

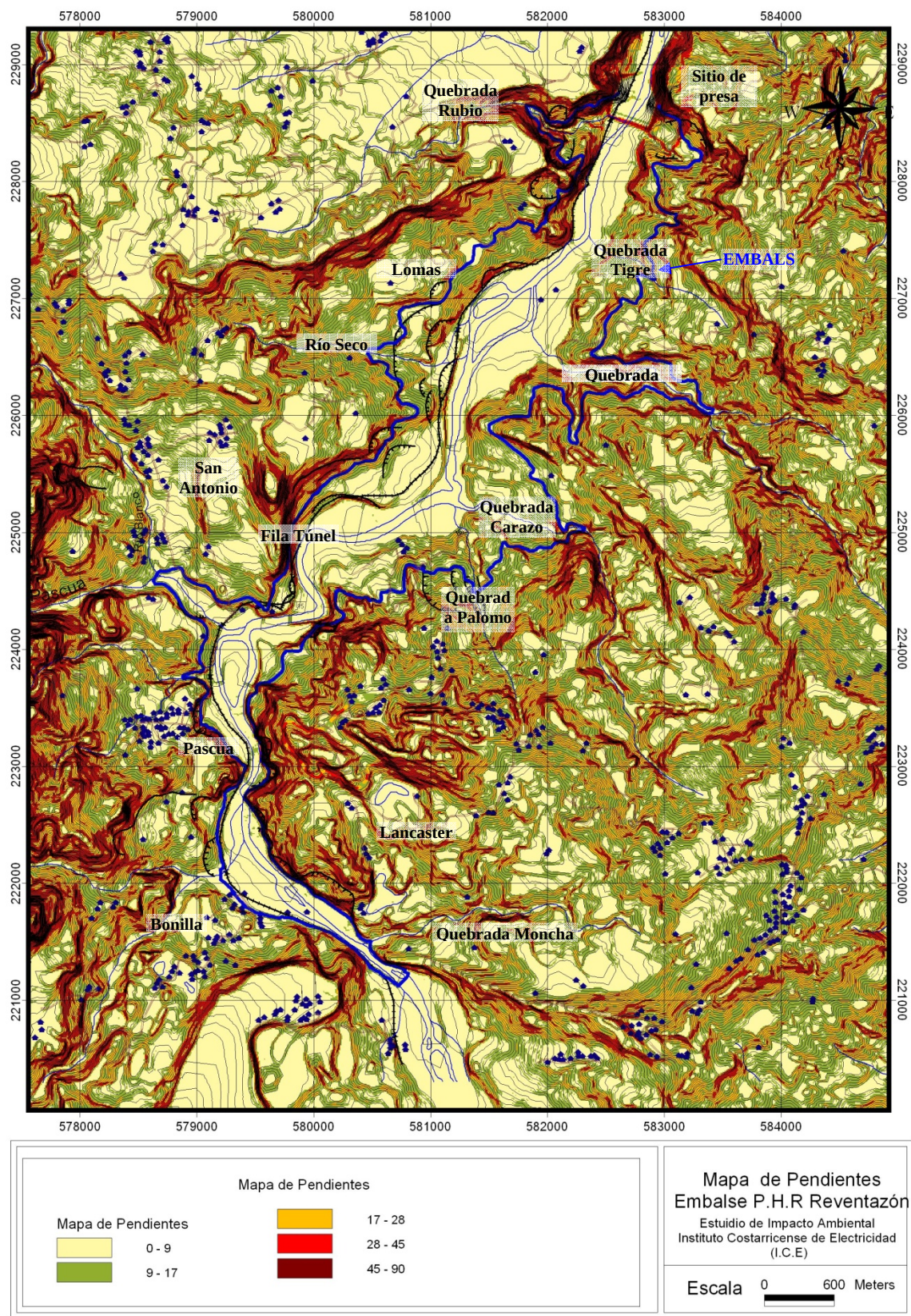


Figura 7.1.26 Mapa de pendientes

Mapa de susceptibilidad a movimientos

El análisis de susceptibilidad a movimientos del terreno fue realizado tomando el criterio general de campo y observación detallada de zonas inestables, el análisis se basa en 4 parámetros fundamentales como son la condición de estabilidad de suelos y unidades de roca, representadas por las diferentes unidades geológicas, zonas de fallamiento, pendientes y el inventario de deslizamientos realizado.

El mapa se hizo con la suma de los 4 parámetros antes indicados obteniendo 5 categorías o rangos de clasificación, los cuales se describen a continuación. Este método consistió en una sumatoria de los parámetros según las condiciones y evaluaciones realizadas para cada zona del área de embalse y procesadas en sistemas de información geográfico, hay ciertas condiciones como vegetación y lluvia que no se consideran determinantes para la condición de susceptibilidad pero si factores que pueden acelerar la vulnerabilidad y disparar deslizamientos.

Cuadro 7.1.26.
Clasificación de la susceptibilidad

Susceptibilidad	Características tomadas en Cuenta	Color de Referencia
Muy Baja	Zonas con pendientes menores de 9°, en depósitos volcánicos recientes consolidados, rocas sedimentarias de mejor consistencia sin presencia de fallamiento, con ningún deslizamiento registrado por movimiento de masas.	
Baja	Zonas con pendientes entre 9° y 17°, en depósitos volcánicos, brechas, y rocas sedimentarias poco meteorizadas, se presentan zonas de fallamiento, con pocos deslizamientos registrados, algunos paleodeslizamientos	
Moderada	Zonas con pendientes entre 17° y 28°, en depósitos coluviales y rocas sedimentarias de baja calidad, se presentan zonas de fallamiento con registro de deslizamientos moderados en los alrededores y zonas inestables con potencial deslizamiento, así como paleodeslizamientos	
Alta	Zonas con pendientes entre 28 y 45°, en depósitos coluviales, lahares, hasta rocas ígneas que presentan alto grado de fracturamiento, se localizan zonas de fallamiento con registro de deslizamientos por desmoronamientos y desprendimientos de roca, deslizamientos rotacionales	
Muy Alta	Zonas con pendientes mayores a 45°, en lahares hasta rocas ígneas que presentan alto grado de fracturamiento, en zonas de fallamiento, con registro de deslizamientos por desmoronamientos y desprendimientos, algunos deslizamientos rotacionales característicos con presencia de nacientes y niveles de agua freática.	

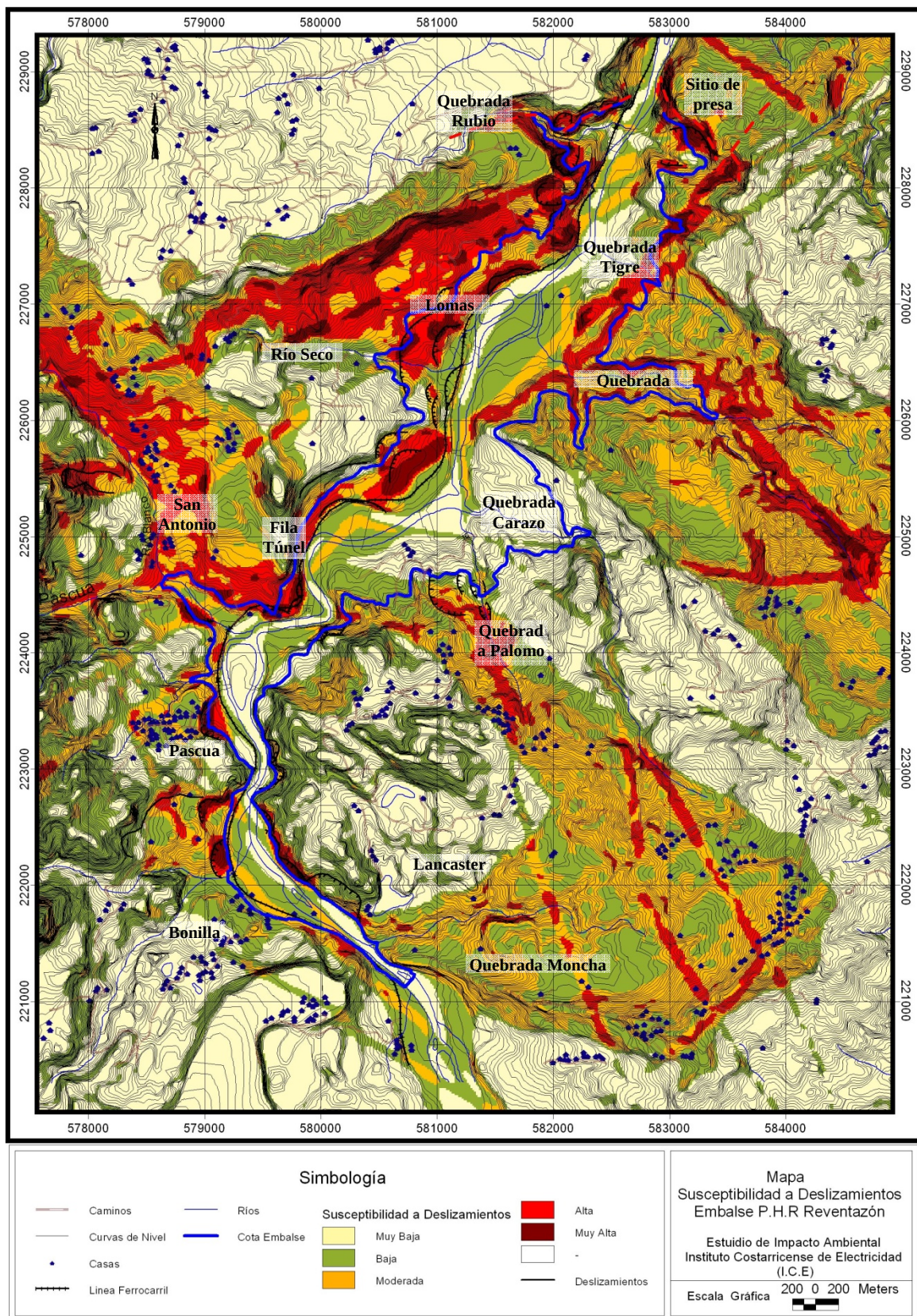


Figura 7.1.27 Mapa de susceptibilidad

Efecto sobre las comunidades

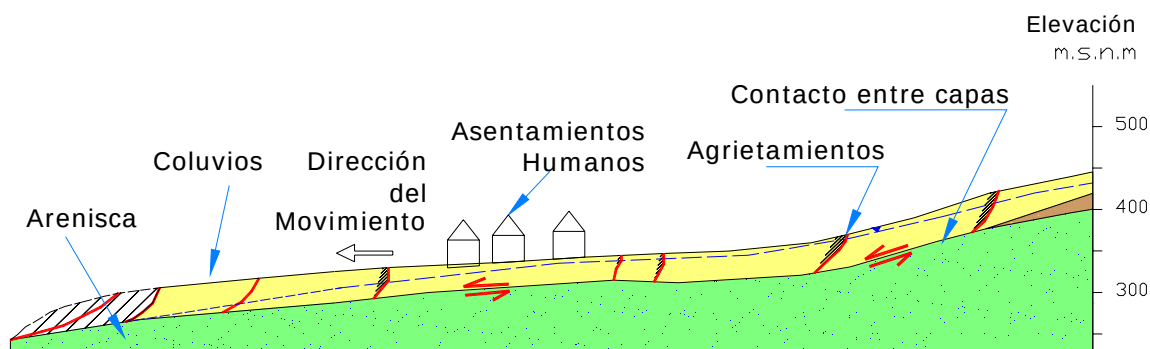
A lo largo del trabajo y basándose en los resultados obtenidos se presentan zonas con moderado a alto potencial de deslizamiento donde se asientan poblaciones importantes. A continuación se listan los principales sitios que se ven afectados:

San Antonio de Pascua

Esta zona se caracteriza por sufrir movimientos que actualmente se encuentran activos. Es común ver en los alrededores de la cuenca del río Blanco, donde se localiza la comunidad, desprendimientos de gran magnitud que han contribuido a formar depósitos inconsolidados. Estos a su vez se localizan sobre una discontinuidad generada por estratos de arenisca altamente meteorizados buzantes al Sur y que generan un plano de inestabilidad (buzamiento desfavorable). La comunidad se encuentra construida en su totalidad sobre estos depósitos. Es común encontrar evidencias de reptación, erosión y deslizamientos en la base del depósito. Los movimientos observados en muchos de los casos son muy lentos pero la combinación de la acción sísmica con las lluvias puede cambiar drásticamente el régimen del movimiento.

