caso de los D_{84} , los puntos se ubican cercanos a la línea del umbral del movimiento donde $\tau_c^* = 0.03$, lo que

se considera como válido ya que para algunos casos para el D_{84} se determinó una aleatoriedad donde algunas partículas de sedimentos permanecieron (zona de transición). Por lo tanto, el gráfico Modificado de Shields (Parker, 2005) se recomienda para ser utilizado en los ríos analizados.

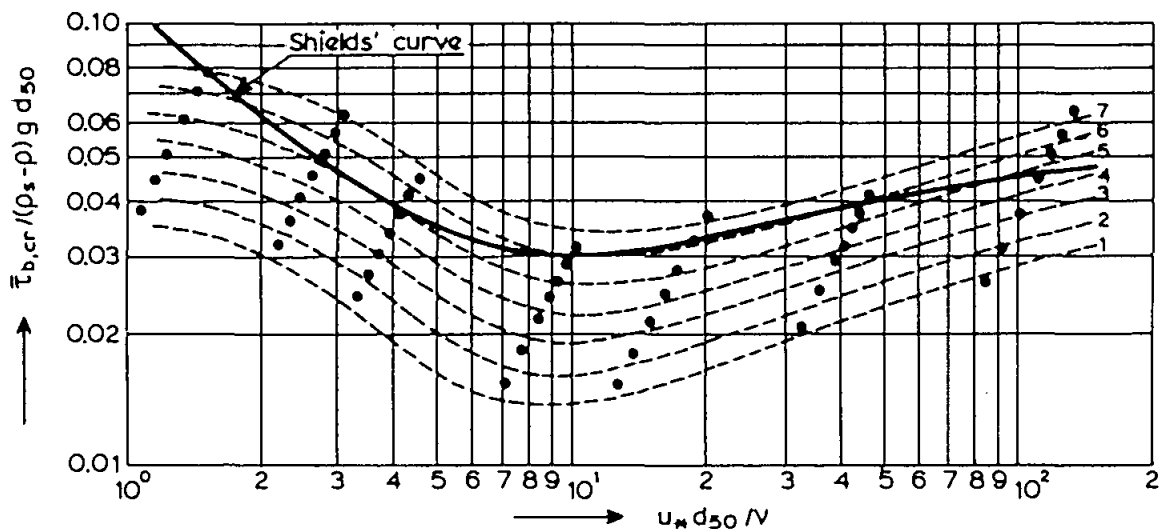
Yalin y Karahan (1979) elaboraron un diagrama para la iniciación del movimiento, basado en datos de otras investigaciones y su propio experimento con partículas entre los 0.10 mm y 2.86 mm, para flujo laminar y turbulento. En la Figura 5-3 se muestra este diagrama, donde se observa que al igual que los datos de Shields, si se utiliza el D_{50} , los puntos se ubican en el área con movimiento generalizado y para el caso D_{84} , los puntos se ubican en el área sin movimiento. Nótese que para este gráfico donde se ubican los puntos de los ríos estudiados la mayoría de los puntos se ubican por fuera del gráfico y el $\tau_c' = 0.045$. Por lo tanto, este Gráfico de Yalin y Karahan, sí se ajusta para el análisis del D_{50} . Finalmente, en la Tabla 5-5 se resumen los cálculos anteriormente realizados.

Figura 5-3.: Umbral del movimiento incipiente del D_{50} y D_{84} del sedimento de fondo obtenidos para los ríos de la Cuenca del Río Grande de Térraba según el gráfico Modificado de Shields (Parker, 2005)



se observó en campo para el D_{50} y D_{84} . Además, refuerza porque se tomó la decisión de que existió un movimiento generalizado en los cuadros muestreados, ya que de la muestra inicial solo permanecieron algunas partículas y se considera que los ríos analizados permanecieron entre la zona seis y siete. Este gráfico también refuerza que efectivamente no existe un umbral claro del movimiento.

Figura 5-5.: Iniciación del movimiento y suspensión de partículas de arena en un lecho plano (Delft Hydraulics, 1972)



1. Movimientos ocasionales de algunas partículas
2. Movientes frecuentes de algunas partículas
3. Movimientos frecuente en muchas zonas
4. Movimiento frecuente en zonas cercanas
5. Movimiento frecuente de todas las zonas
6. Movimiento permanente de todas las zonas
7. Transporte general (iniciación de rizos, formas de fondo)

Tabla 5-5. Resumen de cálculos realizados para los gráficos de Shields, Shields Modificado y el diagrama de Iniciación del Movimiento de Yalin y Karahan de la muestra inicial (Elaboración propia)

Creciente	Densidad (kg/m ³)	Esfuerzo cortante crítico (Máximo del modelo hidráulico) (N/m ²)	Diámetro de partícula muestra inicial (m)	Velocidad crítica (m/s)	Eje X	Eje Y
					Gráficos Re* Rep X _{cr}	Gráficos τ_c^* θ_{cr} Y _{cr}
D50						
Volcán, Cuadro 1	2550	76	0.071	0.17	12242	0.070
Volcán, Cuadro 2	2550	39	0.040	0.12	4887	0.065
Ceibo, Cuadro 1	2560	88	0.064	0.19	11883	0.090
Brujo, Cuadro 1	2660	21	0.019	0.09	1686	0.068
Brujo, Cuadro 2	2660	54	0.048	0.14	6766	0.070
Palmar, Cuadro 1	2670	15	0.016	0.08	1178	0.059
Palmar, Cuadro 2	2670	30	0.039	0.11	4091	0.048
D84						
Volcan, Caudro 1	2550	76	0.142	0.17	24424	0.035
Volcan, Caudro 2	2550	39	0.094	0.12	11605	0.027
Ceibo Cuadro 1	2560	88	0.202	0.19	37422	0.029
Brujo, Cuadro 1	2660	21	0.052	0.09	4650	0.025
Brujo, Cuadro 2	2660	54	0.101	0.14	14416	0.033
Palmar, Cuadro 1	2670	15	0.047	0.08	3564	0.020
Palmar, Cuadro 2	2670	30	0.080	0.11	8496	0.023

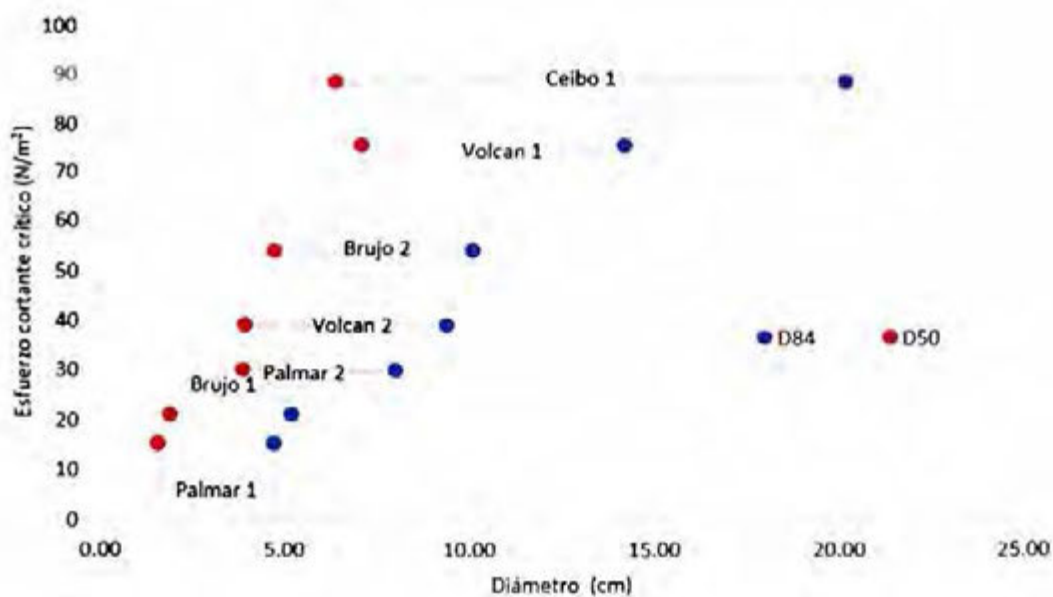
5.3. Umbral de movimiento y la caracterización de la cuenca

Con los resultados obtenidos, se exploró la posibilidad de encontrar una correlación del esfuerzo cortante y el diámetro de partícula en la condición de iniciación del movimiento, con alguna de las características físicas de las cuencas, sin embargo, no se pudo identificar cuantitativamente ninguna relación con el tamaño de la cuenca, pendiente de fondo, profundidad del agua o algún otro parámetro físico o hidráulico. Pero sí se puede determinar en una forma descriptiva, que sí existe relación según las observaciones de este estudio.

El río General a la altura de Remolino se determinó como el río que tiene más capacidad de transportar material más grueso, asociado a una cuenca de tamaño mediano con un río de montaña. El río Ceibo y Volcán, continúan en la lista de cuencas pequeñas con ríos de montañas y los ríos General (estación hidrológica Brujo) y Grande de Térraba (estación hidrológica Palmar) cuencas grandes con ríos de planicie. De este análisis se identifica que la capacidad de transporte de sedimentos y el umbral del movimiento del tamaño máximo de partículas de sedimento que los ríos pueden transportar en la cuenca del río Grande de Térraba dependen de la producción hídrica (tamaño de la cuenca) y su ubicación espacial (ríos de montaña o de planicie).

Finalmente, se gráfica el esfuerzo cortante máximo de la creciente y el D_{50} y D_{84} , (Figura 5-6) y se determina una correlación lineal entre ambos parámetros. Reforzando el por qué la teoría de transporte de sedimento se enfoca en un esfuerzo cortante crítico y los diámetros de partículas movilizados.

Figura 5-6.: Esfuerzo cortante máximo obtenido para la creciente que provoco el transporte de sedimento de fondo de los ríos estudiados en función del D_{84} y D_{50} de la muestra de sedimentos inicial



6. Capítulo 6: Conclusiones

a) *Objetivos generales*

- En esta investigación se logró determinar los umbrales del movimiento incipiente del sedimento de fondo en el rango de gravas, cantos y bloques, en las barras de sedimento de cinco estaciones hidrológicas ubicadas en los ríos de la cuenca del Río Grande de Térraba, durante la estación húmeda del 2014, la cual se caracterizó por ser una época seca, a razón de la influencia del fenómeno del Niño.
- Se observaron los procesos de transporte y sedimentación que ocurren en cada una de las cuencas y se identificaron similitudes en su relieve, régimen hídrico y sedimentos de fondo.
- Se logró definir el umbral del movimiento con las condiciones observadas por medio de relaciones existentes.

b) *Sedimento de fondo*

- El material disponible en las estaciones hidrológicas se compone de partículas de gravas hasta bloques pequeños. El sedimento de fondo tiene una forma ovalada, con variaciones en sus 3 dimensiones y prácticamente no existen partículas con formas extremadamente compactas, disco, barra o cuchilla.
- Los ríos Volcán, Ceibo y General a la altura de la estación hidrológica Remolino, contienen la distribución de tamaños de partículas más grandes, asociado a la ubicación en las partes intermedias de la cuenca y se clasifican como ríos de montaña. En cuanto a la estación hidrológica Brujo y la estación Palmar, se identifican distribuciones de sedimento más finas, asociado a su ubicación en las partes más bajas de la cuenca y ríos de planicie.
- El sedimento tiene una densidad promedio de 2577 kg/m^3 , y existe fuerte correlación entre el diámetro medio de las partículas y su masa.
- Se logró aplicar las metodologías existentes para obtener la distribución granulométrica de partículas con cargas mixtas y realizar ajustes a las condiciones encontradas en campo, y se obtuvo una curva granulométrica entre el rango de gravas a bloques que representó a los ríos estudiados.

c) Campaña de muestreo

- Durante la campaña de muestreo se logró observar el comportamiento del movimiento incipiente del material en las barras de sedimento en las cinco estaciones hidrológicas.
- Se identificó que las partículas de sedimento fueron sometidas a esfuerzos cortantes superiores a su umbral de movimiento y conforme aumenta el diámetro disminuían la cantidad de partículas que tenían movimiento, y no se identificó un umbral claro, al ser un fenómeno estocástico. A esta zona de aleatoriedad, se le nombro "zona de transición", la cual está limitada por la menor partícula de sedimento que no tuvo movimiento y la mayor partícula de sedimento que tuvo movimiento.
- En todos los casos la movilización del sedimento fueron superiores al 90%, lo que indica una alta capacidad de transporte de sedimento entre gravas y bloques en la cuenca.
- Existió un movimiento generalizado de la capa superficial de sedimentos de fondo de los ríos.
- Los resultados obtenidos indican que el movimiento del sedimento está muy relacionado con la disponibilidad de material, para las crecientes menores de 2 años de periodo de retorno, el cual se le asocia al caudal formativo.
- Las partículas de sedimento ubicadas en la barra de sedimentos fueron reemplazadas en el primer periodo de lluvia y nuevamente en el segundo periodo de lluvia, lo que implica que existe un reemplazo constante de las partículas del sedimento de los ríos estudiados.

d) Relaciones existentes

- Se logró generar un modelado hidráulico numérico que representará las condiciones de flujo que ocurrieron en campo, lo que permitió identificar que el uso del gráfico de Shields (1936), el gráfico Modificado de Shields de Parker (2005) y Yalin y Karahan (1979) se puede utilizar para determinar el movimiento incipiente de las partículas de sedimentos de fondo de los sitios de muestreos.

e) Umbral del movimiento

- Se *identifica* que para los sitios de muestreo para los D_{84} de la muestra inicial el esfuerzo cortante crítico es de $\tau_c^* = 0.03$. El uso de estos valores se considera más representativo de las cargas mixtas con una distribución de tamaños no uniformes y una dispersión de diámetros grande, cuando se tengan que realizar estimaciones o diseños donde las partículas más grandes de la muestra son relevantes, como por ejemplo diseño de enrocados.

f) Conclusiones generales

- La capacidad de transporte de sedimentos y el umbral del movimiento del tamaño máximo de partículas de sedimento que los ríos pueden transportar en la cuenca del río Grande de Terraba dependen de la producción hídrica (tamaño de la cuenca) y su ubicación espacial (ríos de montaña o de planicie).
- El hecho de que el año muestreado fue un periodo seco en la cuenca se considera beneficioso, porque esto permitió identificar el umbral del movimiento del sedimento de fondo. Si se hubieran registrados eventos más extremos, todas las partículas hubieran tenido movimiento y no se habría identificado la zona transición, en la cual se ubica el umbral del movimiento. Además, estos datos de eventos mínimos son posibles extrapolar en las relaciones que calculan el transporte de sedimentos, utilizando la recomendación encontrada en esta investigación de utilizar D_{84} de la muestra inicial y esfuerzo cortante crítico $\tau_c^* = 0.03$.
- Se logró medir el movimiento generalizado del sedimento de fondo en sus condiciones reales. Lo cual se considera uno de los aportes de esta investigación, ya que la medición de la iniciación del movimiento es difícil y son muy raros los datos en cauces naturales (Turowski,2011)

g) Recomendaciones

- Se recomienda replicar esta metodología del seguimiento del movimiento incipiente de las partículas del material superficial en otras cuencas con cargas mixtas no uniformes.