El buzamiento desfavorable del contacto entre los distintos materiales aunado al aumento de peso por saturación de las capas superficiales, genera reptación y traslación de las mismas. Este fenómeno se ilustra en la figura 7.1.28 y la fotografía 7.1.12.

Figura 7.1.28
Esquema de los movimientos que sufre San Antonio de Pascua



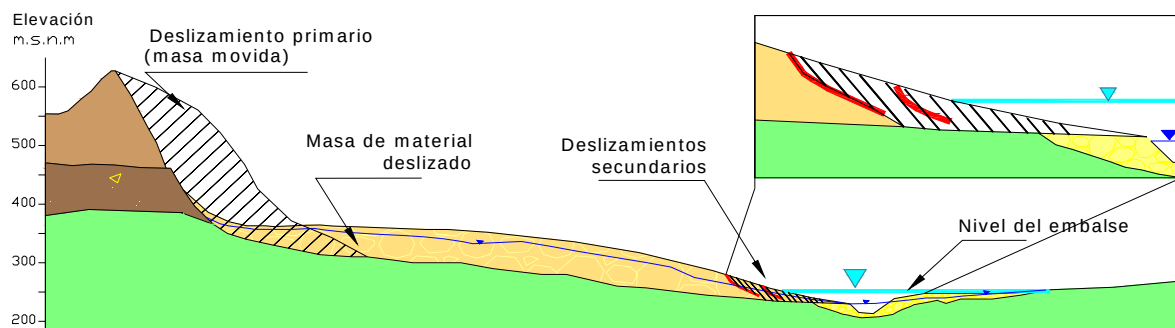
Fotografía 7.1.12.
Contacto entre coluvios y arenisca en San Antonio de Pascua



Lomas

Con el cierre del ferrocarril gran parte de la comunidad de Las Lomas se trasladó a un sitio fuera del área de influencia del embalse. Sin embargo, aún quedan algunas casas habitadas localizadas sobre el material depositado al pie de la falla. La pendiente de la superficie de los depósitos no es alta, no obstante la susceptibilidad es moderada a alta. El plano de contacto entre los depósitos y el material subyacente tiene una pendiente desfavorable, situación que favorece la erosión del pie y los movimientos de carácter secundario tal y como se ilustra en la siguiente figura 7.1.29:

Figura 7.1.29
Esquema de los movimientos que afectan el sector de Lomas (vista hacia aguas abajo)





Fotografía 7.1.13. Vista hacia aguas arriba de la falla Lomas

Cabe destacar que los movimientos sufridos a lo largo de la falla Lomas están bien documentados tal y como se detallado en los antecedentes de este estudio.

Pascua

La zona problemática se localiza en el sector más cercano al río, donde la pendiente varía de media a alta y la susceptibilidad es alta. Los movimientos se dan principalmente por el efecto erosivo del río al pie del talud y afecta solo a unas cuantas casas alejadas del centro del poblado.

Estanqueidad

En lo referente a estanqueidad del embalse, los estudios pertinentes están siendo desarrollados a la fecha, no obstante en lo relativo a las comunidades cercanas al sector se puede asegurar que la capacidad de estanqueidad del reservorio no afecta de ninguna manera vidas humanas o estructuras civiles rurales ni pone en riesgo los terrenos del entorno

Conclusiones

Los movimientos del terreno que afectan las comunidades aledañas al embalse del P. H. Reventazón son generados por factores ajenos a la influencia que puede generar la construcción de un embalse.

Los deslizamientos han sido una característica que han identificado la cuenca del Río Reventazón, los registros del “Catálogo de deslizamientos históricos para Costa Rica” del periodo comprendido entre 1772 al 1960, deja en evidencia este problema. Es importante aclarar que muchos de estos datos se recopilaron durante la construcción y operación del Ferrocarril al Atlántico, por lo que su énfasis es sobre la afectación de la margen izquierda. No obstante, las evidencias encontradas en la margen derecha sugieren un comportamiento similar respecto a la estabilidad de las laderas, por ejemplo, existen grandes deslizamientos que han afectado la carretera que comunica la ciudad de Turrialba con Siquirres.

Los efectos erosivos del Río Reventazón y sus afluentes han debilitado las zonas bajas de los taludes, generando una serie de deslizamientos de alto ángulo y de poca

profundidad como los localizados al pie de la comunidad de Pascua y en la zona de Lancaster. Este fenómeno también lo sufren las partes bajas de los depósitos conformados por deslizamientos antiguos donde el material depositado tiene una estructura muy abierta, por lo que es fácilmente erosionable, esto se puede observar claramente en los depósitos de la Falla Lomas y en la Fila Túnel.

Otro aspecto que ha favorecido la inestabilidad son las excavaciones llevadas a cabo para la construcción de la línea del ferrocarril. En este caso, los cortes dejaron al descubierto espesores importantes de coluvios y/o de materiales con características físico mecánicas pobres; los que posteriormente bajo el efecto de las lluvias se movilizaron dejando inhabilitada la ruta. Estos movimientos adicionalmente generaron erosión en los taludes inferiores de la vía, y posteriormente provocaron nuevos deslizamientos que incluyeron la fundación de la línea y la formación de un nuevo paramento inestable al pie de las laderas excavadas.

La deforestación es un aspecto que ha contribuido a la inestabilidad de capas superficiales y a la producción de sedimentos, estos a su vez aumentaron el efecto erosivo de los ríos.

Siendo el agua el principal elemento disparador de deslizamientos, es de esperar que las medidas de mitigación que se deben implementar tengan que ver con el manejo de la misma. De esta manera la construcción de cunetas revestidas puede colaborar a la disminución de la saturación del medio, mientras que la construcción de drenajes perforados disminuiría el efecto de las aguas subterráneas. Por otra parte, la construcción de muros de contención que permitan el drenaje puede aplicarse a los deslizamientos traslacionales en combinación con el manejo superficial de aguas.

Finalmente se hace hincapié en el hecho de que los deslizamientos en la zona del embalse siempre han existido y que más bien son estos los que ejercen una influencia sobre el embalse.

7.2 Geomorfología

Se consideró un área de 174.39 km² que corresponde a un sector de la cuenca del Río Reventazón en el sector del curso medio inferior, donde solo se consideran los principales afluentes y tributarios para la cuenca que abastece el Proyecto Reventazón.

Cartográficamente el área se ubica entre las hojas escala 1: 50 000 del IGN Tucurrique y Bonilla, de las cuales un 70 % de la cuenca definida se ubica en esta última hoja.

Los límites del área en estudio están definidos hacia el Suroeste (SO) el límite interior de la subcuenca del río Bonilla donde su punto más elevado al Este lo forma la cima del Volcán Turrialba. En el Sur los interfluvios que separan la subcuenca del río Lajas de los tributarios de la cuenca en estudio. Hacia el Sureste (SE) el Alto Pilón de Azúcar y al Este las estribaciones que forman la divisoria de aguas entre las cuencas del Río Reventazón y Río Pacuare.

El rango de elevación para la cuenca en estudio va de los 2980 m.s.n.m. a los 100 m.s.n.m. donde la máxima elevación se ubica en la Fila Bonilla y es parte de la cima del Volcán Turrialba. El sitio más bajo se localiza en la planicie aluvial del Río Reventazón cercano a la población de Siquirres.

El río Reventazón corre entre las formaciones litológicas volcánicas del cuaternario y las formaciones del vulcanismo pliocénico o terciario del aguacate, y corta estas formaciones así como series sedimentarias Terciarias que afloran en las riberas cercanas a su lecho mayor. (Bergoeing, 2007).

Esta condición hace que se pueda diferenciar dos grandes unidades morfológicas montañosas. En las laderas de la izquierda del río reventazón dominan las geoformas volcánicas recientes o del cuaternario. Las laderas de la margen derecha la geoforma dominante corresponde a relieves colinados denudacionales.

Entre el curso medio inferior y el curso inferior del río Reventazón se pueden caracterizar varias geoformas agradacionales. La margen izquierda presenta depósitos de pie de monte volcánico, mientras que hacia el norte donde el río reventazón se abre en la planicie aparecen los abanicos coluvio aluviales formados por este río.

La clasificación general de pendientes para el área permite observar que el 56.24 % (9808 hectáreas) de los terrenos se ubican en una topografía entre plana y ondulada, un 30.19 % (5265.7 hectáreas) son topografías fuertemente onduladas, localizadas principalmente en las laderas que forman el conjunto montañoso del Volcán Turrialba.

Un 13.56% (2365.3 hectáreas) del área definida presenta pendientes escarpadas entre 60 % y más, las cuales son características de las riberas de los ríos Bonilla y río Pascua que conforman marcados taludes de erosión en sus laderas. (Ver figura 7.1.26 Mapa de pendientes)

Cuadro 7.2.1
Clasificación general de pendientes para el área de estudio

Categoría	Topografía	Hectáreas	Porcentaje
0 – 15 %	Plana - Ondulada	3996.479	22.92
15 – 30 %		5811.601	33.32
30 – 45 %	Fuertemente Ondulada	4013.244	23.01
45 – 60%		1252.455	7.18
60 – 75 %	Escarpada	547.423	3.14
75 % y más	Muy escarpada	1817.945	10.42

7.2.1 Geoformas Volcánicas de la margen izquierda del Río Reventazón.

Las laderas de la margen izquierda del río Reventazón deben su forma por una serie de materiales volcánicos depositados como coladas de lava, flujos de avalancha, mantos piroclásticos. (Alvarado, 2006) El volcán Turrialba define la subunidad más representativa bajo la denominación de estratovolcán, efecto de la estratificación de materiales por alternancia de diferentes períodos eruptivos.

La morfología compleja propia de este tipo de estructuras volcánicas en donde los diferentes tipos de materiales responden de forma muy distinta a los procesos denudativos, ha dado como resultado áreas muy disímiles en las laderas que forman todo el conjunto volcánico del Turrialba.

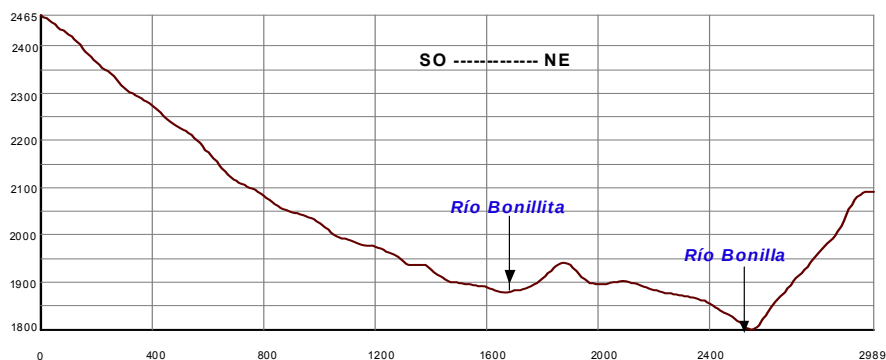
Las ladera Sur del conjunto volcánico presenta un patrón de drenaje radial muy bien desarrollado, donde los ríos Coliblanco, Turrialba, Aquiares, Lajas, y sus respectivos afluentes presentan valles en “V” muy angostos y fuertes taludes de erosión en las zonas donde afloran los frentes de coladas de lava.

Hacia el Este y Noreste las subcuencas de los ríos Bonilla y Pascua han profundizado más cauces y presentan un mayor desarrollo en los taludes de erosión, es posible que sea como resultado del efecto más directo de la pluviosidad propia de la zona Caribe, así también debido a la disposición de materiales volcánicos que son poco menos consolidados pero más heterogéneos.