- Modelar la campaña realizada a escala de laboratorio, para corroborar si el esfuerzo cortante crítico es de $\tau_c^* = 0.03$ para un D_{84} ; además caracterizar el tipo movimiento de las partículas de sedimento (saltación, deslizamiento o rodadas) y las formas de fondo, características que no fueron posibles identificar en esta investigación.
- Uniformar los criterios del umbral del movimiento, estudiar más la parte estadística donde se presenta la zona de transición
- Introducir más tecnología a las mediciones de campo, como localizadores a las piedras, que permitan obtener mapas de transporte. Cámaras fijas para registrar los movimientos de las partículas en tiempo real. Utilizar tecnologías avanzadas (dopler, geófonos, sonar) y así mejorar la calibración de los modelos

7. Bibliografía

Bagnold, R. A. (1966). "An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics," U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 422-I

Bunte, K y Abt, S. (2001). "Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel- and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring" United States Department of Agriculture. .

Brownlie, W. R. (1981). "Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels." Report No. KH-R-43A , Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.

Cheng, N. S. (2002). "Exponential formula for bedload transport." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* , 128 (102), 942–946.

Charlton, R.(2008), "Fundamental of Fluvial Geomorphology", Taylor & Francis Group.

Chiew, Y., and Parker, G. (1994). "Incipient sediment motion on nonhorizontal slopes." *Journal of Hydraulic Research, IAHR* , Vol. 32 (5), pag. 649-660.

Deft Hydraulics (1972). "Systematic Investigation of Two-Dimensional and Three-Dimensional Scour." Report M648/M863. Delft The Netherlands.

Dingman (2009) "Fluvial Hydraulics". Oxford University Press. New York. Unites States.

Diplas, P. and J.B. Fripp, 1992. Properties of various sediment sampling procedures. *Journal of Hydraulic Engineering* Vol. 118 (7): 955-970.

Ferguson, R.I., and M. Church (2004) "A simple universal equation for grain settling velocity." *Journal of Sedimentary Research*. Vol. 74(6): 933–937

García, M (2008). "Sedimentation Engineering: Processes, Management, Modeling, and Practice". ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110.

García, M., y Maza, A. J. A. (1997). "Inicio de movimiento y acorazamiento." Capítulo 8 del Manual de Ingeniería de Ríos, Series del Instituto de Ingeniería 592 , UNAM, Mexico (in Spanish).

Gessler, J. (1970). "Self-Stabilizing Tendencies of Sediment Mixtures with Large Range of Grain Sizes." Journal of Waterway and Harbor Division, ASCE , Vol. 96(2), pag. 235–249.

Google Earth Pro (2017) "*Imágenes aéreas históricas*". <<https://www.google.com/earth/>>

Ikeda, S. (1982). "Incipient Motion of Sand Particles on Side Slopes," Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 108 (1), 95–114

Instituto Costarricense de Electricidad (2009). "*Topografía e imágenes aéreas obtenidas a partir de la tecnología Light Detection and Ranging(LIDAR)*", San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Electricidad (2015). "Levantamientos topográficos de las elevaciones sobre el nivel del mar de las escalas de las estaciones hidrológicas". San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Electricidad (2017). "Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2016-2035 ". <www.grupoice.com>

Instituto Costarricense de Electricidad (2014), "Base de datos digital de caudales" San José, Costa Rica

Instituto Meteorológico Nacional (2009), "Atlas Climatológico" . San José, Costa Rica. ,<<https://www.imn.ac.cr/web/imn/39>>

Instituto Meteorológico Nacional (2015), "Revista Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos Volumen #14-2015-1". < <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio>>

Julien, P. Y. (2002). "River Mechanics", Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Kellerhals, R. and D.I. Bray, (1971). "Sampling procedures for coarse fluvial sediments. Journal of the Hydraulics Division", ASCE, Vol. 97 (HY8): 1165-1180.

Klingeman, P., Chaquette, C., and Hammond, S. (1979). "Bed material characteristics near Oak Creek Sediment Transport Research Facilities, 1978-1979". Technical report, Water Resources Research Institute, Oregon State University, Corvallis, Oregon

Kristin B y Steven R (2001). "Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel -an Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics and Streambel Monitoring" United States Department of Agriculture. Rocky Mountain Research Station. United States.

Krumbein, W.C., (1941). "Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology Vol.11 (2), pag.: 64-72.

Lischtvan and Lebediev, V. V. (1959). "Gidrologia i Gidraulika v Mostovom Doroshnom, Straitielvie," Leningrad (in Russian).

Madsen, O. S. (1991). "Mechanics of cohesionless sediment transport in coastal waters." Coastal Sediments Vol. 91, pag. 15–27, ASCE, New York.

Meyer-Peter, E., and Muller, R. (1948). "Formulas for Bedload Transport." Proceedings of the 2 nd Congress , IAHR , Stockholm, pag. 39–64.

Miller, R. L., and Byrne, R. J. (1966). "The Angle of repose for a single grain on a fixed rough bed." Sedimentology , Vol. 6, pag. 303–314.

Neill, C. R. and Yalin. M. S. (1969). "Qualitative defi nition of beginning of bed movement." Journal of the Hydraulics Division , ASCE , Vol. 95 (1), pag. 585–587.

Niño, Y. and García, M. H. (1998). "Using Lagrangian Particle Saltation Observations for Bedload Sediment Transport Modeling." Hydrological Processes , Vol. 12, pag. 1197–1218.

Paintal, A. S. (1971). "Concept of critical shear stress in loose boundary open channels." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 9, 91–113.

Parker, G (2005), "Sediment Transport Morphodynamics with applications or Rivers and Turbidity Currents", <http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/powerpoint_lectures.htm>

Pye, W.D. and M.H. Pye, (1943). "Sphericity determinations of pebbles and sand grains. *Journal of Sedimentary Petrology*". Vol. 13 (1). Pag. 28-34

Recking, A.(2008)- "Bed-Load Transport Flume Experiments on Steep Slopes". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol 134. Pag. 1302-1310

Shields, A., (1936). "Anwendung der Aechichkeits-Mechanic und der Turbuleng Forschung auf dir Geschiebewegung' Mitt Preussische," Versuchsanstalt für Wasserbau and Schiffbau , Berlin, Germany (translated to English by W. P. ott and J. C. van Uchelen, California Institute of Technology, Pasadena, California

Sneed, E.D. and R.L. Folk, (1958). "Pebbles in the lower Colorado River, Texas: a study in particle morphogenesis." *Journal of Geology* Vol. 66, pag. 114-150.

Smith, J. D. (1977). "Modeling of sediment transport on continental shelves." *The Sea: ideas and observations on progress in the study of the seas*, E. D. Goldberg, ed., John Wiley and Sons, New York, 538–577.

Soulsby, R. L. and Whitehouse, R.J.S.W. (1997). "Threshold of sediment motion in coastal environments." *Proceedings Pacific Coasts and Ports '97 Conference*, Christchurch, 1, 149–154, University of Canterbury, New Zealand.

Tecnológico de Costa Rica (2008). "Atlas Digital de Costa Rica". San José, Costa Rica,.

Turowski, J. Badoux, A. y Rickenman, D. (2011). "Start and end of bedload transport in gravel-bed streams". *Geophysical Research Letters*, Vol. 38. Pag. 1-5.

Van Rijn, L. C. (1993) "Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal areas" . Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.

Van Rijn, L. C. (1984). "Sediment transport, part I: bed load transport." *Journal of Hydraulic Engineering* , ASCE, Vol.110(10), pag. 1431–1456

Vanoni, V. A. (1964). "Measurements of critical shear stress for entraining fine sediments in a boundary layer." Report KH-R7, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.

Vanoni, V. A., ed., (2006). "Sedimentation Engineering - Classic Edition , ASCE Manual and Reports on Engineering Practice" Vol. 54, ASCE/EWRI, Reston, Virginia.

Wiberg, P. L., and Smith, J. D. (1987). "Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments." *Water Resources Research*, Vol. 23(8), pag. 1471–1480

Wolman, M. (1954). "A method of sampling coarse river-bed material. Transactions", *American Geophysical Union*, Vol. 35(6), pag 951–956

Wong, M. and Parker, G. (2006). "Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132 (November), pag 1159– 1168.

Yager, E. Kirchner, J. y Dietrich, W. (2007). "Calculating bed load transport in steep boulder bed channels" *Water Resources Research*, VOL. 43.

Yalin, M. S. (1963). "An Expression for Bedload Transportation." *Journal of the Hydraulic Division* , ASCE, 89 (HY3), 221–250.

Yalin, M. S., and Karahan, E. (1979). "Inception of sediment transport." *Journal of Hydraulic Engineering* , ASCE, Vol. 105 (HY11), pag. 1433–1443.

8. ANEXOS

Anexo 1: Descripción de la recolección de muestras de sedimento

Para caracterizar la distribución de los tamaños de partículas de sedimento de fondo de cada uno de los sitios se utilizaron 3 metodologías: de Klingeman, la de Wolman y fotográfica, con el fin de determinar cuál era la que mejor podría describir la muestra de sedimento de fondo en superficie. A continuación, se describe como se empleó cada una de las metodologías, así mismo se explica algunas limitantes que se encontraron en campo, que implicaron variaciones en la metodología.

Metodología 1: Klingeman (1979)

Primeramente, la metodología indica que en la superficie de sedimento que se desea muestrear se debe dibujar un círculo con un radio igual o mayor a 10 veces el diámetro de la mayor partícula expuesta en superficie. Al llegar al primer sitio, río General a la altura de 1076 msnm (estación hidrológica Remolino), se determina que la mayor partícula expuesta puede llegar a tener hasta más 1 m de diámetro, y según la metodología el círculo debería tener 10 m de diámetro, lo que hacía enorme la muestra. Por lo que se decidió realizar un círculo de 3 m de diámetro, ya que esta encierra todos los tamaños de partículas más frecuentes. Criterio que se conservó en el resto de estaciones hidrológicas.

Por medio de un mecate sujetado con cinta adhesiva se marcó el círculo de 3 m de diámetro y se dividió en 4 partes iguales, para muestrear cada sector por separado con la intención de que sea más ordenado. Con ayuda de marcos elaborados de metal con tamaños 4 pulg a 14 pulg, se inició el conteo de las partículas.

Las partículas menores a las 4 pulg, se decidió recolectar una muestra, ya que en laboratorio se disponía de esta malla para realizar una granulometría volumétrica, además se simplificaba el conteo de partículas en campo. Para esto se retiró la piedra más grande y se extrajo un saco el material disponible.

En algunos casos, no se identificó una diferencia entre el material de superficie y del substrato..

En total se midieron entre 165 y 281 partículas por sitio, el proceso duró alrededor de dos horas en cada sitio entre cuatro personas. En algunos casos las partículas más grandes se tuvieron que medir con cinta métrica para facilitar la medición sin tener que levantarlas, porque su peso rondaba entre los 20 y 30 kg. En la Figura 8-1 se muestra el proceso de muestreo.



Figura 8-1: Aplicación del método de Klingeman, a) Demarcación del círculo de 3 metros de diámetro. b) División del círculo en partes iguales. c) Recolección de muestra de partículas menores a los 4"

En la Figura 8-4 se muestra la curva granulométrica para el material entre bloques y cantos y en la Figura 8-2 se presenta la curva granulométrica del material entre gravas y cantos. Aunque este método permite abarcar todo el rango de partículas disponibles en la margen del río, no permite determinar los D_n , ya que no se pueden unir las metodologías porque la distribución granulométrica del material por debajo de las gravas se realizó en laboratorio basado en porcentajes de peso y el material más de cantos a bloques se realizó por conteo.

Figura 8-2: Curva granulométrica realizada por el método de Klingeman, material grueso (Elaboración propia)

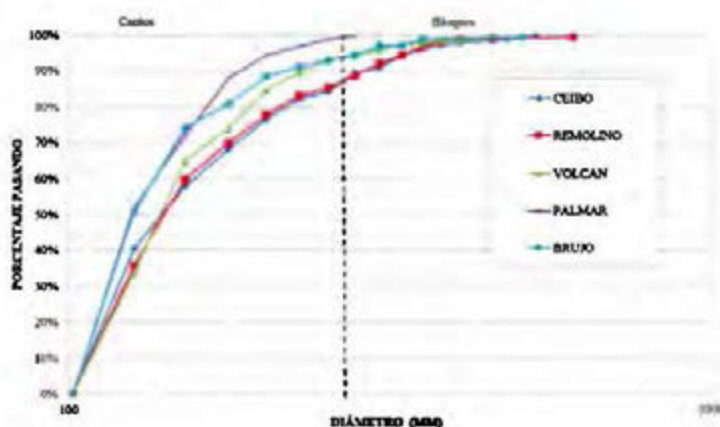
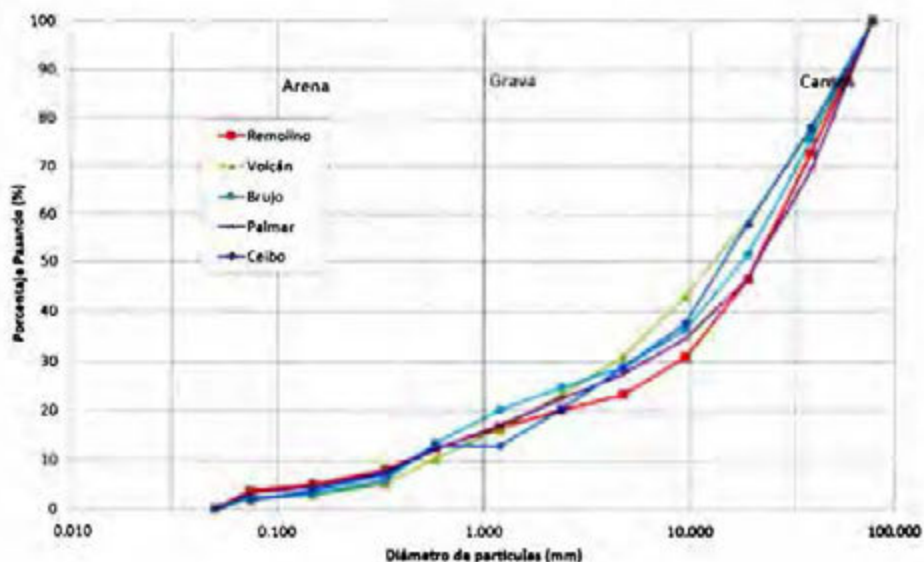


Figura 8-3. Curva granulométrica realizada por el método de Klingeman, material fino (Elaboración propia)



Metodología 2: Granulometría según Wolman (1954)

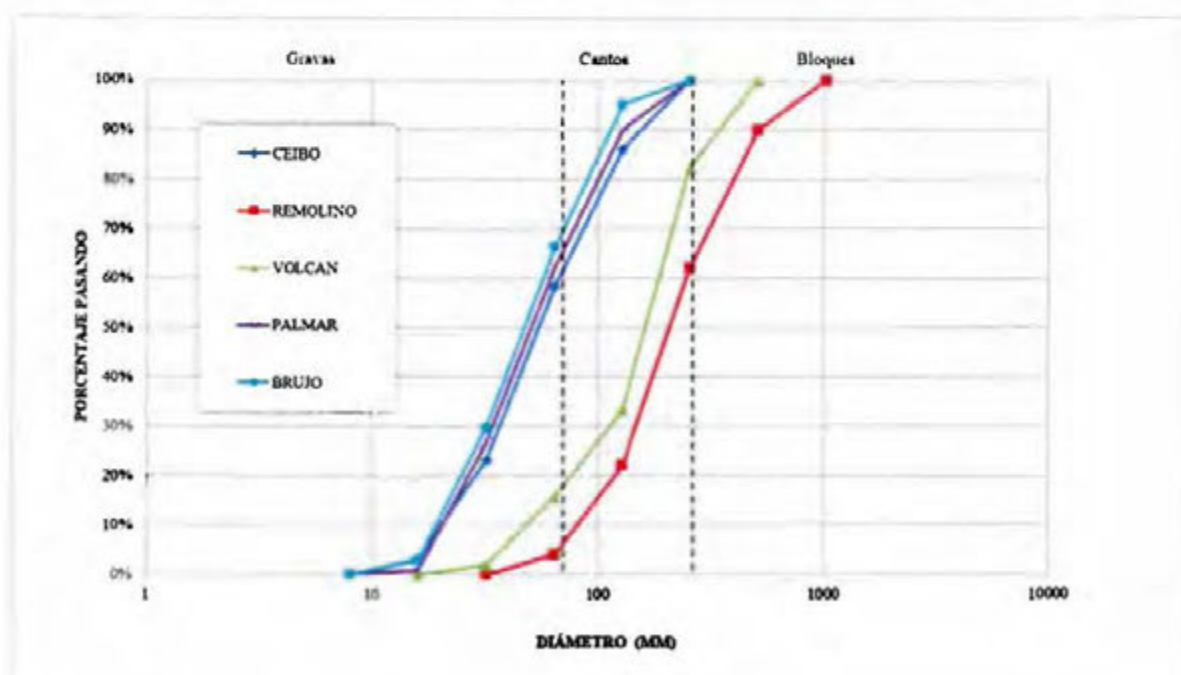
El método indica que se debe seleccionar una muestra aleatoria, las cuales se les debe medir el diámetro de la malla donde la partícula se retiene. Para aplicar este método en todos los sitios se colocó una cinta de 50 m de largo y se midió la partícula que se encontraba cada 50 cm. Como limitaciones de este método se tiene que no considera las partículas finas. También, en campo se notó que cuando el material de la superficie es muy grueso, solo se muestrean las partículas más gruesas porque casi siempre son las que coinciden con la muestra aleatoria y las partículas como gravas se esconden entre las partículas más gruesas, tal como se observa en Figura 8-4. Este es el caso del río General a la altura de la estación hidrológica Remolino. Este método permitió conocer si a lo largo de la barra de sedimento se ubica el mismo tamaño de partícula. Este se realizó en menos de una hora, y se utilizaron dos personas, una que mide el diámetro y la otra anotando el dato.

Figura 8-4. Metodología de Wolman aplicada en la estación Remolino. (Elaboración: Propia)



La metodología Wolman permitió tener una distribución del material entre gravas y bloques. Nótese como cambió la condición con las otras metodologías para el caso de Palmar, ya que la distribución siempre indicó que era un material más fino, sin embargo esta clasificación se pierde y los resultados del método indican similitud en el sedimento de Ceibo, Palmar y Brujo, lo que no es consistente con la realidad observada en campo.

Figura 8-5: Curva granulométrica según el método de Wolman (Elaboración propia)



Metodología 3: Método fotográfico

El método fotográfico es otra variante del método de Wolman, implica tomar una fotografía de la muestra con una escala determinada. Para realizar este tipo de granulometrías se utilizó una cuadrícula de 1m x 1m, la cual se colocó en la barra de sedimento y se le capturó una fotografía, tratando de que quedará lo más paralelo posible para disminuir los efectos de deformación que tienen las fotografías por el ángulo y distancia que se capturaron. Utilizando programa de información geográfica se escaló la fotografía, para eliminar el efecto de deformación. Con ayuda de la malla de referencia se pudo corroborar que el escalado de la fotografía fue bastante preciso.

Con las herramientas del mismo programa de información geográfica a cada partícula de sedimento se le midió el diámetro, el cual se supuso como la dimensión menor que se encontraba en planta. Esta es una limitante de la metodología porque se desconoce si la dimensión que no es visible en la fotografía es la que realmente corresponde al diámetro pasando.

Es importante mencionar que como la fotografía tiene una alta resolución se pudo muestrear partículas menores a 1 cm, y se realizó un esfuerzo por medir todas las partículas que se encontraban dentro del cuadro, siempre y cuando la resolución de la fotografía lo permitía. Esto permitió no separar la muestra y obtener una curva granulométrica desde gravas finas hasta bloques pequeños. La menor partícula que se midió fue de 2 mm y la mayor de 60 cm, en la se puede observar un ejemplo de los resultados obtenidos por el método fotográfico, nótese en la fotografía de derecha como se muestreo partículas de hasta 0.2 mm.

Para este método se invirtió alrededor de 3 horas de trabajo de escritorio una única persona. Sin embargo, hay que considerar el tiempo de traslado para ir al sitio y tomar la fotografía.

Este método permitió obtener la distribución granulométrica desde gravas hasta bloques. Los porcentajes "pasando" para graficar la curva granulométrica se realizaron por conteo. Esto se considera una de las principales adaptaciones que se tuvo que realizar para esta metodología, ya que la distribución de la curva granulométrica está compuesta por un alto porcentaje de gravas, y la cantidad de cantos y bloques es mínima, resultados que no se van a reflejar si calcula la curva granulométrica por peso. Por ejemplo, en la estación Brujo se midió que una sola partícula con un diámetro medio de 20 cm de diámetro pesa 6.80 kg

y se ubican 22 partículas con diámetros entre 5 cm y 7 cm para igualar el mismo peso. Por lo tanto, se considera que los diámetros característicos están bien representados al sacar los porcentajes pasando por conteo, porque si se determinan por peso los diámetros característicos estarán sobrestimados.

El método fotográfico permitió obtener la granulometría entre gravas y bloques, además muestra una congruencia del tamaño de material de las barras de sedimento estudiada

Figura 8-6. Corrección de deformación de fotografía para determinar el tamaño de partículas, por medio de un programa. Medición del tamaño de partícula en la estación Palmar por medio del método fotográfico, las letras indican el diámetro que se identificó y las unidades son cm. (Elaboración propia).

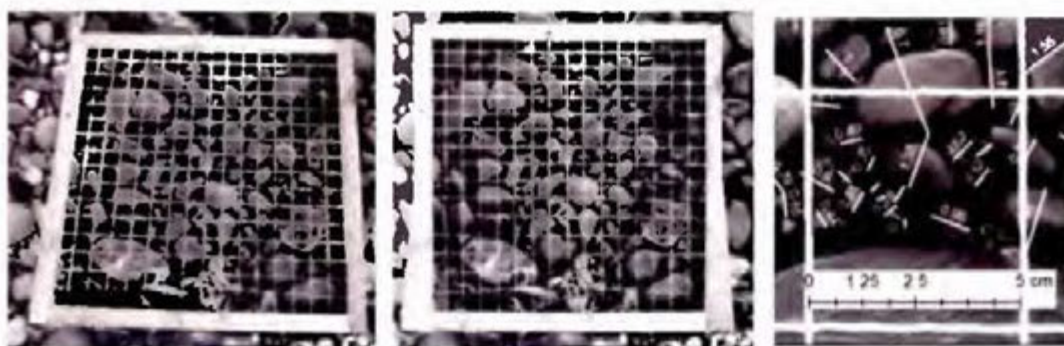
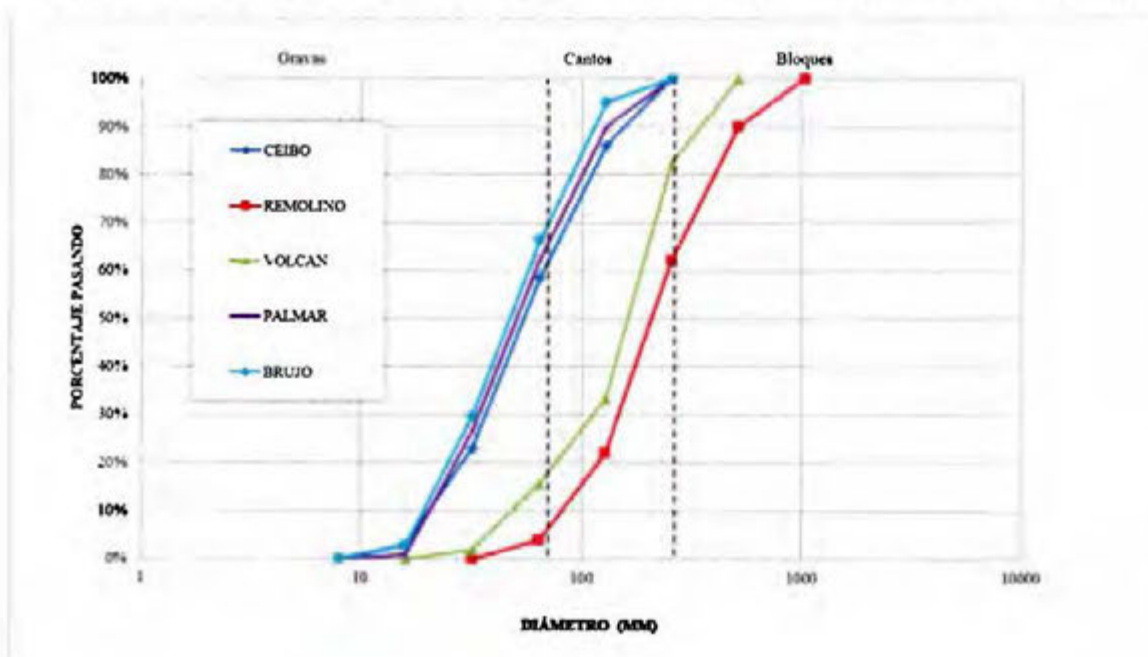


Figura 8-7: Curva granulométrica según el método fotográfico (Elaboración Propia)



En la Tabla 8-1 se indican los diámetros D_{50} y D_{90} para cada metodología y en la Figura 8-8 se grafican las tres metodologías para cada una de las estaciones hidrológicas. Como era de esperarse todas exponen resultados diferentes y los diámetros no se pueden comparar ya que el rango de cada metodología es distinto. En la Tabla 8-2 se hace una recopilación de los alcances, limitaciones y recomendaciones de los muestreos realizados.