A partir de Fotografías aéreas y un modelo digital de terreno, es posible identificar cicatrices de erosión en el sector de Fila Bonilla cuenca alta del río Bonilla como evidencia de procesos de remoción intensos que afectaron la subcuenca en un período más antiguo.

La topografía en este sector se presenta más suavizada hacia el suroeste, en lugar de presentar más valles angostos característicos de las zonas de alta montaña. Es observable en la vertiente derecha del río Bonilla, donde se ubica el curso del río Bonillita, un afluente del mismo río Bonilla, resultado de los deslizamientos ocurridos. (figura 7.2.1). Las pendientes en los taludes que forman la antigua cicatriz de desprendimiento son del rango de 45 – 60 %, mientras en las zonas de depósito las pendientes son entre 30 a 45 %, lo que refleja una topografía ondulada.

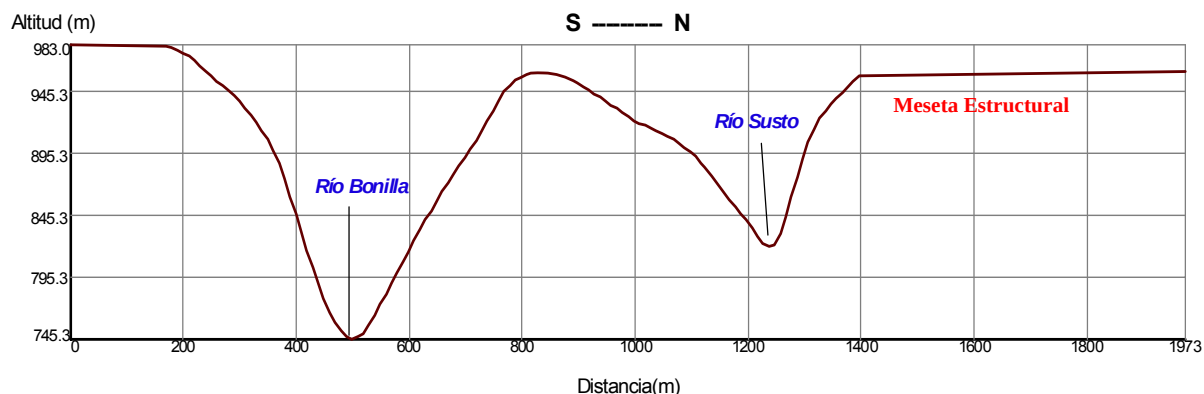
Figura 7.2.1
El perfil topográfico transversal de la cuenca alta del Río Bonilla Orientación Suroeste- Noreste, Generado a partir de un modelo digital de terreno (DEM) de resolución de 20 metros.



Hacia el curso medio del Río Bonilla, las riberas presentan marcados taludes de erosión con pendientes que varían entre 60 % y más de 75%. El río Bonilla y un afluente de este, el río Susto conforman cañones fluviales de más de 100 metros de profundidad. Sobre el borde del talud destaca que hacia el norte la topografía es entre suavemente ondulada a ondulada, con pendientes con rangos entre 0 – 15 % y 15 – 30 %, son como producto de depósitos volcánicos originados por avalanchas en dirección Este, que sobreyacen sobre coladas de lava con la misma orientación. La presencia de fracturas en sentido transversal a estos depósitos y coladas, hace que morfológicamente se denominen estos sectores zonas de mesetas estructurales. Dicha morfología ha sido cartografiada por Bergoeing y Malavassi (1981) en varios sectores de la cuenca del río Reventazón (figura 7.2.2).

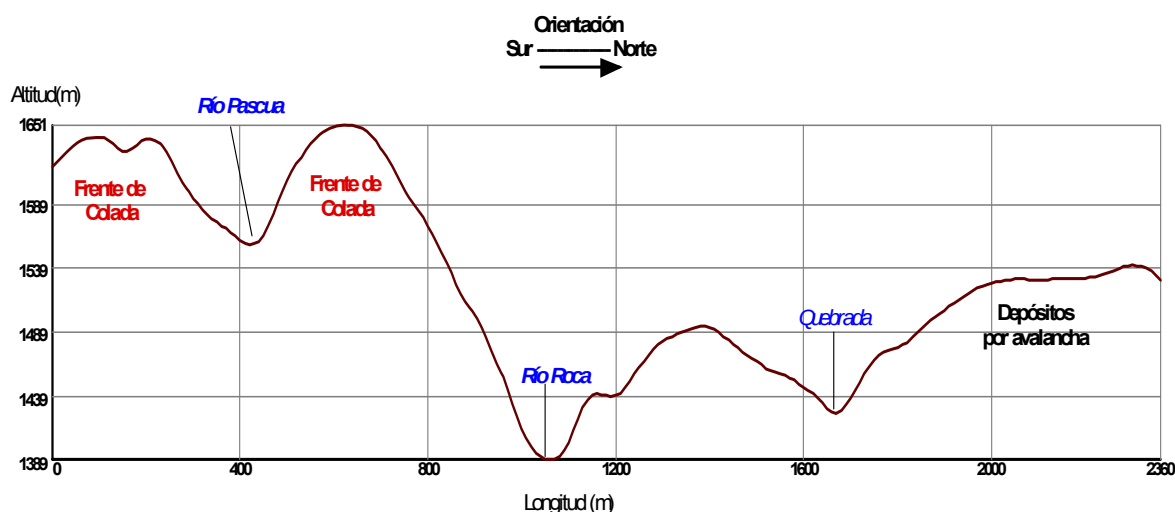
El frente de esta morfología con dirección a la ribera del río Reventazón presenta taludes con pendientes entre 45 – 60% y 60 a 75% de inclinación.

Figura 7.2.2
Perfil topográfico de la cuenca media del Río Bonilla con Orientación Sur – Norte.
Generado a partir de un modelo digital de terreno (DEM) de resolución de 20 metros.



En el área de la subcuenca alta del Río Pascua, los cauces del curso principal así como de los ríos, quebradas tributarias están determinadas por frentes de coladas de lava y depósitos volcánicos tipo avalancha. Los valles angostos son más marcados a diferencia de sub cuenca alta del Río Bonilla. (figura 7.2.3)

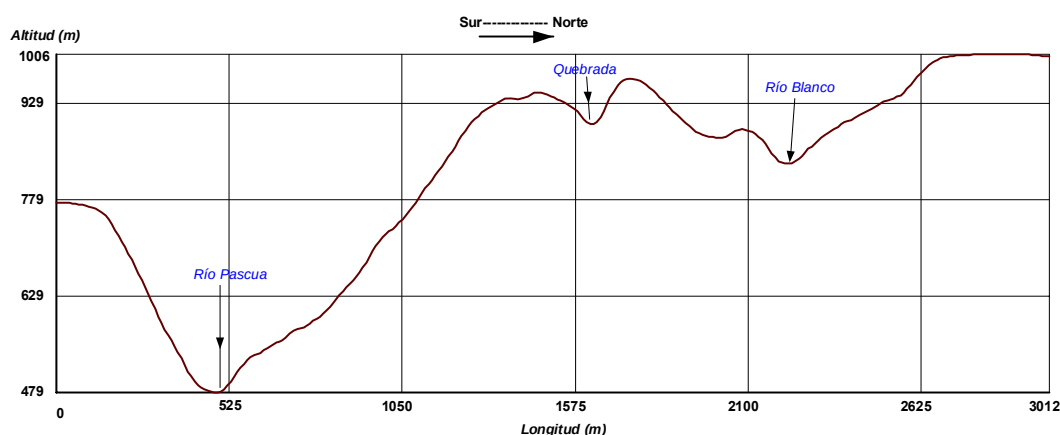
Figura 7.2.3.
Perfil Topográfico transversal de la Subcuenca alta del Río Pascua, Generado a partir de un modelo digital de terreno (DEM) de resolución de 20 metros.



Las diferencias litológicas en cuanto a la facilidad erosiva que presentan los depósitos volcánicos gravitacionales (avalanchas) y los frentes donde afloran las coladas de lava, producen fuertes cambios en el relieve como se denota en la figura 7.2.3.

En el cuenca media del Río Pascua el relieve se caracteriza por presentar fuertes taludes de erosión en la riberas del río Pascua, sus afluentes y tributarios. En estos sectores las riberas de los ríos principales, río Pascua y río Blanco lo taludes tienen más de 250 metros de altura. La presencia de depósitos volcánicos muy heterogéneos que conforman las laderas ha ayudado a que la actividad de los procesos erosivos sea más intensa, provocando la ampliación y profundización de los valles anteriormente angostos (figura 7.2.4). La topografía es fuertemente ondulada muy escarpada con pendientes de 45 % a más de 75%, hace de esta sub cuenca el sector del área de estudio con más concentración de pendientes fuertes.

Figura 7.2.4
Perfil topográfico transversal cuenca media Río Pascua. Generado a partir de un modelo digital de terreno (DEM) de resolución de 20 metros.



7.2.2 Geoformas Colinadas denudacionales.

Este tipo de relieve se ubica en el sector Este del área estudiada, propiamente en las laderas de la margen derecha del río Reventazón, presenta un modelado más intenso por efecto de la actividad de los procesos erosivos. La litología de las colinas es de edad Terciaria por lo que ha estado más expuesta en el tiempo a procesos denudativos. Esta conformada por rocas volcánicas y algunas facies sedimentarias que han quedado expuestas por la tectónica local. La meteorización de las rocas ha dado como resultado formaciones superficiales que presentan una matriz mucho más arcillosa y con mezcla de bloques de regolita y roca parental.

La elevación máxima de estas colinas no supera los 800 m.s.n.m. en donde los cerros que presentan más elevación corresponden a formas de relieve residual de origen volcánico y se observan como cerros aislados de no más de 300 metros de diámetro.

Fotografía 7.2.1:

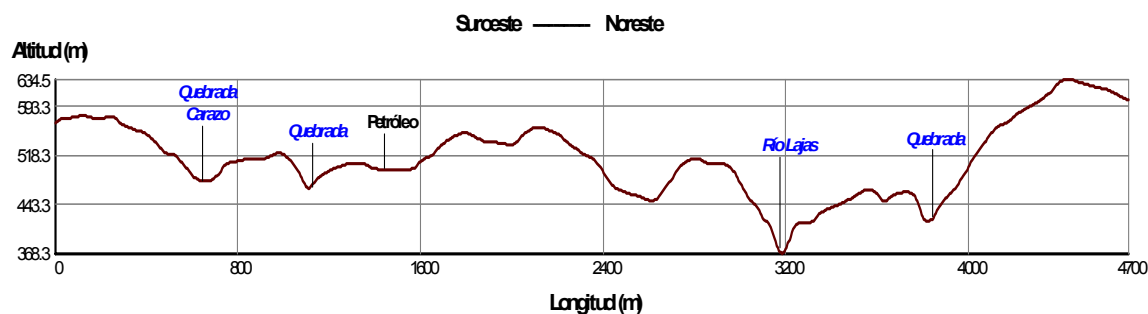
Relieve característico de las laderas en la margen derecha del río Reventazón. Las partes más elevadas corresponden a relieves residuales de origen volcánico, se combinan con litologías sedimentarias que forman lomas más bajas y de pendiente más suave como se observan en el medio de la imagen.