Tabla 8-1: D_{50} y D_{90} de las muestras granulométricas, según metodología de muestreo

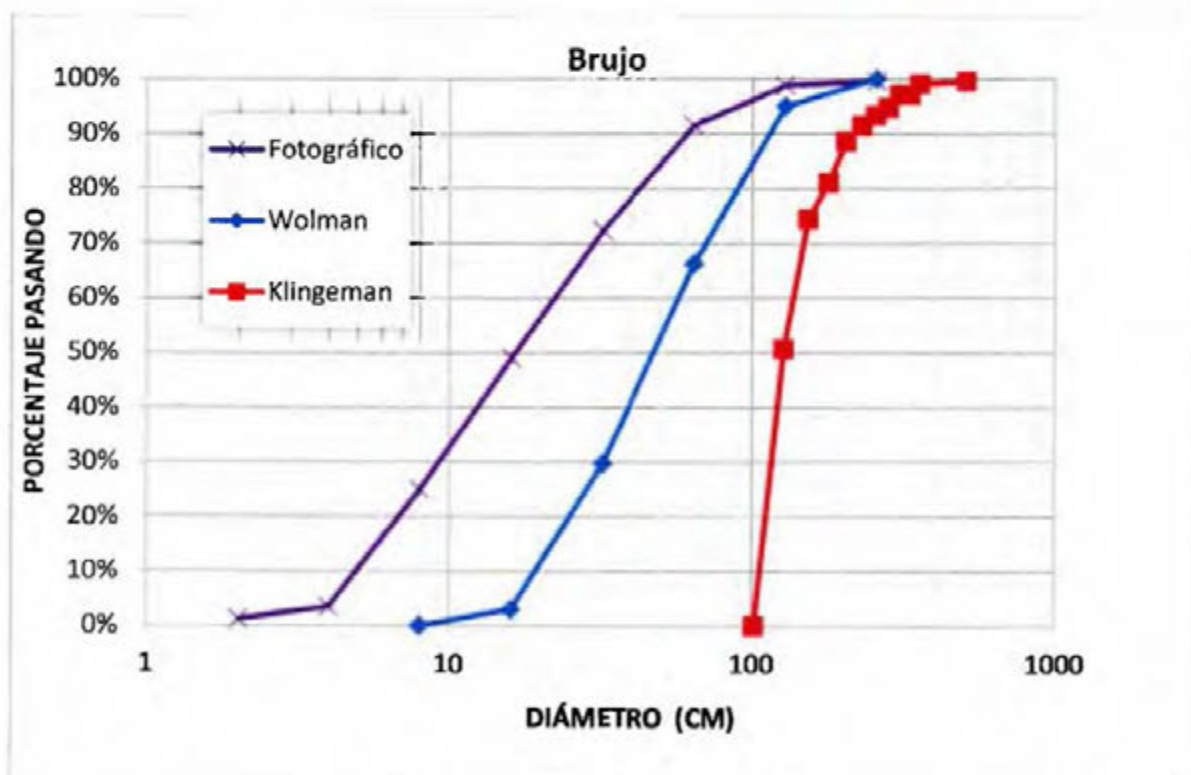
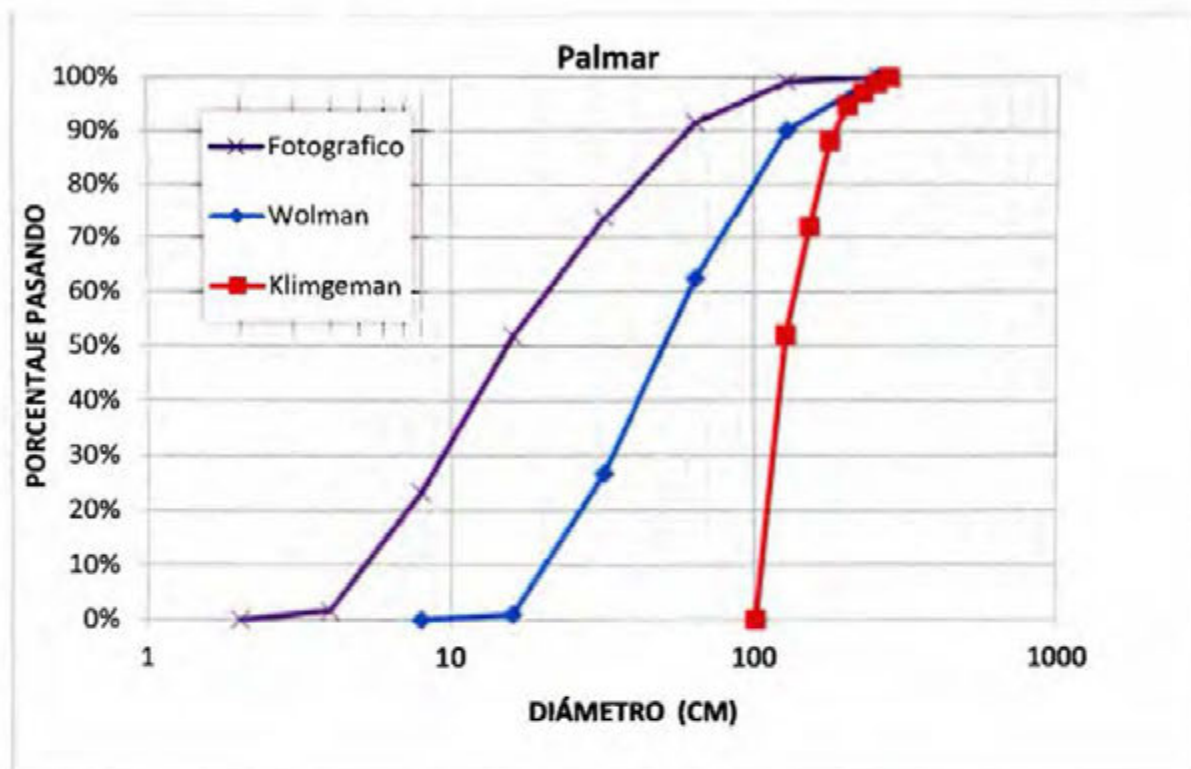
Estación Hidrológica	Método Wolman		de Volumétrico (Material Fino)		Klingeman (Material Grueso)		Fotográfico	
	D_{50} (cm)	D_{90} (cm)	D_{50} (cm)	D_{90} (cm)	D_{50} (cm)	D_{90} (cm)	D_{50} (cm)	D_{90} (cm)
Palmar	5.00	12.00	2.19	6.38	12.60	18.50	3.00	10.30
Brujo	12.42	28.63	1.82	8.75	12.66	21.55	1.80	5.10
Remolino	21.59	50.80	2.16	9.10	14.23	29.24	10.30	12.50
Ceibo	16.23	37.25	1.53	8.76	14.08	28.53	8.40	11.20
Volcán	14.76	27.94	1.39	9.03	14.00	22.86	7.30	10.80

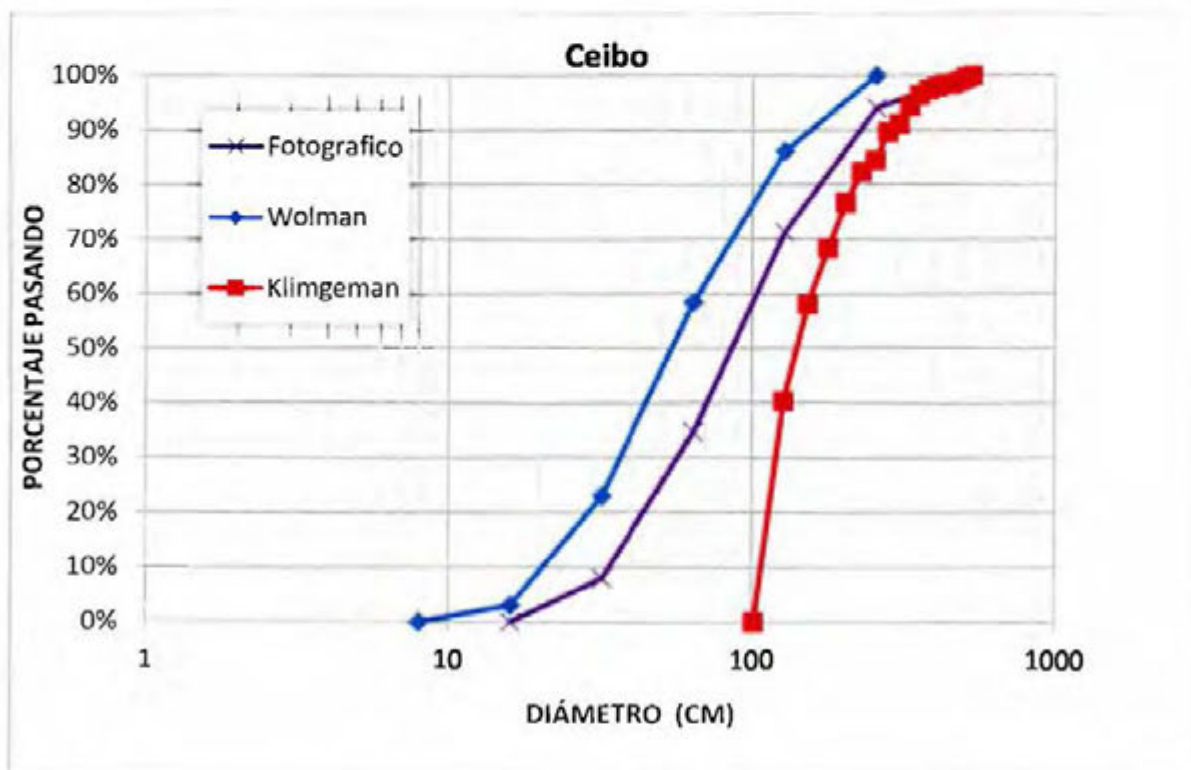
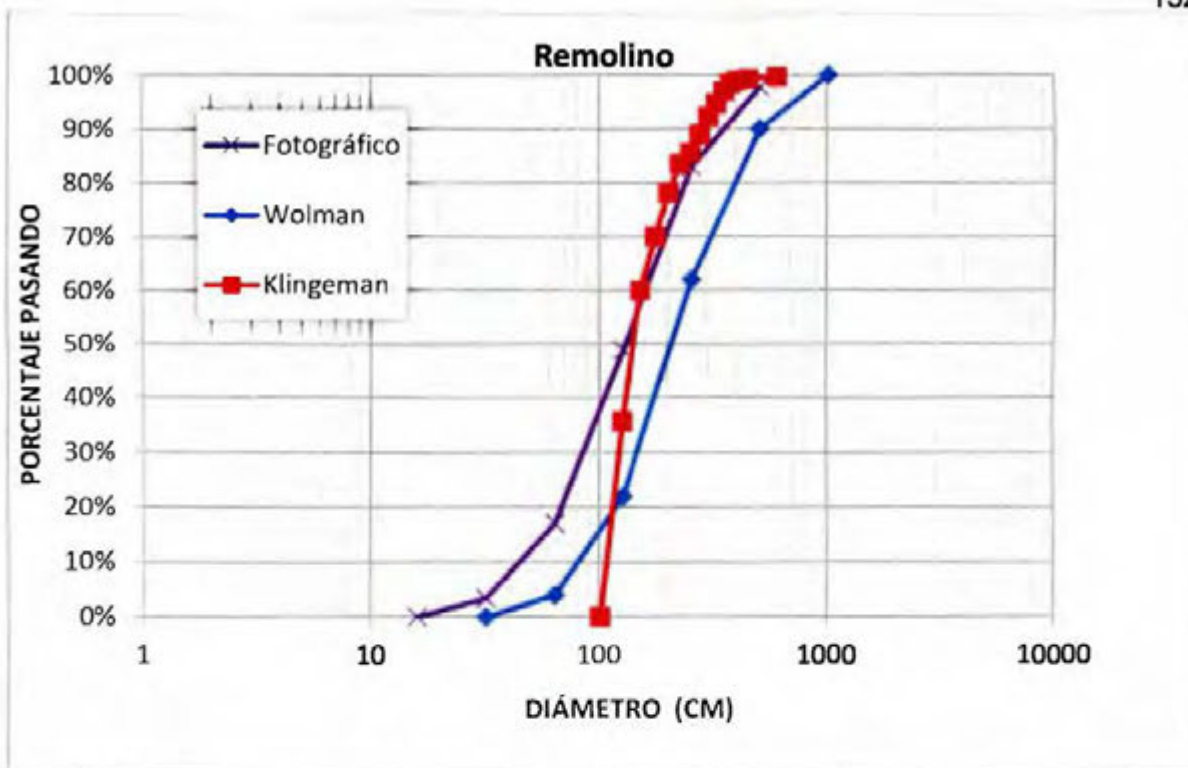
Tabla 8-2: Comparación de algunas características de los muestreos (Fuente: Elaboración propia)

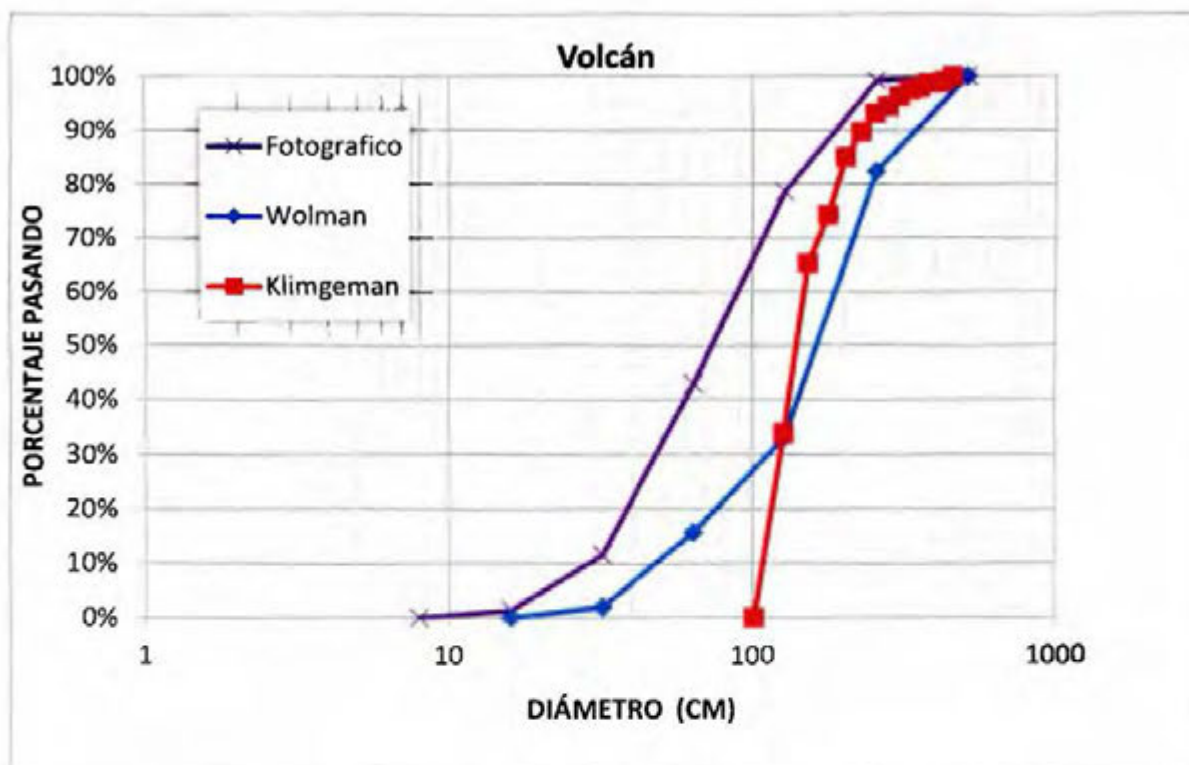
Volumétrico	Conteo	Fotográfico
Muestrea un número determinado de partículas que se encuentran en un espacio localizado	Dependiendo de la metodología se puede muestrear la distribución a lo largo de un río, o un área localizada.	Muestrea un número determinado de partículas que se encuentran en un espacio localizado.
Muestrea arenas gravas, es muy difícil que se tengan mallas para muestrear cantos y bloques.	Muestrea gravas, cantos y bloques, no arena	Muestrea gravas, cantos y bloques, no arenas

Los resultados se representan en términos de peso de la muestra que pasa a través de un determinado tamiz con respecto al peso de la muestra total	Los resultados se representan en términos de la cantidad de partículas que pasa a través de determinado tamiz con respecto a la cantidad total de partículas de toda la muestra	Los resultados se representan en términos de la cantidad de partículas que pasa a través de determinado tamiz con respecto a la cantidad total de partículas de toda la muestra
Trabajo de laboratorio con tiempos extensos.	Trabajo de campo con un tiempo extenso	Trabajo de campo con tiempos cortos, trabajo de escritorio con tiempo extensos.
Es posible compararla y combinarla con conteo y fotográfico, pero hay que realizar una conversión, adicionando incertidumbre.	Es posible compararla y combinarla por volumen, pero hay que realizar una conversión, adicionando incertidumbre.	Es posible compararla y combinarla por volumen, pero hay que realizar una conversión, adicionando incertidumbre.
La medición del diámetro de partícula es bastante precisa, porque el tamizaje se realiza en condiciones de laboratorio, con instrumentación certificada.	Si se utiliza cinta métrica se pierde precisión en la medición del diámetro de la partícula. Es más preciso utilizar gravelómetros o mallas definidas, aunque para bloques esto no es complicado.	Si la fotografía tiene una alta resolución y se escala utilizando algún software, se obtiene precisión. Este método tiene el inconveniente que se debe suponer que el diámetro de partícula es el que se observa en la fotografía como la dimensión menor.
Muestrea el sustrato superior e inferior	Muestrea el sustrato superior	Muestrea el sustrato superior

Figura 9-8. Comparación de las tres metodologías de estimación de las granulometrías del sedimento de fondo por estación hidrológica (Fuente: elaboración propia)







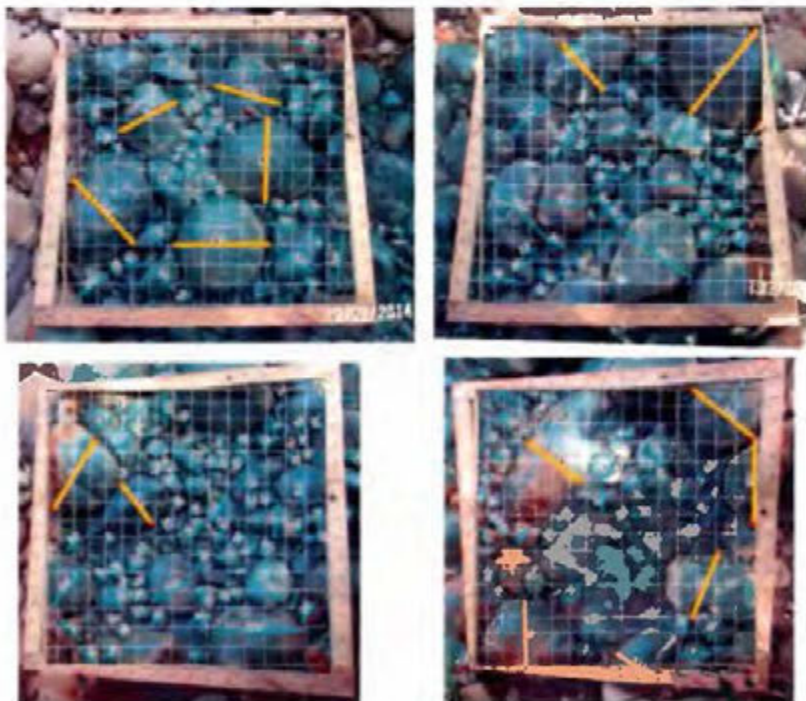
Anexo 2: Resumen del análisis realizado a cada uno de las muestras para identificar las partículas que tuvieron movimiento

Análisis de movilidad de las partículas de sedimento en el río Volcán, Cuadro 1



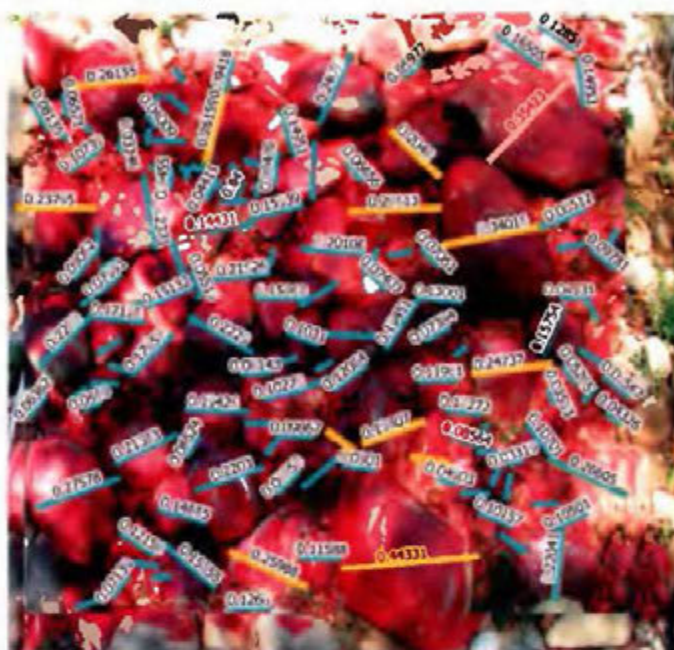
— Se Fueron
— Se Quedo

Análisis de movilidad de las partículas de sedimento en el río Volcán, Cuadro 2

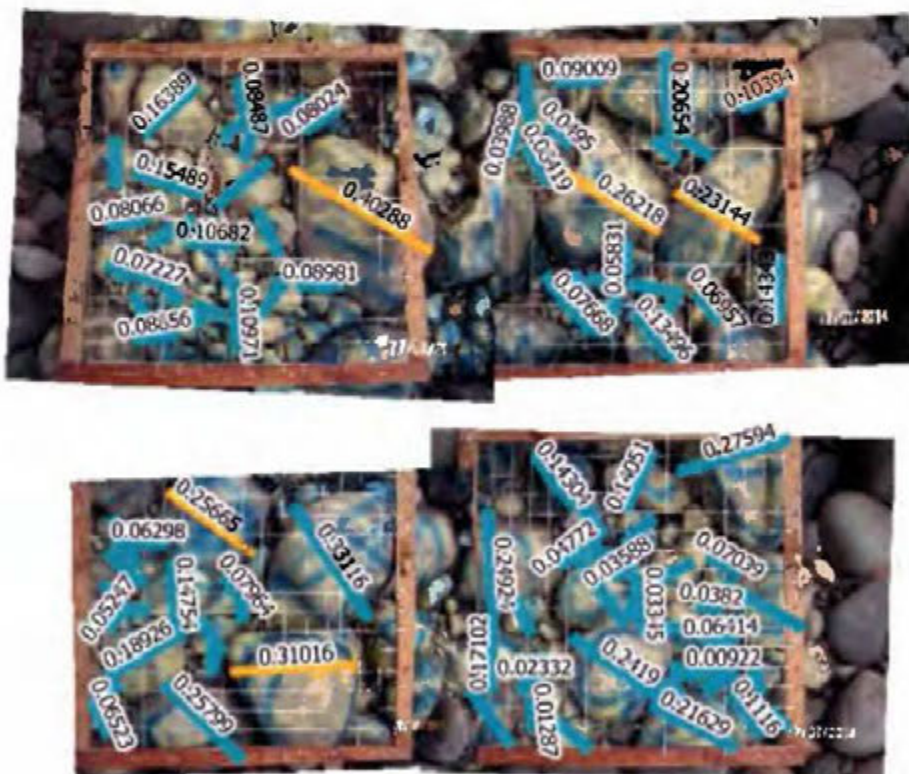


— Se Fueron
— Se Quedo

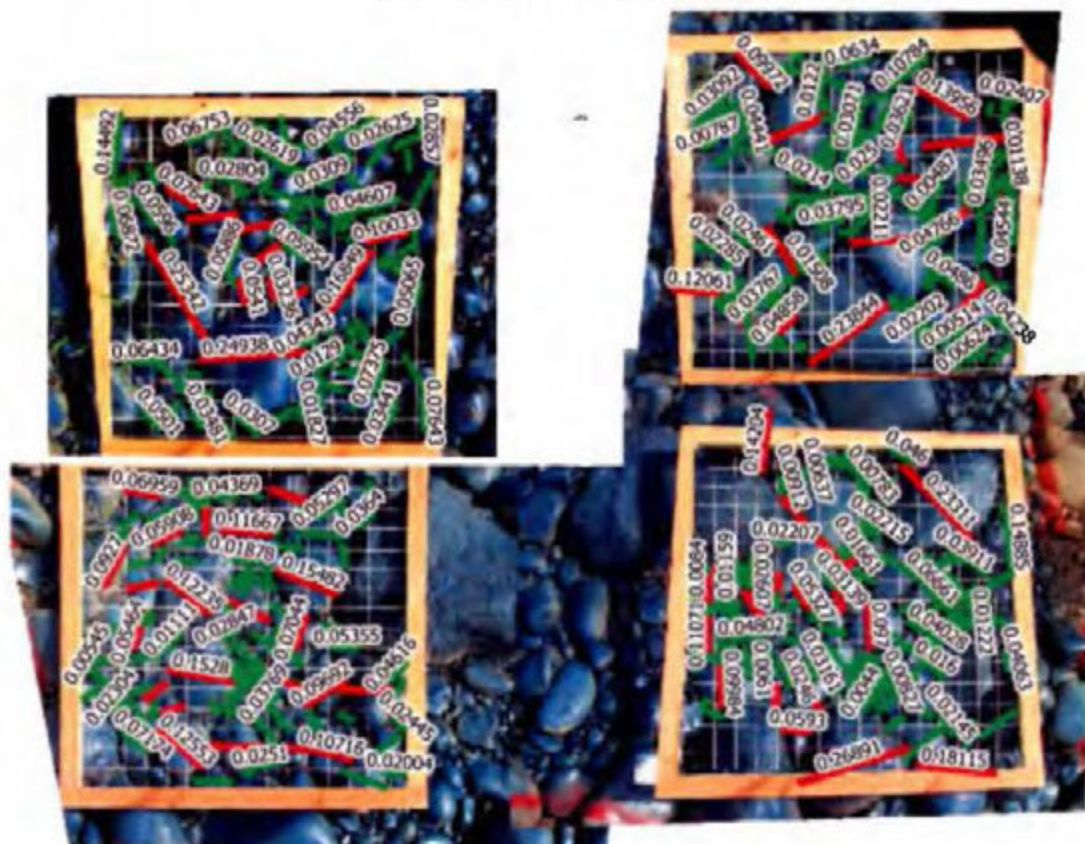
Análisis de movilidad de las partículas de sedimento en el río Ceibo, Cuadro 1