Las colinas son la divisoria de aguas entre las cuencas del Río Reventazón y Pacuare, formando una divisoria relativamente estrecha, hace que los ríos y quebradas que nacen en las partes altas realicen un recorrido corto hasta confluir con el cauce principal del Río Reventazón. La quebrada Carazo, Río Lajas, Río Tres Amigos, Río Guayacán, son los cursos principales de agua en este sector no presentan fuertes taludes y sus interfluvios son de topografía más ondulada con pendientes que van de un rango de menos de 15 % a 45%. Pero al ser sus cuencas de muy pequeña extensión y sus cauces longitudinalmente cortos, tienden comportarse como torrentes cuando se crecen. (Figura 7.2.5)

Figura 7.2.5

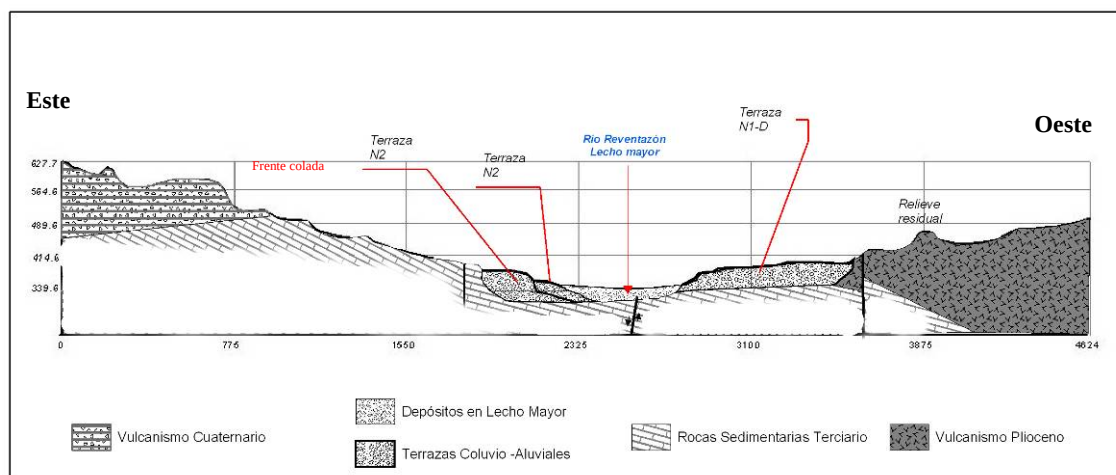
Perfil topográfico Margen derecha Río Reventazón. Generado a partir de un modelo digital de terreno (DEM) de resolución de 20 metros.

**7.2.3 Geoformas por procesos agradacionales**

Bajo esta denominación se incluyen las formas resultado de la deposición de materiales de las laderas originados por procesos denudativos. Se incluyen toda la morfología característica a lo largo de las riberas del Río Reventazón desde el sector de Peralta hasta el sector de Siquirres donde el río a formado un abanico coluvio- aluvial.

En el sector de Peralta la ribera izquierda del Reventazón esta formada por rocas sedimentarias del Terciario, sobre estas el río ha formado dos niveles de terraza (figura 7.2.6) uno a 20 metros del lecho (Terraza N1) y otro a 40 m (Terraza N2) aproximadamente. Hacia la ribera derecha el cambio en el relieve muestra un borde de terraza de 40m de altura que se extiende cerca de 900 metros de longitud hacia el interior de la ladera derecha del río (Terraza N1 –D).

Figura 7.2.6 Corte Este – Oeste del Río Reventazón Sector de Peralta , generado a partir de datos tomados del mapa Geomorfológico de Bergoeing y Malavassi (1981), así como datos del modelo digital de terreno a 10 metros



Las terrazas están formadas por los aportes de acarreo longitudinales del río reventazón, así como también por aportes coluviales por efecto de erosión de los frentes de colada como es el caso de la ribera izquierda (Este) del río, o de aportes coluviales por desgaste de las formaciones volcánicas terciarias en la ribera derecha (oeste)

Entre el sector de Peralta y la confluencia del río Bonilla con Reventazón, la morfología sobresale por la presencia de un grupo de lagunas localizadas a mas de 70 metros de elevación con respecto al lecho actual del Río Reventazón, las lagunas de Bonilla en la margen izquierda y las lagunas Lancaster en la margen derecha. La morfología define varios niveles de elevación, con una topografía suavemente ondulada con pendientes menores de 15% en unas áreas a sectores con pendientes más onduladas del orden del 30 %.

Algunos estudios sugieren que estas lagunas son el resultado de un antiguo nivel del río Reventazón que se represo de forma natural aguas abajo por efecto de una colada de lava (Bergoeing, 2007)

El represamiento y posterior ruptura del mismo, permitió en la zona la formación de estos niveles asociados a procesos depositación fluvio lacustres. (fotografía 7.2.2)

El sector de las lagunas Lancaster la morfología además de ser resultado de procesos fluvio lacustres, también evidencia aportes por deposición coluvial por erosión y desprendimiento de los cerros aledaños.

Fotografía 7.2.2:

El Río Reventazón (centro Izquierda) corta formaciones sedimentarias y volcánicas en ambas márgenes. Se observa en la zona superior derecha la meseta estructural y talud de erosión formado por coladas de lava provenientes del volcán Turrialba.

Más debajo se visualiza la Laguna de Bonilla con un relieve suave ondulado resultado de la deposición fluvial y lacustrina.



En la confluencia del río Bonilla con el Río Reventazón, el río ha originado un elevado talud por erosión en la ribera derecha con pendientes de más de 75 % en su ladera. En contraparte la ribera izquierda presenta un conjunto de depósitos aluviales mezclados tanto del río Reventazón como el Bonilla.

Fotografía 7.2.3:

Talud lateral rocoso sobre ribera derecha del Reventazón de pendiente mayor a 75%, por efecto de un corte por falla. Abajo se observa la morfología de terraza originada por materiales acarreados por el cauce del Río Bonilla al confluir con el Reventazón.



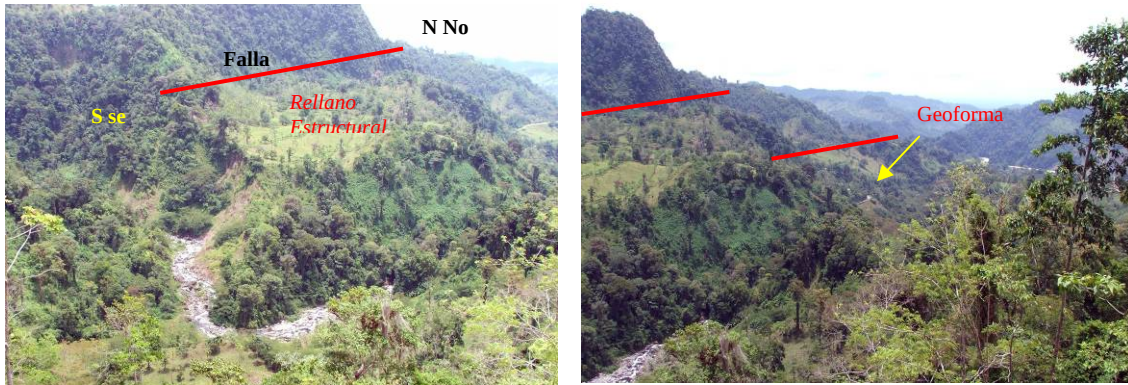
Sobre el Río Bonilla en un tramo de 2 kilómetros aguas arriba la topografía evidencia en la margen derecha un antiguo nivel de terraza coluvio - aluvial a unos 80 metros de elevación sobre el nivel actual del lecho del río Bonilla. La geoforma está flanqueada en su borde interno por una línea de falla originando un talud en la Fila Angostura.

En la margen izquierda la ladera la forma un frente de colada de lava que determina dos gradas con cortes en talud. El frente de colada se eleva cerca 160 metros sobre el lecho del río con pendientes entre 45 y 60%. La segunda grada se eleva sobre esta colada formando un talud de al menos 150 m con pendientes mayores de 75 %.

Una línea de falla en sentido NNO- SSE ha provocado las gradas en el relieve en esta margen, que como consecuencia originaron varias geoformas por deposición en la ribera de izquierda del río Bonilla y del Río Reventazón. (fotografía 7.2.4 -7.2.5)

Fotografías 7.2.4 y 7.2.5:

En la margen izquierda del río Bonilla el fallamiento ocasionó el desnivel en la colada de lava, dejando el frente de la colada a 150m por debajo de la elevación del resto de la formación. El desnivel dejó un pequeño rellano estructural sobre el frente de la colada.



Cercano de la confluencia del Río Pascua con el Reventazón, el Pascua evidencia en su ribera derecha un antiguo nivel de terraza aluvial con materiales depositados por su mismo curso, debido a procesos tectónicos asociados a una falla que cruza el río Reventazón en dirección NE – SE, la terraza se elevó unos 40 metros sobre el lecho del río, el cual cerca de 500 m de longitud del cauce hasta confluir con el Reventazón presenta un marcado control estructural.

A partir de esta confluencia el Río Reventazón forma una serie de codos, donde en el frente de lo mismos las pendientes de la ladera llegan a 75%. El Río sigue un control estructural por fallas que se cruzan transversalmente y otras que siguen paralelo al curso del río en ambas márgenes, ocasionando que algunas terrazas aluviales tengan una topografía más inclinada con pendientes entre 15 a 30 %.

En sector de Sitio Presa hasta el Codo del diablo, los taludes más fuertes se observan en la margen izquierda con pendientes entre 60 a más de 75% propiamente en sitio presa. Sobre el borde del talud de la margen izquierda del río, la morfología está definida por depósitos de piedemonte volcánicos o también definidos como Lavas torrenciales. Corresponden a acumulaciones por efecto de acarreo de material superficial debido a

procesos de erosión hídrica, se forma un depósito al pie de las laderas de material muy heterométrico dispuesto en una matriz arcillosa. La topografía de estos sectores es multiconvexa pero suave ondulada con pendientes que en promedio son del 15%. El relieve está disectado por las quebradas y ríos que descienden de las laderas más elevadas.

Fotografía 7.2.6

Vista panorámica de la margen izquierda del río Reventazón, donde se observa la topografía relativamente suavizada de los depósitos de piedemonte volcánicos orientados hacia el norte de la ladera.



7.2.4 Procesos Morfodinámicos

El conjunto de procesos que han actuado en el modelado de las formas de relieve en el área de estudio, siguen interactuando en la actualidad. La actividad humana principalmente asociado a cambios en la cobertura natural de la tierra, favorece el incremento de procesos erosivos.

Se debe sumar también la composición y estructura de las formaciones litológicas presentes sobre todo de las formaciones superficiales originadas por la alteración de la litología original.

Como se mencionó anteriormente las márgenes del río Reventazón presentan diferencias en cuanto a su litología, principalmente por edad de los materiales, lo que hace que la margen derecha tenga un relieve más desgastado con suelos con mayor lixiviación y meteorización de rocas en varios lugares.

La margen izquierda por su parte presenta un relieve más juvenil pero que está en una fase de intensa erosividad de sus formas, evidenciado por la mayor presencia de formas de modelado fluvial, como valles en "V", cañones fluviales, gargantas. Así como formas resultantes de la erosión en vertientes como taludes de erosión y desprendimientos.



Fotografía 7.2.7. Desprendimiento en la parte de alta de uno de las quebradas afluentes del río Blanco. Se da como resultado de la combinación de la fuerte pendiente con laderas mayores a 45%, la sobrecarga del suelo por humedad y una cobertura vegetal pobre con dominio de pastos y especies de porte bajo que no favorecen la resistencia que pueda ofrecer a procesos de erosión pluvial.

Fotografía 7.2.8. Resultado de este tipo de desprendimiento, la quebrada termina colmatada por una serie de materiales que forman un depósito caótico de bloques heterométricos, angulosos y poco redondeados.

El sorteamiento y estratificación del material a lo largo del cauce de la quebrada queda en función de períodos de aumento de caudal que afecten al cauce por cambios en las condiciones climáticas de la zona.



Fotografía 7.2.9. La Composición de la litología en estas laderas, donde las mismas se pueden clasificar como coluvios, debido a la translocación de fragmentos de roca, bloques angulares y subangulares y otros detritos más finos. Constituyen un elemento importante que favorece la inestabilidad en varios sectores.



Fotografía 7.2.10.

Las áreas de pasto se ven afectadas por procesos de solifluxión laminar, terracetos, etc. En las laderas de pendientes superiores a 75% aún con una adecuada cobertura boscosa, es posible la ocurrencia de desprendimientos de suelos y roca como el caso del ubicado cerca de la población de San Antonio.



Fotografía 7.2.11: La comunidad de San Antonio se asienta sobre formaciones sedimentarias. La composición y estructura del tipo de roca sedimentaria localizada en estos sectores favorece la acción de procesos de remoción en masa. La forma de las Colinas observadas en la foto evidencia el efecto del desplazamiento del suelo, originando procesos de solifluxión en capas, terracetos y pie de vaca.

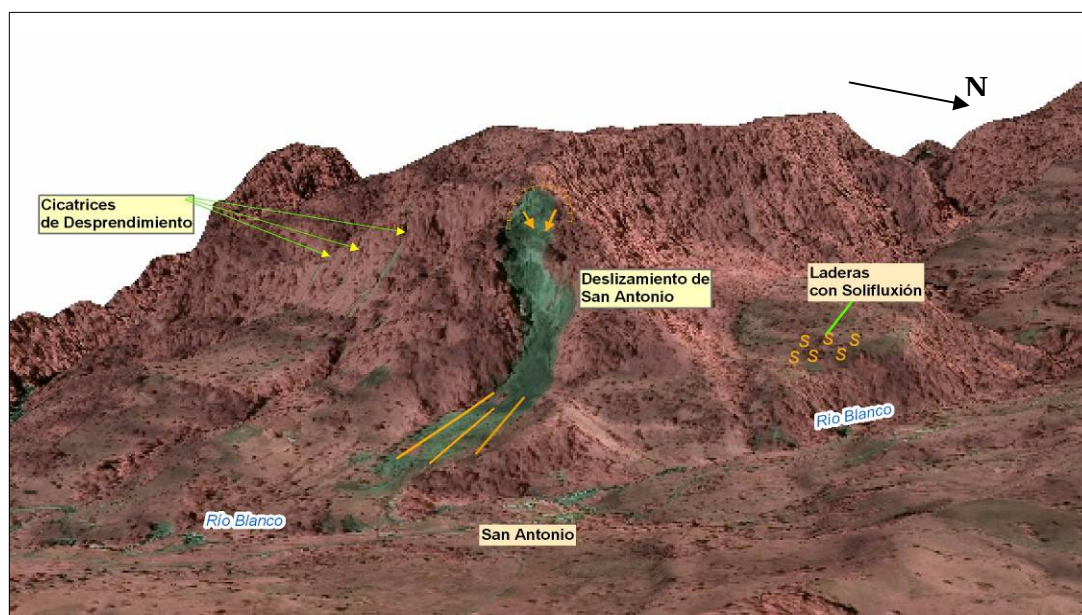
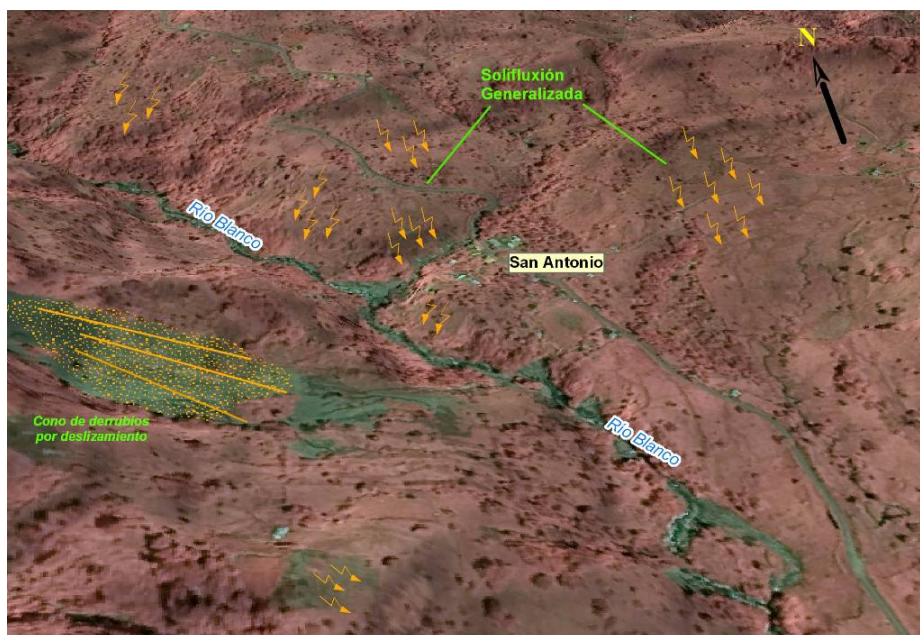


Figura 7.2.7. Modelo tridimensional de una fotografía aérea del Proyecto Carta 2005 realizado a partir del Modelo de Elevación digital (DEM) de 10 metros de resolución realizado mediante levantamiento fotogramétrico para el área de Proyecto del P.H. Reventazón

En la figura anterior se observa el sitio donde se originó el deslizamiento, cercano a la comunidad de San Antonio donde se destaca la extensión del cono de materiales que se ha originado. Las laderas del Cerro Roca de más de 200 metros de elevación, con pendientes superiores a 75%, manifiestan procesos activos de desprendimientos, observado por la serie de cicatrices hay hacia el sur del deslizamiento.

Figura 7.2.8
Modelización del área circundante a la comunidad de San Antonio



La figura 7.2.8 de la fotografía aérea sobre el modelo digital de terreno, permite observar las áreas que presentan procesos de remoción en masa activos en los alrededores de San Antonio. Un buen porcentaje de las laderas con pendientes no muy fuertes entre un rango de 15 a 30 % y con cobertura de pastos se ven afectadas por procesos de solifluxión generalizada, La litología de origen sedimentario es uno de lo principales elementos que favorecen estos procesos en el área.



Fotografía 7.2.12.

En un afluente del río Blanco, se observa la litología sedimentaria que ha quedado expuesta en el lecho de la quebrada. la formación superficial se asienta sobre la misma. Está litología actúa como una especie de superficie de “patín” sobre la cual se desliza el suelo o material que la sobreyace.

Fotografía 7.2.13.
El cauce del Río Pascua en el sector cercano a confluir con el río Reventazón



En este sector el río Pascua presenta un lecho compuesto por un depósito muy heterométricos de materiales, que incluyen arenas, gravas, detritos finos y bloques desde centímetros a más de un metro de diámetro.

La gran cantidad de material y la disposición un poco caótica del mismo, sugiere que los aportes se ha dando por procesos deslizamientos, derrumbes de las márgenes, que afectan a la subcuenca río arriba y han llegado al cauce del río, represándolo en ciertos momentos.

El área que envuelve la subcuenca del río Pascua es una de las zonas más delicadas desde el punto de vista de morfodinámico debido a la cantidad de procesos activos que en el área se observan., además de ser una de las subcuencas que confluye directamente sus aguas con el área del futuro embalse del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón.

7.3 Suelos

Con una serie de normas legales vinculadas al recurso suelo, los alcances particulares de la Ley 8023 ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO REVENTAZON y la Ley 7779 USO, MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS y su reglamento (y como parte del EsIA) por lo que presenta un reconocimiento de los suelos presentes en el área de influencia directa del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón.

La información presentada para la clasificación taxonómica de los suelos proviene del Mapa de suelos de Costa Rica del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Con base en ésta fuente se generó un listado de las unidades de manejo presentes en el área de influencia directa del proyecto, con el objetivo de reunir mayor detalles e información se efectuaron visitas al campo para la determinación y análisis de variables físicas que finalmente se contrastaron con la información del mapa geológico y de pendientes elaborado por el Centro de Servicio de Gestión Ambiental del ICE para la zona del proyecto. Ver figura 7.1.25

Con el reconocimiento del área, se establecieron las características del relieve, clima, fisiografía, etc. Las observaciones permitieron cubrir la mayor parte del área de influencia del proyecto que aproximadamente es de 25 km², con las observaciones se logró además de elaborar un inventario de variables físicas del sitio, se describió el perfil más representativo de la unidad identificada; la localización, pedregosidad, clima, gradiente, vegetación o cultivo, erosión o drenaje entre otras según se detalla en la planilla adjunta.

Este reconocimiento incluyó perforaciones con barreno tipo holandés hasta una profundidad máxima de 1.2 metros, para determinar características físicas de los horizontes como profundidad, color, textura, estructura presentes en el perfil.

Las unidades de manejo identificadas por el documento del MAG se compararon de acuerdo a los criterios de clasificación taxonómica de los suelos según las normas de la Clave para la Taxonomía de Suelos, 10ª edición del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y para establecer la categoría de las tierras se utilizó la Metodología para Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras de Costa Rica, según decreto ejecutivo 23214 MAG-MIRENEM, la metodología propone las siguientes clases:

Tierras de clase I,II y III permiten el desarrollo de cualquier actividad

Las clases IV,V y VI restringen las tierras al uso con cultivos semipermanentes y permanentes.

Tierras en clase VII tiene limitaciones tan severas que solo permite el manejo de bosque.

Y clase VIII son terrenos que no se permite actividad productiva agrícola, pecuaria y forestal, siendo adecuada únicamente para la protección de recursos.

Dentro de una clase, son limitantes las siguientes subclases:

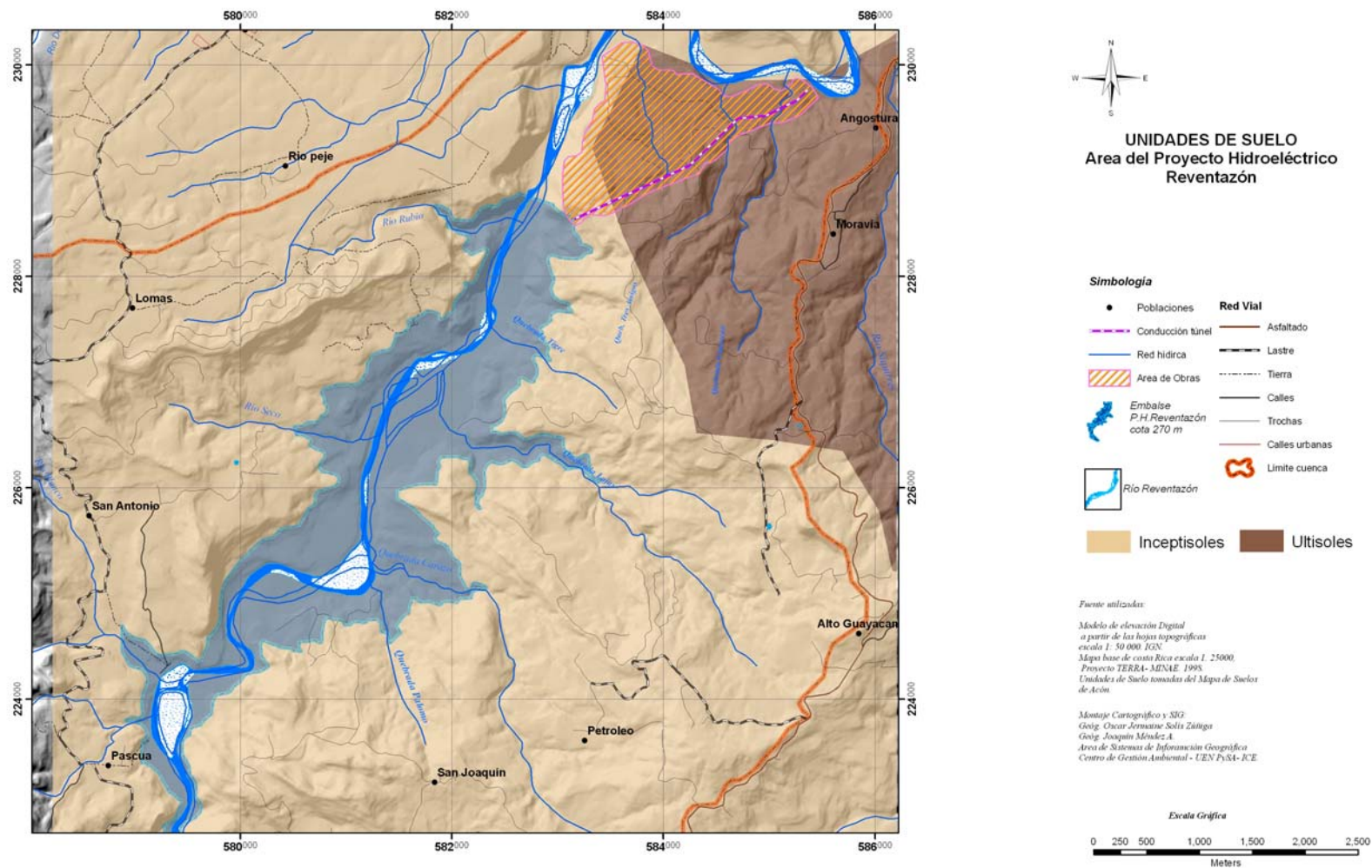
Erosión, ya sea sufrida y potencial por pendiente (e)

Suelo, con profundidad efectiva, textura, pedregosidad, fertilidad, toxicidad y salinidad (s)

Drenaje, sea por deficiencia o exceso de humedad o riesgo de inundación (d)

Clima, limitación dada por el sistema de zonas de vida según Holdridge (c)

Figura 7.3.1. Mapa de suelos del sector P.H. Reventazón.