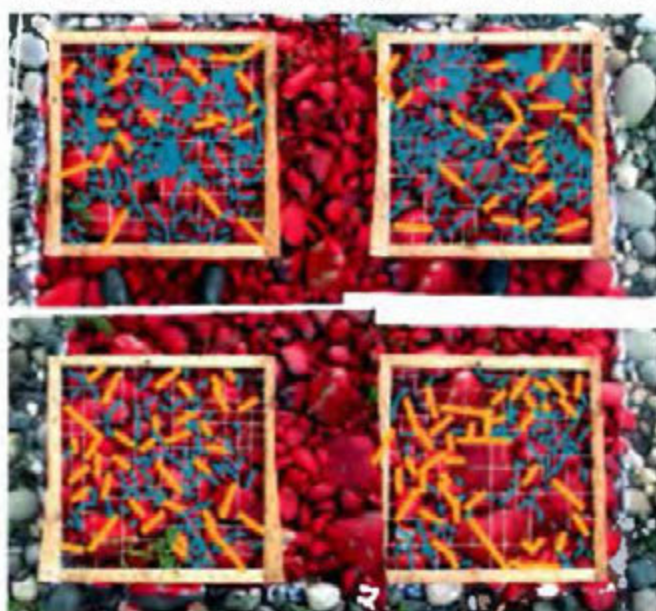
Análisis de movilidad de las partículas de sedimento en el río Ceibo, Cuadro 2



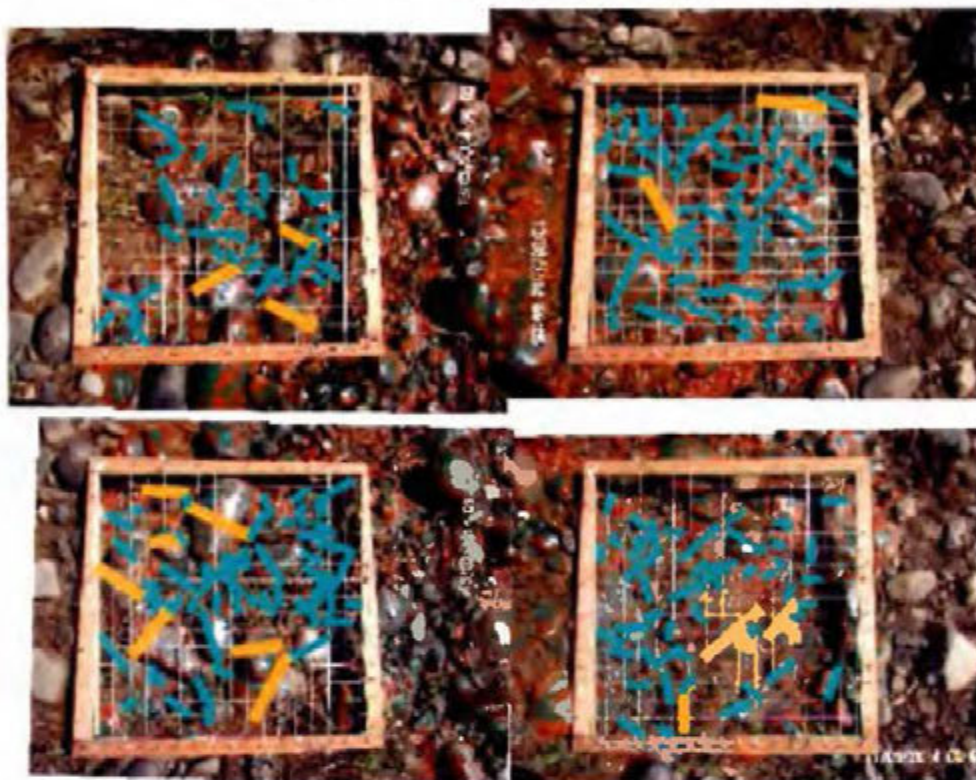
Análisis de movilidad de las partículas de sedimento en el río General, a la altura de la estación hidrológica Brujo, Cuadro 1



Análisis de movilidad de las partículas de sedimento en el río Grande de Térraba, a la altura de la estación Hidrológica Palmar, Cuadro 1



Análisis de movilidad de las partículas de sedimento en el río Grande de Térraba, a la altura de la estación Hidrológica Palmar, Cuadro 2



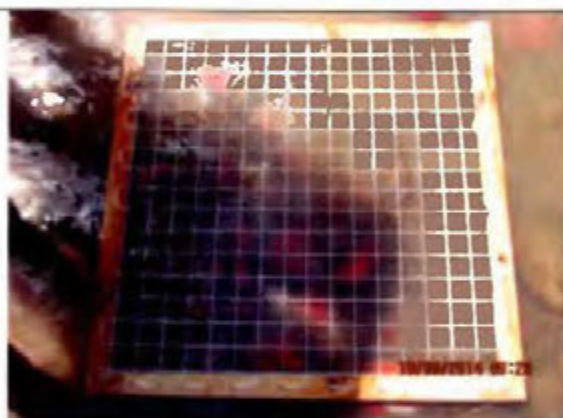
Registro fotográfico de las visitas

PALMAR

PALMAR 02 MAYO 2014



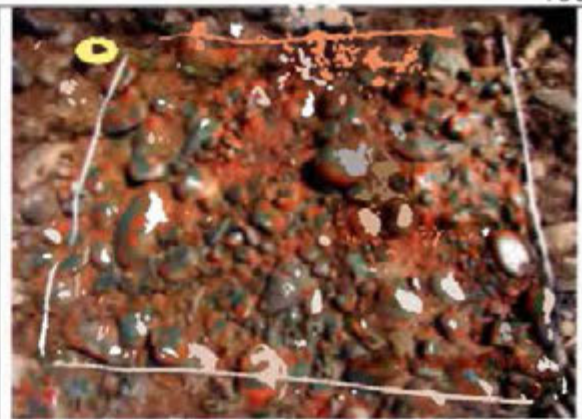
PALMAR 19 JUNIO 2014



PALMAR 17 JULIO 2014



PALMAR 13 AGOSTO 2014



PALMAR 03 SEPTIEMBRE 2014



PALMAR 05 NOVIEMBRE 2014



PALMAR 16 DICIEMBRE 14



BRUJO

BRUJO 02 MAYO 2014



BRUJO 19 JUNIO 2014



BRUJO 17 JULIO 2014



BRUJO 14 AGOSTO 2014



BRUJO 03 SEPTIEMBRE 2014



BRUJO 05 NOVIEMBRE 2014

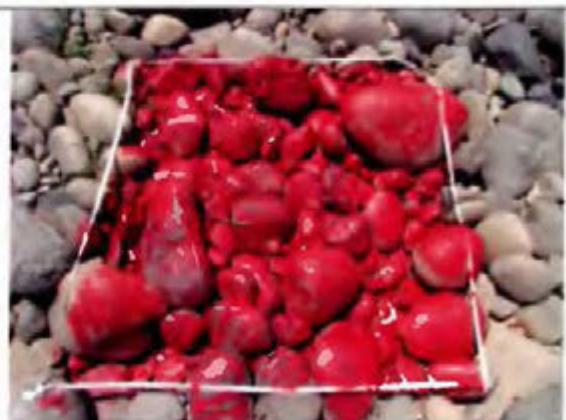


BRUJO 16 DICIEMBRE 2014



REMOLINO

REMOLINO 27 MARZO 2014



REMOLINO 15 MAYO 2014



REMOLINO 26 JUNIO 2014



REMOLINO 17 JULIO 2014



REMOLINO 03 SEPTIEMBRE 2014



REMOLINO 16 DICIEMBRE 2014

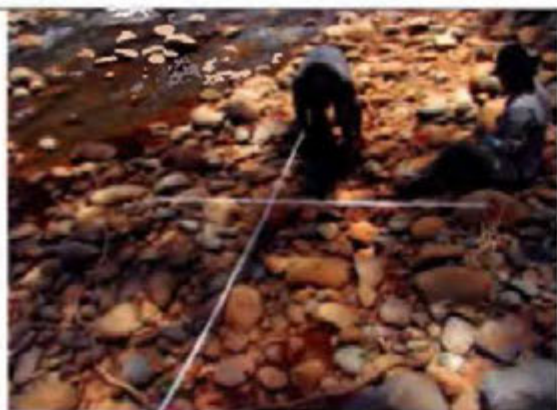


30 ABRIL 2015

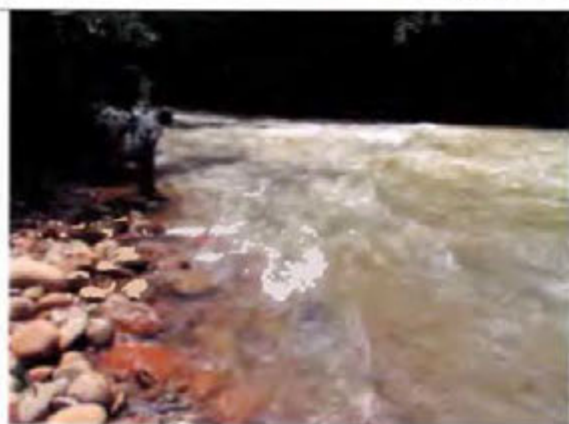


VOLCAN

VOLCÁN 27 MARZO 2014



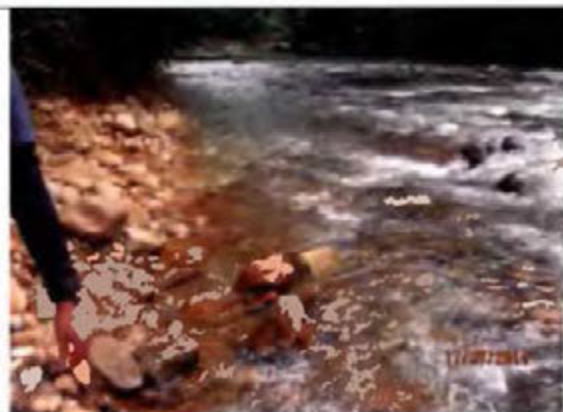
VOLCÁN 15 MAYO 2014



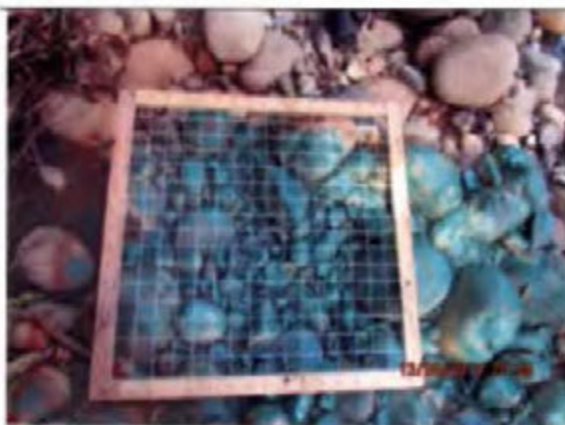
VOLCÁN 26 JUNIO 2014



VOLCÁN 17 JULIO 2014



VOLCÁN 14 AGOSTO 2014



VOLCÁN 03 SEPTIEMBRE 2014



VOLCÁN 01 OCTUBRE 2014



VOLCÁN 05 NOVIEMBRE 2014



VOLCÁN 16 DICIEMBRE 2014



CEIBO

CEIBO 09 ABRIL 2014



CEIBO 15 MAYO 2014



CEIBO 19 JUNIO 2014



CEIBO 17 JULIO 2014



CEIBO 14 AGOSTO 2014



CEIBO 03 SEPTIEMBRE 2014



CEIBO 01 OCTUBRE 2014



CEIBO 05 NOVIEMBRE 2014



CEIBO 19 DICIEMBRE 2014



Anexo 3: Curvas granulométricas del material inicial y movilizado de los cuadros de muestreo.