De acuerdo al Mapa de suelos de Costa Rica del Ministerio de Agricultura, se reconocen para la zona dos órdenes de suelos: los inceptisoles, que en términos de área éstos superan las 2.000 hectáreas, ubicados en ambas márgenes del cauce del río Reventazón, son parte de las tierras que se inundarán por el embalse, así como los sitios donde se depositará material o escombreras, donde se construirán caminos internos, la presa, el vertedor, se instalarán quebradores, patios de materiales e instalaciones temporales.

El otro orden de suelos presente en el área del proyecto son los ultisoles, con más de 500 hectáreas estarán asociados a la construcción de la tubería forzada y con la casa de máquinas.

Con base en las observaciones de campo realizadas y la descripción de las asociaciones de suelos presentadas en el manual del mapa de suelos de Costa Rica (MAG, 1991), a continuación se detalla:

7.3.1 Inceptisoles

La presencia del horizonte cámbico con 15 o más centímetros de espesor, donde se hacen evidentes las alteraciones por procesos químicos o físicos o su combinación, es precisamente el principio de identificación de los inceptisoles que refleja su incipiente desarrollo pedológico.

Estos suelos por lo general presentan un desarrollo de perfil A-Bw-C (siendo Bw el horizonte cámbico), en nuestro país los inceptisoles están en la mayoría de las zonas climáticas, principalmente donde hay lixiviación o lavado a lo largo del año. Los inceptisoles tienen otras características sobresalientes: el material original es muy resistente sin embargo está ya meteorizado, la presencia de cenizas volcánicas, las posiciones extremas en el paisaje, o sea, tierras de pendientes fuertes y depresiones y superficies geomórficas tan jóvenes que limitan el desarrollo del suelo (sedimentos aluviales o coluviales). Tomado de Berstch. 1995

Dentro del subgrupo de inceptisoles en el área de estudio, se describen las siguientes unidades de manejo que fueron identificados por el MAG como:

Río Reventazón (I 39)

Los suelos de la Unidad Río Reventazón se ubican en varios depósitos o terrazas aluviales del Período Cuaternario Reciente u Holoceno (10.000 años antes del presente), evidentemente son suelos planos con pendientes menores al 3% de buenas condiciones físicas y de fertilidad, existen depósitos en ambas márgenes del río y tienen en algunos casos 1 kilómetro de longitud y 400 m de ancho, es probable que la definición del trazado de la línea férrea se debiera a lo antes señalado, como se muestra en la fotografía 7.3.1.

De las variables físicas más elementales de los suelos presentes en la Unidad I 39, es que poseen texturas que van de medias a moderadamente finas (de franco arenosas finas a franco arcillo arenosas), con una profundidad efectiva menor a 90 centímetros.

La coloración en húmedo que domina en el horizonte superior es pardo muy oscuro (7.5 YR 3/2). Los suelos de esta unidad son de drenaje bueno, producto de una alta porosidad y las características texturales.

De acuerdo al MAG, taxonómicamente se definen **Fluventic Eutrudepts**, son del orden inceptisoles, del suborden Udepts y subgrupo Fluventic. Con una capacidad de uso, determinada en clase II y limitados por elementos texturales y riesgo de inundación.

Finalmente, conviene mencionar que en estos depósitos aluviales se están desarrollando actividades agropecuarias en diversos esquemas, por ejemplo a lo largo de la margen izquierda desde Bonilla, Pascua, San Antonio, Lomas hasta Florida, se identificaron explotaciones ganaderas de doble propósito y algunas para ganadería de carne, por lo general con pastos naturales (*Paspalum* sp., *Cynodum* sp, *Panicum* sp) y con alguna galera o corral de condiciones regulares que se utiliza frecuentemente como lechería.

Hacia el sector de la cola del futuro embalse, en margen derecha, se localizan varias fincas ganaderas de doble propósito y pequeños lotes (menos de 2 hectáreas) de cultivos como culantro coyote, frijoles, banano y ayote (Bajo 52). También se observaron importantes masas de bosque y reforestación. (p.e. fincas Lankester y O. Ureña)

En la parte media del futuro embalse por margen derecha, en la Finca Montecristo de Bajo 47 se explota un sistema de cría y engorde de cerdos (80 cerdos de 90 kg/semana) y ganado vacuno de las razas Blonde D'Aquitane, Nelore, Brahman, Charole y sus cruces, ésta finca posee excelentes pastos mejorados (*Brachiaria* sp, cv. Brizantha y/o Limpo-grass)¹ y parches de estrella africana (*Cynodum nlemfluensis*) y tanner (*Brachiaria arrecta*), cercas con poste vivo de poró y madero negro y algunos tramos de alambre liso con electricidad, infraestructura e instalaciones como caminos internos, corrales, mangas, porquerizas, bodegas, fábrica de concentrado, establos y casa de habitación.

El acopio o patios para trozas de madera, hace suponer que el aprovechamiento forestal, producto de procesos de reforestación y/o regeneración de bosques intervenidos es la actividad que se localiza en las terrazas aguas abajo siempre en margen derecha, en la finca del Cubano y la Plywood.

Fotografía 7.3.1.
Terraza aluvial del río Reventazón, sector Lomas.



¹ Comunicación personal con Administrador Finca Montecristo
Señor Leonardo FA, noviembre 2007.

Caracterización del sitio	Dato
Orden	Inceptisol
Unidad cartográfica ¹	Río Reventazón I 39
Unidad taxonómica ²	Fluventic Eutrudepts
Localización	Las Lomas, línea ferrea
Fisiografía	Depósito sedimentario
Relieve	Terraza aluvial
Uso actual	Potrero con árboles aislados

Caracterización del perfil típico ³	Valores
Pendiente	< 3%
Erosión sufrida	Leve
Profundidad efectiva	Moderada profundidad (> 90 cm)
Textura del perfil	Franco arenosas finas a franco arcillo limosas
Pedregosidad	Ligeramente pedregoso
Fertilidad aparente	Media – Alta
Drenaje	Bueno
Riesgo de inundación	Moderado
Zona de vida	Bosque muy húmedo tropical
Coloración del horizonte superficial	Pardo muy oscuro (7.5 YR 3/2).
Nivel freático	No visible
Capacidad de uso	II s ₂ d ₂

Nota: 3 Determinación en campo de los horizontes presentes en el perfil

Germania (I 41)

Del poblado de Florida hacia el Norte se observan terrenos en una planicie ligeramente ondulada, de acuerdo al mapa geológico regional, su origen tiene base en el Pleistoceno (2 millones de años antes del presente)

Los suelos tienen valores del 3 al 8% en pendiente. El perfil realizado supera el 1.2 metro, de color oliva café claro en el horizonte superior con condiciones húmedas y texturalmente se clasifican como finos, es decir son arcillosos y pesados y poseen una fertilidad baja.

De acuerdo al MAG, estos suelos son inceptisoles denominados como **Typic Dystropept**. En la actualidad estas tierras son dedicadas intensivamente al cultivo de piña, como se presenta en la fotografía 7.3.2, sin embargo también es posible observar importantes áreas de pastos para la actividad ganadería y bosquetes aislados. Son tierras señaladas con clase III con limitaciones por la erosión hídrica sufrida, textura fina y drenaje.

En el sector mencionado, no se planea la construcción de obras asociadas al proyecto, eventualmente pudiesen utilizarse los caminos existentes como ruta de tránsito vehicular.

Fotografía 7.3.2.
Camino Fuentes, sector Florida-El Cairo



Caracterización del sitio	Dato
Orden	Inceptisol
Unidad cartográfica¹	Germania I 141
Unidad taxonómica²	Typic Dystropept
Localización	Camino Fuentes
Fisiografía	Depósito sedimentario
Relieve	Planicie ligeramente ondulada
Uso actual	Cultivo de piña

1 y 2 Tomado del Manual Descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica, MAG 1991

Caracterización del perfil típico ³	Valores
Pendiente	3 a 8%
Erosión sufrida	Moderada
Profundidad efectiva	Muy profundos (> 1.2 metro)
Textura del perfil	Arcillosa
Pedregosidad	No hay rocas
Fertilidad aparente	Baja
Drenaje	Lento
Riesgo de inundación	Nulo
Zona de vida	Bosque muy húmedo premontano
Coloración del horizonte superficial	Oliva café claro (2.5Y 5/6)
Nivel freático	No evidente
Capacidad de uso	III e2s2d1

3 Determinación en campo de los horizontes presentes en el perfil

La Alegría (I 45)

La característica más sobresaliente de los suelos presentes en la Asociación La Alegría es que tienen un relieve más ondulado que los presentes en la asociación anteriormente descrita.

En éstos suelos el perfil supera el 1,2 metros de profundidad, el horizonte superior de 0 a 50 cm de profundidad, es de textura fina o arcillosa, con color en húmedo oliva (5Y 4/4 a 5/6), con algunos signos de erosión y compactación, de buen a lento drenaje y fertilidad media a baja.

El relieve local posee ondulaciones apropiadas para establecer escombreras o sitios para el depósito de materiales provenientes de la ampliación de caminos o excavaciones en el sitio de presa, (Fotografía 7.3.3)

Hoy, estos terrenos los dedican a pastos, cultivo de plantas ornamentales, macadamia y adicionalmente se ubica un número importante de casas o fincas de recreo.

Según el MAG la asociación La Alegría, tiene al **Typic Dystropept**, como unidad taxonómica principal y de acuerdo a la Metodología para Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras se ubican en la Clase III, limitadas por su pendiente, erosión tanto potencial como sufrida y textura.

Fotografía 7.3.3.
Sector suroeste Florida.



Caracterización del sitio	Dato
Orden	Inceptisol
Unidad cartográfica¹	La Alegría I 45
Unidad taxonómica²	Typic Dystropept
Localización	4.5 km al SO de La Florida
Fisiografía	Depósito sedimentario
Relieve	Planicie ondulada
Uso actual	Pastos y quintas de recreo

^{1 y 2} Tomado del Manual Descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica, MAG 1991

Caracterización del perfil típico ³	Valores
Pendiente	> 10%
Erosión sufrida	Leve
Profundidad efectiva	Muy profundos (> 1.2 metros)
Textura del perfil	Arcillosa
Pedregosidad	No hay rocas
Fertilidad aparente	Baja
Drenaje	Lento
Riesgo de inundación	Ausente
Zona de vida	Bosque muy húmedo premontano
Coloración del horizonte superficial	Oliva (5Y 4/4 a 5/6)
Nivel freático	No evidente
Capacidad de uso	Ille12s2

³ Determinación en campo de los horizontes presentes en el perfil

Bonilla (I 125)

Es necesario destacar la presencia en la zona de numerosos y considerables procesos erosivos tanto de menor escala y también deslizamientos de importantes dimensiones, en su mayoría asociados a cauces de ríos o quebradas. Los signos más evidentes en el terreno son grietas, cauces muy profundos y riberas erosionadas, acumulaciones de agua sobre el terreno y un evidente deterioro de la infraestructura tanto vial como residencial.

La asociación Bonilla se sitúa casi en su totalidad, en el pie de monte formado a partir de diversos materiales volcánicos y el efecto gradual y directo de la erosión sobre éstos materiales. Esta asociación se localiza en la margen izquierda del río Reventazón, bordeando total y ampliamente el futuro embalse, los suelos presentes en esta unidad tienen un relieve fuertemente ondulado, con una pendiente superior al 30 %, sin embargo se observan algunas zonas planas o valles de mediana extensión con sectores moderadamente pedregosos. (Ver fotografía 7.3.4)

En varias fincas de la zona, en su mayoría dedicadas a la actividad de lechería de doble propósito, se observa reiteradamente un microrelieve claramente vinculado con la acción y efectos de la erosión, como terracetos, pedestales, surcos y cárcavas posiblemente acelerados por el excesivo pisoteo del ganado vacuno y el régimen de precipitación del área.

De las barrenadas efectuadas, se consiguieron perfiles con una profundidad que va de 0.9 a 1.2 metros. La textura en el horizonte superior (0 a 20 cm) por lo general resultó arcillosa o arcillo areno-limosa, de coloraciones 2.5Y4/1, presentan un drenaje excesivo como consecuencia del relieve predominante y tienen una fertilidad aparentemente baja. En el horizonte cámbico (Bw) después de los 20 centímetros de profundidad presenta pocos moteos de color 2.5Y 8/6. El subsuelo posee una coloración en húmedo de 10YR 4/4.

Según el mapa de suelos (MAG 1991) taxonómicamente se clasifican como **Andic Humitropept**, es un inceptisol de características volcánicas acentuadas. Es posible determinarlas como tierras de clase V limitadas por pendiente, erosión sufrida, textura y pedregosidad

Fotografía 7.3.4.
Terrenos ubicados en Pascua



Caracterización del sitio	Dato
Orden	Inceptisoles
Unidad cartográfica¹	Bonilla I 125
Unidad taxonómica²	Andic Humitropept
Localización	500 oeste plaza Pascua
Fisiografía	Laderas erosionadas
Relieve	Fuertemente ondulado
Uso actual	Potrero y bosques

^{1 y 2} Tomado del Manual Descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica, MAG 1991

Caracterización del perfil típico ³	Valores
Pendiente	Mayor al 30%
Erosión sufrida	Muy severa
Profundidad efectiva	Moderada profundidad (de 0.9 a 1.2 m)
Textura del perfil	Arcillosa
Pedregosidad	Moderadamente pedregoso
Fertilidad aparente	Baja
Drenaje	Excesivo
Riesgo de inundación	Nulo
Zona de vida	Bosque muy húmedo tropical
Coloración del horizonte superficial	2.5Y4/1 (gris rojizo oscuro)
Nivel freático	No evidente
Capacidad de uso	Ve₁₂s₂₃

³ Determinación en campo de los horizontes presentes en el perfil

Pacayitas (I 126)

Con se observa en la fotografía 7.3.5, los suelos de la asociación Pacayitas, son fuertemente ondulados (de 30 a 60%), tienen una profundidad mayor a 1.2 metros, de un horizonte superior de aproximadamente 20 centímetros, de textura arcilloso limoso, muy plástico, de color café (7.5YR 4/4) y café fuerte (7.5YR 5/6), de drenaje lento y con signos evidentes de erosión.

Estas tierras de laderas del Período Terciario, producto de procesos erosivo sedimentarios, serán cubiertas por las aguas del futuro embalse, se ubican desde la parte alta de las quebradas tributarias (Moncha, Palomo, Carazo, Lajas y Tigre) al río Reventazón por margen derecha y formando un amplio borde perimetral al espejo de agua planeado.

Fotografía 7.3.5 Potrero fuertemente ondulado, margen derecha



Los suelos presentes en margen derecha se reúnen en la asociación Pacayitas, con un aprovechamiento forestal de bosques intervenidos y otra parte como productos de reforestación se clasifican como tierras clase V.



Fotografía 7.3.6. Margen derecha río Reventazón, finca El Cubano y San Joaquín al fondo.

Caracterización del sitio	Dato
Orden	Inceptisol
Unidad cartográfica¹	Pacayitas I 126
Unidad taxonómica²	Andic Humitropept
Localización	Finca El Cubano
Fisiografía	Ladera erosionada
Relieve	Fuertemente ondulado
Uso actual	Reforestación

^{1 y 2} Tomado del Manual Descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica, MAG

Caracterización del perfil típico ³	Valores
Pendiente	35%
Erosión sufrida	Moderada
Profundidad efectiva	Muy profundo (>1,2 m)
Textura del perfil	Arcillosa
Pedregosidad	No hay rocas
Fertilidad aparente	Baja
Drenaje	Excesivo
Riesgo de inundación	Nulo
Zona de vida	Bosque muy húmedo tropical
Coloración del perfil	Café (7.5YR 4/4)
Nivel freático	No evidente
Capacidad de uso	Ve12s2

³ Determinación en campo de los horizontes presentes en el perfil

7.3.2 Ultisoles

Los suelos altamente intemperizados o meteorizados son los ultisoles y son una muestra clara de los efectos finales del lavado. En la formación de los ultisoles la presencia de lixiviación durante un período dado y temperaturas de magnitud importante, es el resultado de una alteración rápida y bastante completa de los minerales transformados en óxidos y arcillas secundarias estables bajo un ambiente normal.

Por lo antes descrito, hace frecuente que a los ultisoles se les asocie con una CIC (capacidad de intercambio catiónica) baja (pobre fertilidad natural), evidencia de procesos de iluviación de arcillas (migración de arcilla hacia un horizonte más profundo) en el horizonte de diagnóstico, conocidos como horizontes kándico o argílico y un desarrollo aceptable de la estructura. En el grupo de los ultisoles predominan arcillas como la caolinita y óxidos de hierro o aluminio.

Los ultisoles presentan serias limitaciones para la actividad agricultura o ganadería en pastoreo, pues son suelos frágiles, de poca fertilidad, asimismo también tienen limitaciones para usos urbanos por ser altamente arcillosos, son poco resistentes a la compresión. Por su alto contenido de arcilla se reduce la permeabilidad, su drenaje es excesivamente rápido por las pendientes y tienen una baja capacidad de absorción de agua.

En el área del proyecto, de acuerdo al MAG, se identificó el subgrupo Mirador de Siquirres (U3 fe) caracterizado por ser un suelo de relieve fuertemente escarpado, pasando de los 300 a 120 msnm particularmente en el sector este (paso de la tubería forzada y casa de máquinas).

Dedicados actualmente a la ganadería, también se aprecian algunos parches de bosque sobre quebradas y en el cañón del río como se observa en la fotografía 7.3.7 (río Reventazón al fondo).

Los ultisoles presentes en la asociación (U3 fe) son profundos con altos contenidos de arcilla. De color rojo amarillento (5YR4/6 a 5/6). Poseen baja fertilidad y según el MAG es posible que sean **Typic Tropudult** y de acuerdo a la metodología clasifican como tierras de clase VI y VII severamente erosionadas.

Fotografía 7.3.7.
Margen derecha río Reventazón, sector El Coco



Caracterización del sitio	Dato
Orden	Ultisoles
Unidad cartográfica¹	Mirador Siquirres (U3 fe)
Unidad taxonómica²	Typic Tropudult
Localización	El Coco, Siquirres
Fisiografía	Cañon
Relieve	Fuertemente escarpado
Uso actual	Potrero arbolado

^{1 y 2} Tomado del Manual Descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica, MAG

Caracterización del perfil típico ³	Valores
Pendiente	100%
Erosión sufrida	Severa
Profundidad efectiva	Moderadamente profundo (>90 cm)
Textura del perfil	Arcilloso
Pedregosidad	Ligermente pedregoso
Fertilidad aparente	Baja
Drenaje	Excesivo
Riesgo de inundación	Nulo
Zona de vida	Bosque muy húmedo tropical
Coloración del perfil	5YR 4/6
Nivel freático	No visible
Capacidad de uso	Ville12

³ Determinación en campo de los horizontes presentes en el perfil

**Manual descriptivo de la leyenda del
Mapa de capacidad de uso de la tierra de Costa Rica
Escala 1:200.000, Consultora Acon Asociados S.A.**

ASOCIACION	CARACTERISTICAS	UNIDAD TAXONOMICA
Río Reventazón (I39)	Son planos, profundos de texturas medias a moderadamente finas a través del perfil. De colores pardo grisáceo muy oscuro a pardo oscuro. De drenaje bueno, muy bueno y permeables. De fertilidad alta. Son suelos clase II.	Fluventic Eutropept Typic Tropofluvent Lithic Tropofluvent Fluvaquentic Eutropept
Germania (I41)	Se localizan en terrenos ligeramente ondulados a ondulados. Son moderadamente profundos a profundos. De textura moderadamente finas a finas en los substratos. Son de color pardo oscuro a pardo amarillento en el subsuelo. De drenaje bueno y permeabilidad moderada. Fertilidad baja a media.	Typic Dystropept Aquic Dystropept Aeric Tropaquept
La Alegría de Siquirres (I45)	Son suelos localizados en relieve ligeramente ondulado a ondulado. Profundos, de texturas moderadamente finas a finas. Pardo amarillento oscuro a pardo amarillento en el subsuelo. Bien drenados y moderadamente permeables. Moderados en la fertilidad.	Typic Dystropept Andic Dystropept Typic Dystrandepet
Bonilla (I125)	Presentan un relieve fuertemente ondulado, de pendiente entre 15 – 30%. Son suelos moderadamente profundos a profundos. De texturas moderadamente finas a finas. De color pardo a pardo amarillento oscuro. Son suelos de drenaje y moderada permeabilidad, y de fertilidad baja. Son suelos clasificados clase IV.	Andic Humitropept Typic Dystrandepet Typic Dystropept
Pacayitas (I126)	Son suelos de relieve fuertemente ondulados. Moderadamente profundos. De texturas finas a moderadamente finas. Pardo a pardo fuerte. Drenaje algo excesivo y moderada permeabilidad. De fertilidad baja.	Andic Humitropept Typic Hoplohumult
Mirador de Siquirres fase fuertemente ondulada (U3 (f.e))	Son suelos de relieve escarpado a fuertemente escarpado, profundos. De texturas finas. De color pardo oscuro a pardo fuerte y rojo amarillento en el subsuelo. Son de drenaje bueno y de moderada permeabilidad. Son de baja fertilidad. Son suelos de clase VI.	Typic Tropudult Typic Haplohumult Typic Tropohumult

7.4 Clima

Generalidades

El proyecto hidroeléctrico Reventazón se localiza en la región media-baja de la cuenca del río Reventazón. Esta cuenca está influenciada por las condiciones climáticas que rigen en la vertiente del Caribe de Costa Rica. El clima de esta región se caracteriza por los pronunciados cambios espaciales y temporales de la precipitación. Estos cambios obedecen a las variaciones estacionales del flujo en la escala sinóptica y local, y a la interacción de este flujo con la pronunciada orografía de la zona.

La vertiente del Caribe se encuentra bajo la influencia directa de los vientos alisios (flujo con una dirección media del este-noreste en el hemisferio norte) y por el desplazamiento estacional del anticiclón del Atlántico Norte. El viento alisio se intensifica durante el período comprendido entre diciembre y abril y durante los meses de julio y agosto. En el período de diciembre a febrero, Centro América se ve afectada por frecuentes intrusiones de masas de aire frío que se originan en Norte América y se desplazan hacia el sur hasta alcanzar el Mar Caribe. Al desplazarse estas masas de aire frío sobre el Golfo de México, se cargan de humedad y, cuando alcanzan el istmo centroamericano, interaccionan con la orografía de la zona, produciendo lluvias de tipo estratiforme que persisten por varios días y que afectan a toda la vertiente.

Durante el período de mayo a noviembre, la precipitación es predominantemente de tipo convectiva. Este tipo de precipitación se caracteriza por ser de alta intensidad, corta duración y muy localizada. Es importante mencionar que durante los meses de julio y agosto, debido a la intensificación del viento Alisio, la precipitación es estratiforme con las mismas características que la que se presenta durante el período de diciembre a abril.

En general se puede afirmar que la vertiente del Caribe de Costa Rica se caracteriza por no tener una época seca claramente definida, presentándose precipitaciones durante todo el año.