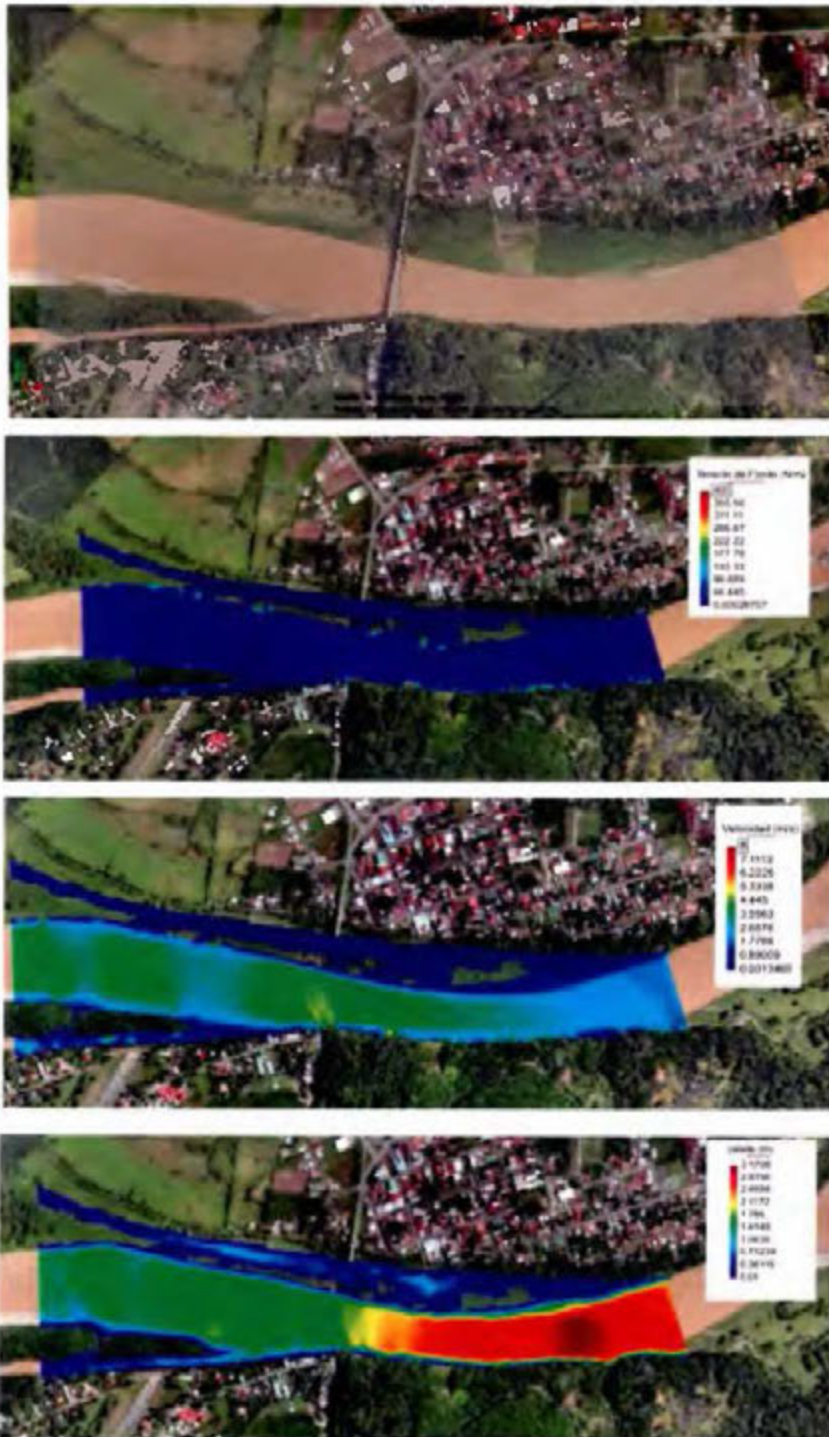
Clasificación	Límite superior (cm)	Volcán		Ceibo		Brujo		Palmar		Remolino
		Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1
		Muestra Inicial								
arena muy gruesa	0.4					1		2		
grava fina	0.8		1		2	20		23		
grava mediana	1.6	1	10		13	44	4	51	10	
grava gruesa	3.2	12	37	8	23	70	24	73	40	3
grava muy gruesa	6.4	43	69	34	50	90	64	90	76	17
cantos pequeños	12.8	79	89	69	78	98	88	99	96	49
cantos largos	25.6	99	99	93	94	100	97	100	100	83
bloques pequeños	51.2	100	100	100	100	100	100			100
		Muestra Movilizada (% pasando)								
arena muy gruesa	0.4		0			1		2		
grava fina	0.8		1		3	21		26		
grava mediana	1.6	1	11		13	48	4	57	11	
grava gruesa	3.2	12	40	9	24	76	25	81	42	4
grava muy gruesa	6.4	43	74	37	52	95	68	97	81	18
cantos pequeños	12.8	79	95	76	82	100	94	100	99	52
cantos largos	25.6	99	100	98	98	100	99		100	88
bloques pequeños	51.2	100	100	100	100		100			100

Anexo 4: Parámetros estadísticos de las muestra inicial y fracción movilizada.

Estación Hidrológica	Muestra Inicial								
	Volcán		Ceibo		Brujo		Palmar		Remolino
	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1
Cantidad	233.0	272.0	154.0	125.0	825.0	168.0	1248.0	253.0	88.0
Promedio	8.8	6.0	11.0	8.6	3.0	7.0	2.6	5.0	16.1
Mediana	7.1	4.0	8.3	6.4	1.9	4.8	1.6	3.9	13.0
Percentil 25	4.7	2.6	5.0	3.6	0.9	3.3	0.8	2.6	8.4
Percentil 75	11.7	7.5	15.0	10.6	3.8	8.7	3.4	6.3	20.7
Desviación estandar	5.8	5.6	7.7	7.7	3.4	6.1	2.7	3.6	11.3
Curtosis	2.5	4.0	0.6	2.8	13.4	6.3	8.5	2.9	2.3
Asimetría	1.4	2.0	1.2	1.6	3.1	2.3	2.4	1.7	1.4
Estación Hidrológica	Fracción Movilizada								
	Volcán		Ceibo		Brujo		Palmar		Remolino
	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1	Cuadro 2	Cuadro 1
Cantidad	235.0	258.0	154.0	125.0	761.0	158.0	1118.0	237.0	83.0
Promedio	8.5	5.1	11.0	8.6	2.4	6.0	2.0	4.4	14.4
Mediana	6.9	3.7	8.3	6.4	1.7	4.7	1.4	3.7	12.7
Percentil 25	4.5	2.4	5.0	3.6	0.9	3.2	0.8	2.5	7.9
Percentil 75	11.4	6.5	15.0	10.6	3.1	7.9	2.7	5.9	19.0
Desviación estándar	5.5	4.2	7.7	7.7	2.1	4.3	1.8	2.8	8.8
Curtosis	1.7	7.0	0.6	2.8	5.7	5.4	5.4	2.8	0.8
Asimetría	1.2	2.3	1.2	1.6	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0

Anexo 5: Salidas de los parámetros hidráulicos modelados

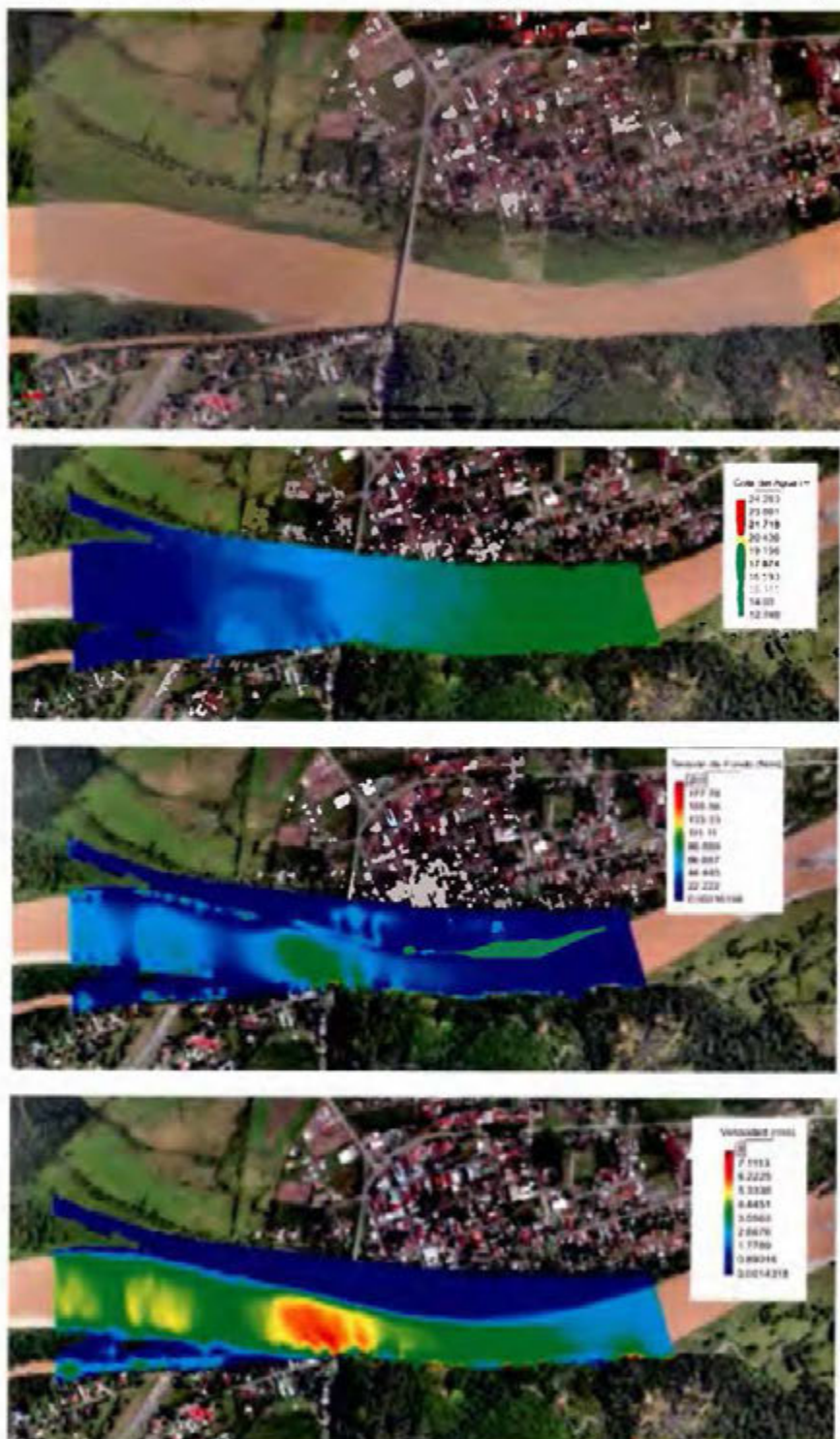
Creciente 1, Palmar: Malla computacional, resultados de mapas de máximos de la cota del Agua (m), calado (m) y tensión de fondo (N^2/s)



Resultados de mapa de máximos Creciente 1, Palmar: Nivel del agua en la estación hidrológica (msnm); tensión de fondo (N/m^2), velocidad del agua (m/s) y profundidad del agua (m) en el Cuadro 1



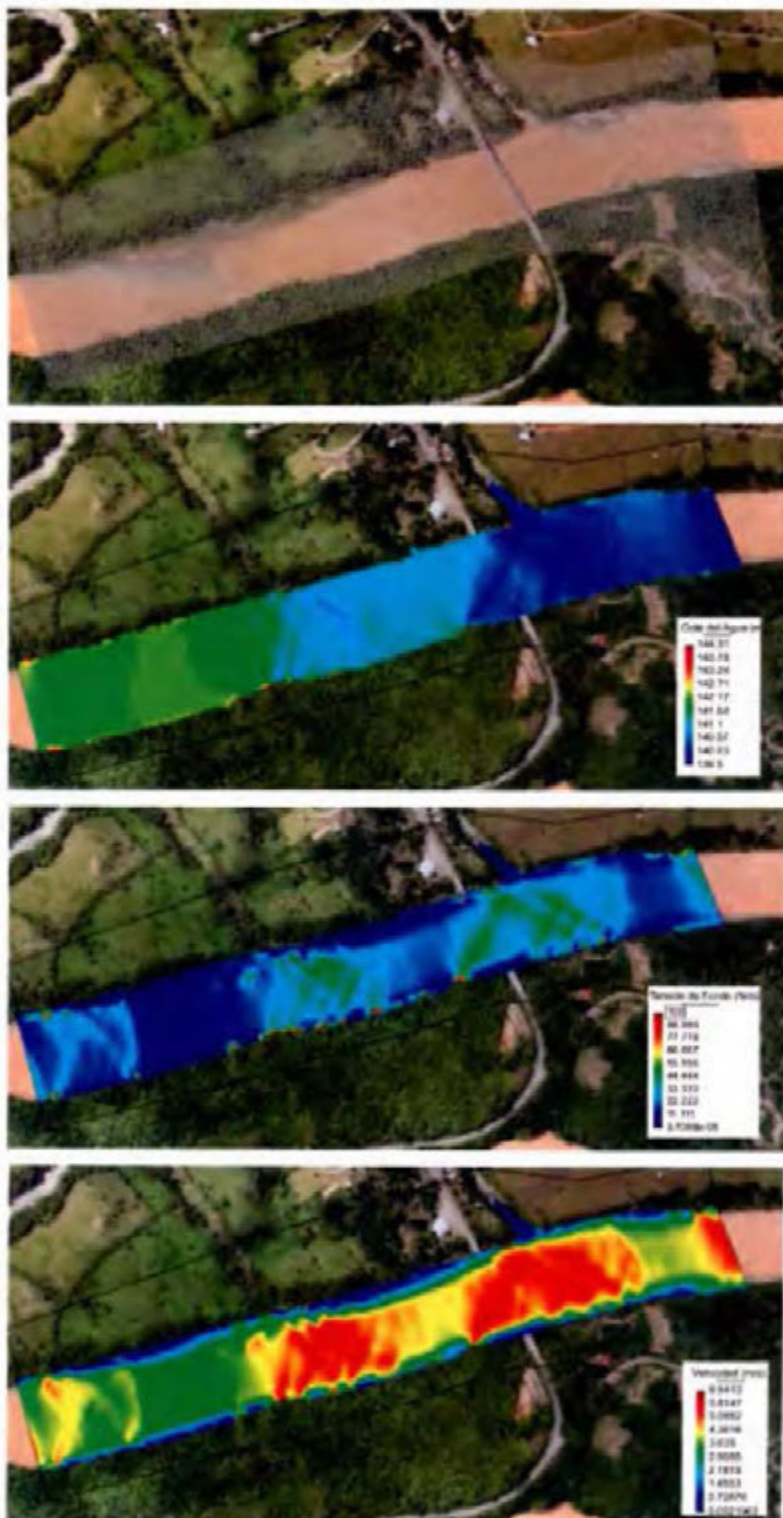
Creciente 2, Palmar: Malla computacional, resultados de mapas de máximos de la cota del agua (msnm), tensión de fondo (N^2/s) y mapa de velocidades (m/s)



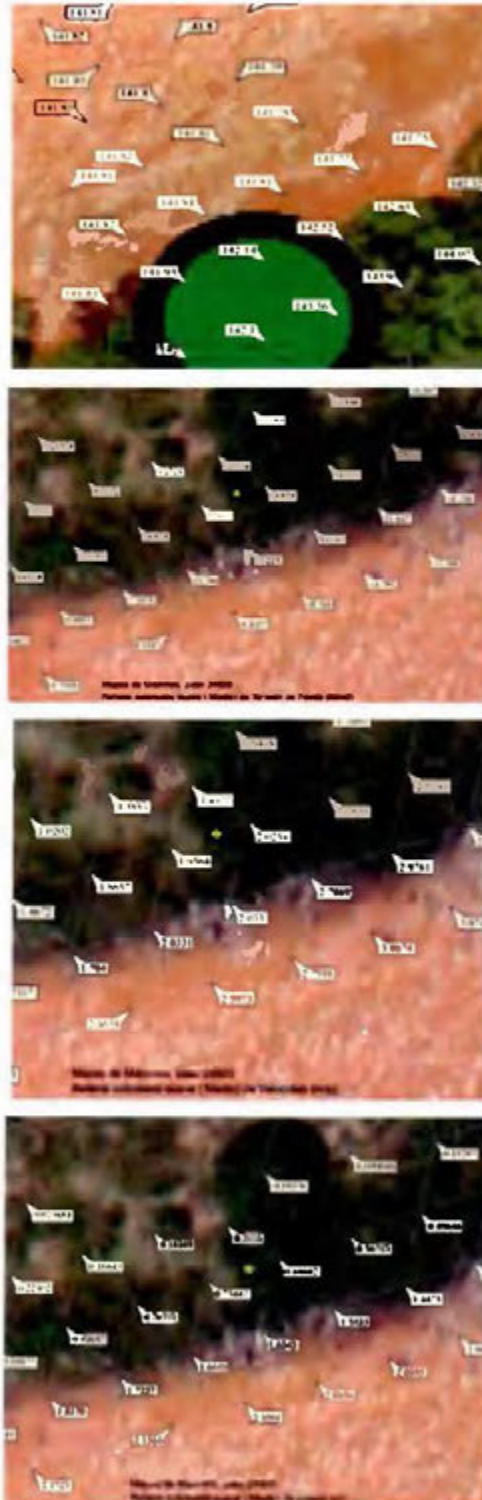
Resultados de mapa de máximos Creciente 2, Palmar: Nivel del agua en la estación hidrológica (msnm); Tensión de fondo (N/m^2), Velocidad del agua (m/s) y profundidad del agua (m) en el Cuadro 2



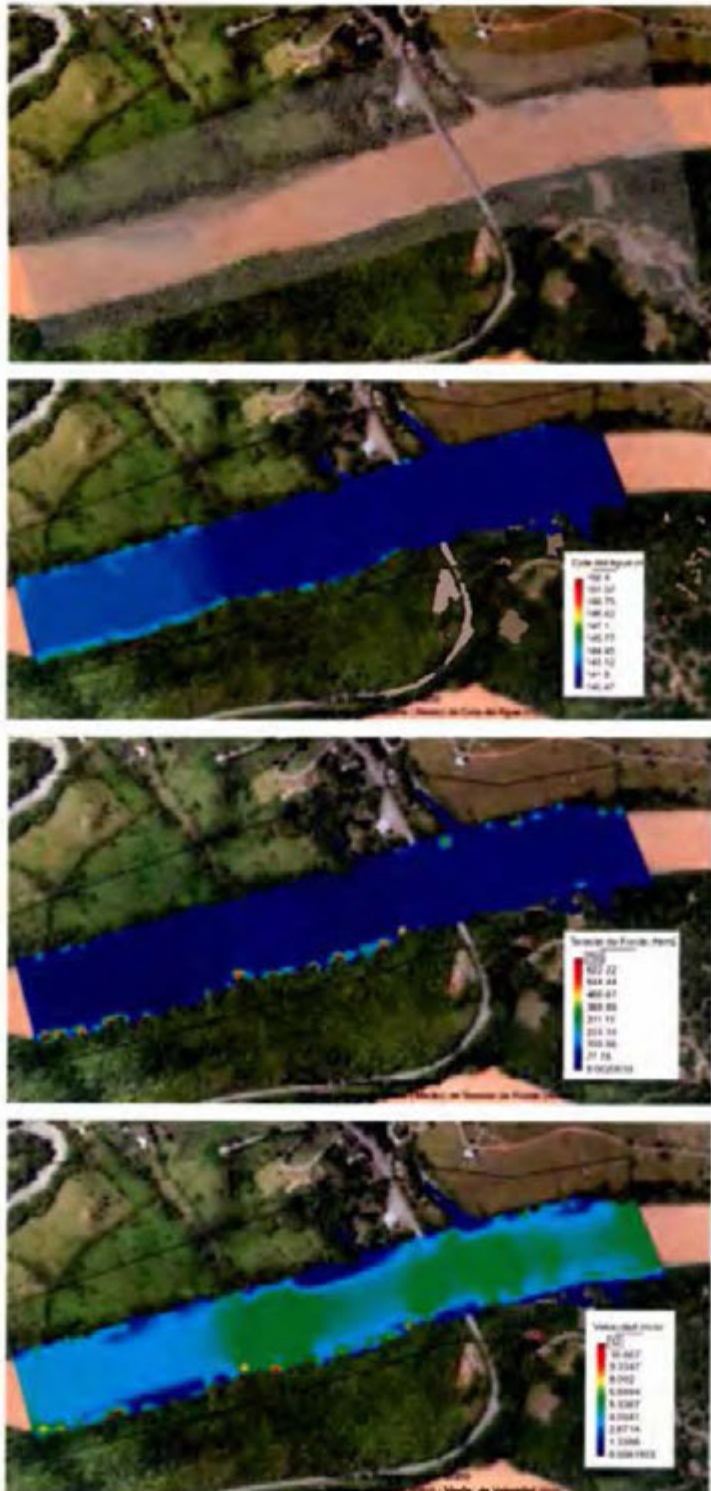
Creciente 1, Brujo: Malla computacional, resultados de mapas de máximos de la cota del Agua (msnm), tensión de fondo (N^2/s) y mapa de velocidades (m/s)



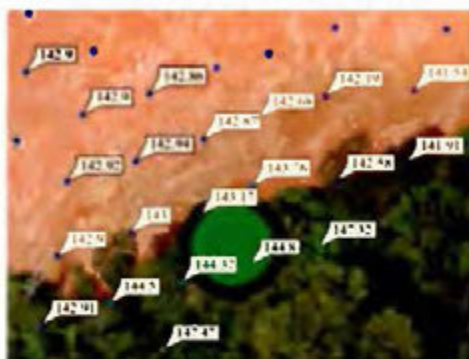
Resultados de mapa de máximos Creciente 1, Brujo: Nivel del agua en la estación hidrológica (msnm); Tensión de fondo (N/m^2), Velocidad del agua (m/s) y profundidad del agua (m) en el Cuadro 1



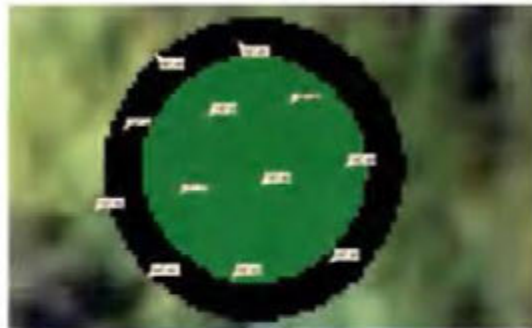
Creciente 2, Brujo: Malla computacional, resultados de mapas de máximos de la cota del Agua (msnm), tensión de fondo (N^2/s) y mapa de velocidades (m/s)



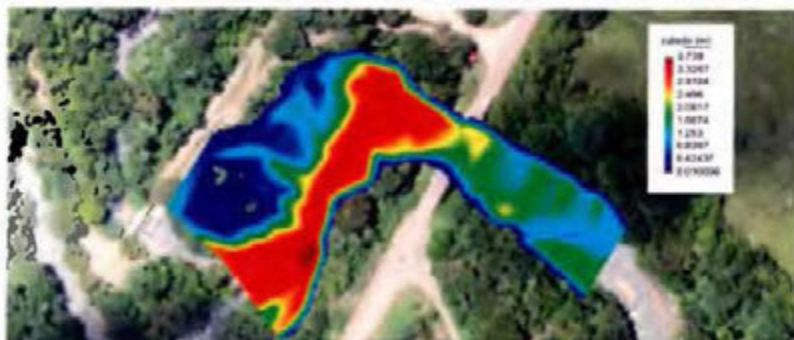
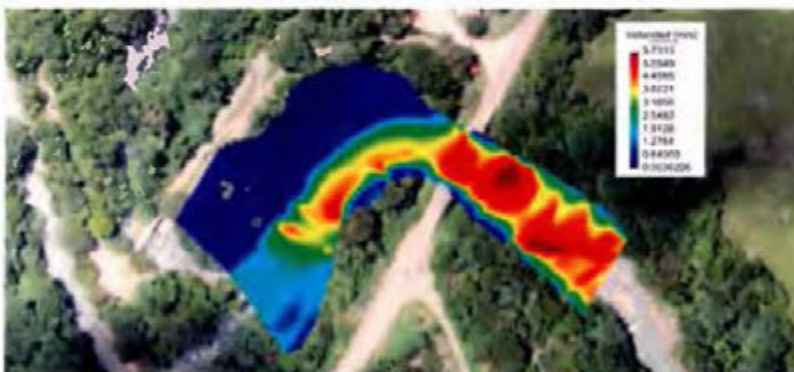
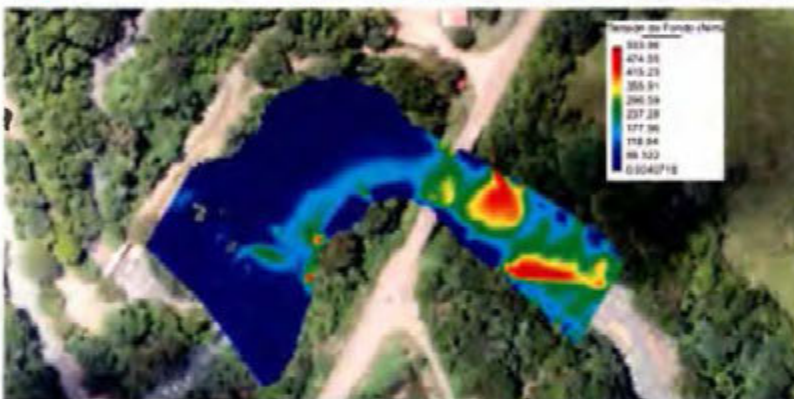
Resultados de mapa de máximos Creciente 2, Brujo: Nivel del agua en la estación hidrológica (msnm); Tensión de fondo (N/m^2), Velocidad del agua (m/s) y profundidad del agua (m) en el Cuadro 2



Resultados de mapa de máximos Creciente 1, Volcán: Nivel del agua en la estación hidrológica (msnm); Tensión de fondo (N/m^2), Velocidad del agua (m/s) y profundidad del agua (m) en el Cuadro 1



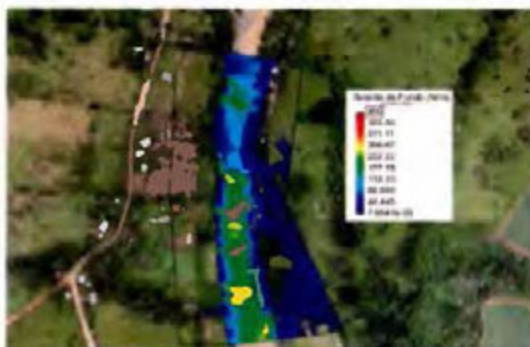
Creciente 2, Volcán Malla computacional, resultados de mapas de máximos de la cota del Agua (msnm), tensión de fondo (N^2/s) y mapa de velocidades (m/s)



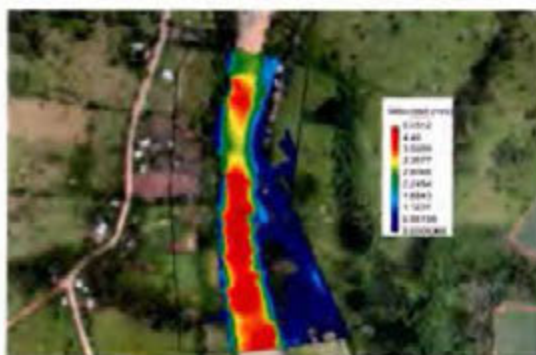
Resultados de mapa de máximos Creciente 2, Volcán: Nivel del agua en la estación hidrológica (msnm); Tensión de fondo (N/m^2), Velocidad del agua (m/s) y profundidad del agua (m) en el Cuadro 2



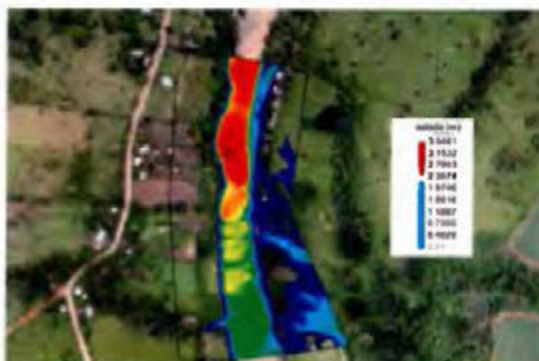
Creciente 2, Ceibo. Malla computacional, resultados de mapas de máximos de la cota del Agua (msnm), tensión de fondo (N^2/s) y mapa de velocidades (m/s)



Mapa de Máximos agua (msnm)
 Rastero automático suavisado (Malla) de Tensión de Fondo (msnm)



Mapa de Máximos agua (msnm)
 Rastero automático suavisado (Malla) de Tensión de Fondo (msnm)



Mapa de Máximos agua (msnm)
 Rastero automático suavisado (Malla) de Tensión de Fondo (msnm)

Resultados de mapa de máximos Creciente 2, Ceibo: Nivel del agua en la estación hidrológica (msnm); Tensión de fondo (N/m^2), Velocidad del agua (m/s) y profundidad de agua (m) en el Cuadro 2