- **Clasificación climática.**

El relieve de la cuenca muestra elevaciones que van desde el nivel del mar hasta aproximadamente 3500 metros; esto origina diversos tipos de climas en distancias relativamente cortas. Según la clasificación de Köppen, la cuenca del río Reventazón presenta los siguientes climas:

- a) Clima Templado Lluvioso Cw 'a

Se presenta en la parte alta de la cuenca entre los 2000 y 3500 m.s.n.m., se caracteriza por presentar una disminución en las lluvias durante los meses correspondientes al invierno del hemisferio norte (diciembre a abril). Las lluvias del mes más lluvioso durante el verano del hemisferio norte son 10 veces mayores que las lluvias del mes más seco durante el invierno boreal. La temperatura media del mes más frío es inferior a los 18° C pero superior a los -3° C; el mes más caluroso es cálido con temperaturas superiores a los 20° C.

b) Clima Templado Húmedo Cfa

Se presenta en la parte media superior de la cuenca entre los 850 y 2000 m.s.n.m., se caracteriza por no definirse claramente una estación seca; en el mes de menos lluvias la precipitación supera los 30 mm, la temperatura media del mes más frío es inferior a los 18° C pero superior a los -3° C; los meses correspondientes al verano en el hemisferio norte son cálidos y en el mes más caluroso la temperatura sobrepasa los 22° C.

c) Clima Tropical Lluvioso Afw"

Este tipo de clima afecta principalmente las regiones media inferior y baja de la cuenca, entre el nivel del mar y los 850 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar variaciones estacionales mínimas en la precipitación y en la temperatura, ambos presentan valores elevados. En el mes más frío las temperaturas son mayores a los 18° C y los valores mínimos de lluvia mensual es de 60 mm o mayores. La temporada de lluvia está dividida en dos, con un corto período de disminución intercalado.

- **Información disponible.**

Para el análisis de la precipitación media sobre la cuenca hasta el sitio de presa, se utilizaron las estaciones medidoras de precipitación localizadas dentro de la cuenca así como las adyacentes a la misma.

La consistencia de la información anual se verificó por el por el método de doble masa y se completó la información faltante en las estaciones que no tenían el período completo por medio de correlaciones con las estaciones base. El período analizado comprende del año 1970 al año 2002.

En la figura 7.4.1 se muestra la red de estaciones meteorológicas que cubren la cuenca del río Reventazón hasta la estación hidrométrica de Pascua. Por presentar una zona montañosa en la parte alta y media de la cuenca, el área de representatividad de las estaciones varía según el relieve de la zona en que cada una se ubica.

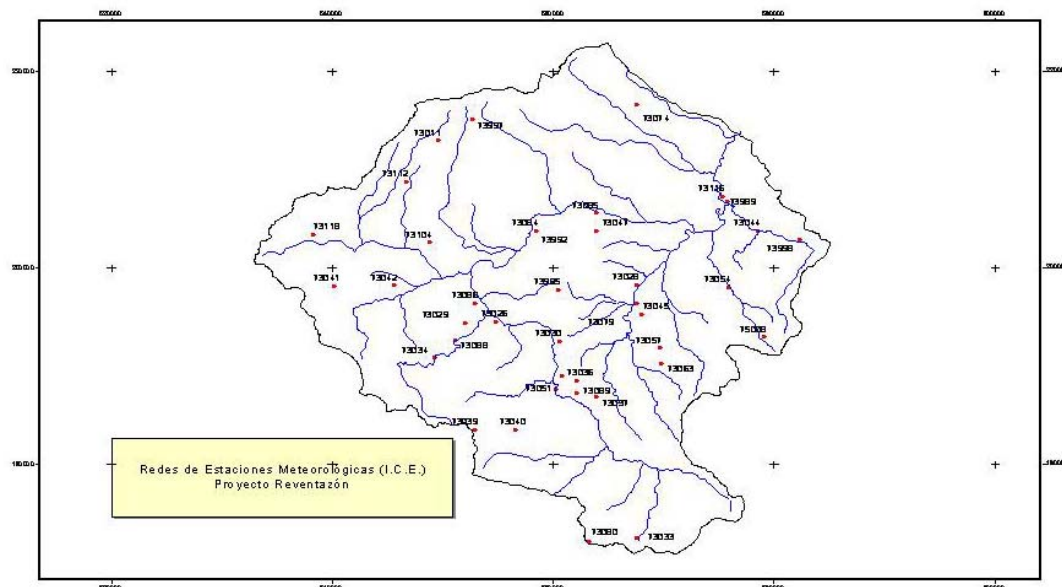
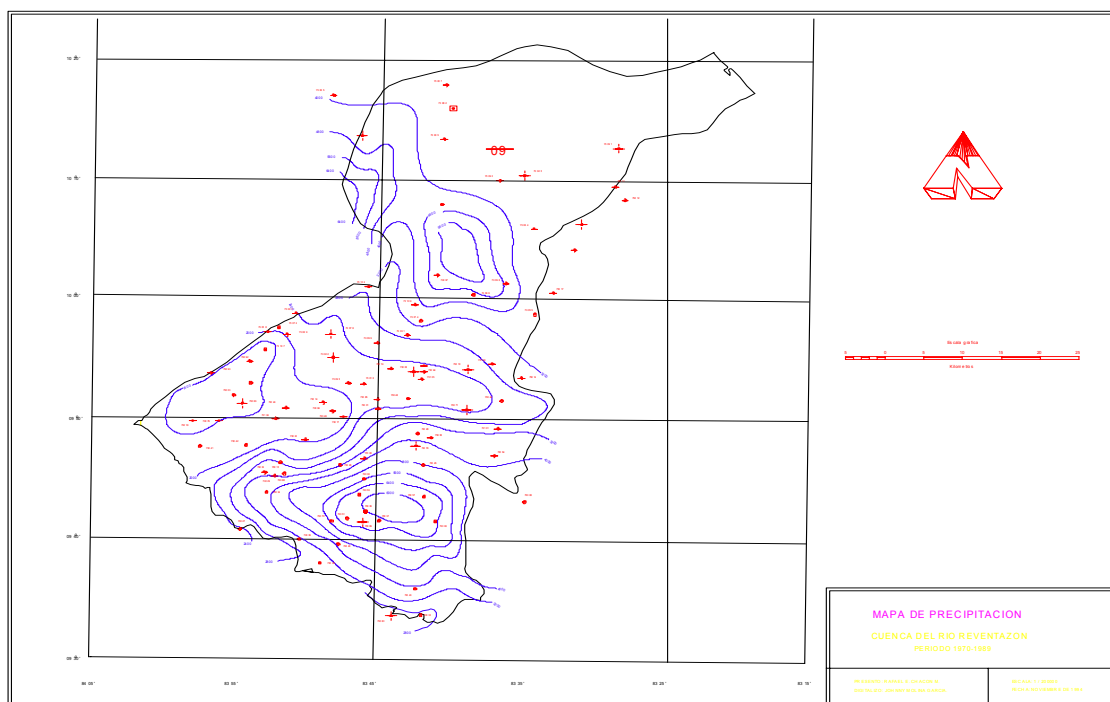


Figura 7.4.2
Isoyetas medias anuales de la cuenca del río Reventazón



- **Distribución temporal de la precipitación.**

En la vertiente del Caribe se presentan diferentes regímenes de precipitación por causa de las variaciones estacionales del flujo en la escala sinóptica y local, y las interacciones entre este flujo y la pronunciada orografía.

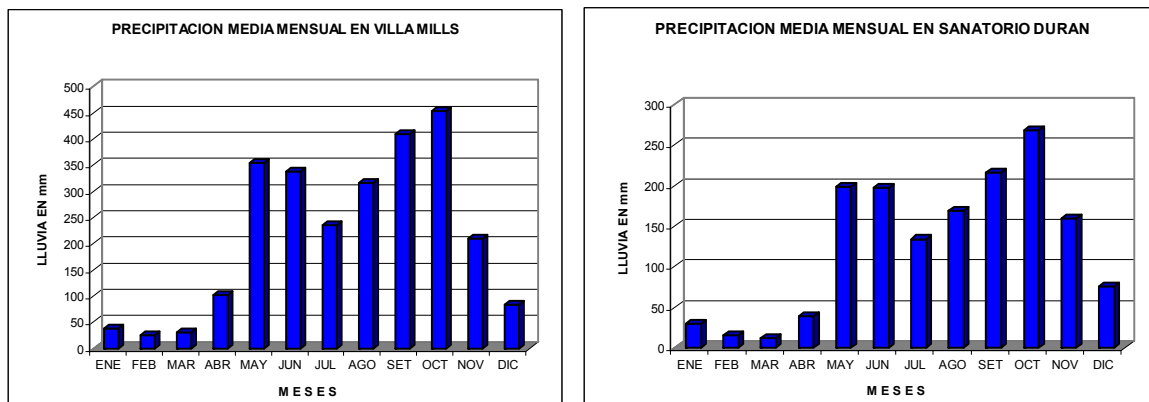
Para la cuenca del río Reventazón, en el cuadro 7.4.1 se presentan los valores medios mensuales de la precipitación en estaciones ubicadas a diferentes elevaciones dentro de la cuenca.

Cuadro 7.4.1.
Valores promedios mensuales de precipitación
en estaciones de la cuenca del río Reventazón

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
VILLA MILLS	37.1	25.5	30.8	101.3	354.4	338.3	235.3	315.8	408.4	452.9	210.2	82.6	2592.6
SA. DURAN	29.7	15.0	12.0	38.7	198.8	196.7	134.1	169.0	215.7	268.5	159.3	75.8	1513.2
T-SEIS	565.9	403.1	363.0	456.6	657.7	737.7	765.6	791.2	705.8	765.1	788.2	664.1	7664.1
LA SUIZA	153.0	105.6	66.9	127.9	255.2	293.7	257.5	266.0	297.7	280.1	259.3	246.5	2609.3
EL SAUCE	250.3	240.9	195.0	223.0	391.7	345.8	348.1	364.6	269.3	326.9	339.9	372.9	3668.4
SIQUIRRES	286.6	219.3	164.9	251.6	358.0	363.0	398.0	373.5	246.9	318.0	423.8	442.7	3846.4

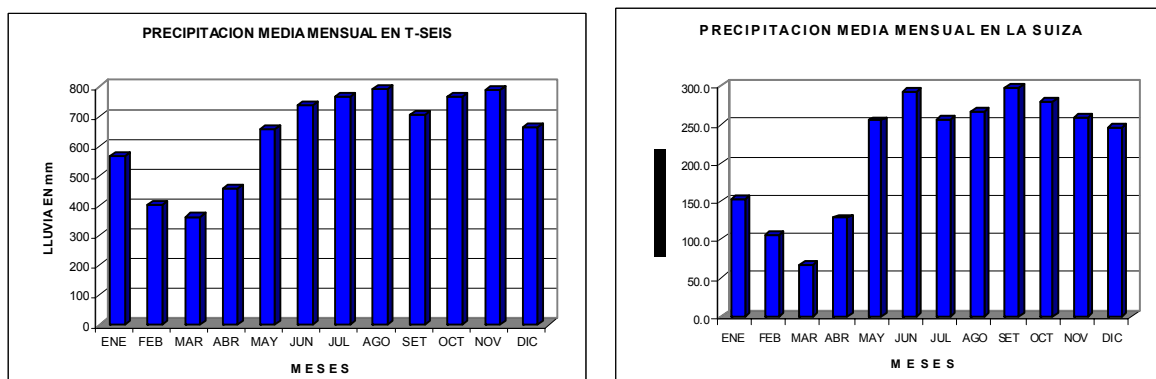
La estación 73033 Villa Mills en la parte más alta de la cuenca y la estación 73011 Sanatorio Durán ubicada en la región noroeste de la cuenca, presentan una estación seca perfectamente definida de diciembre a marzo, una estación lluviosa de mayo a noviembre con un mes de transición (abril). Esta distribución es propia de la zona limítrofe entre las dos vertientes que forman el país y es típico del régimen seco de altura. En la figura 7.4.3 se grafican los valores de estas dos estaciones.

Figura 7.4.3.
Precipitación media mensual en Villa Mills y Sanatorio Durán



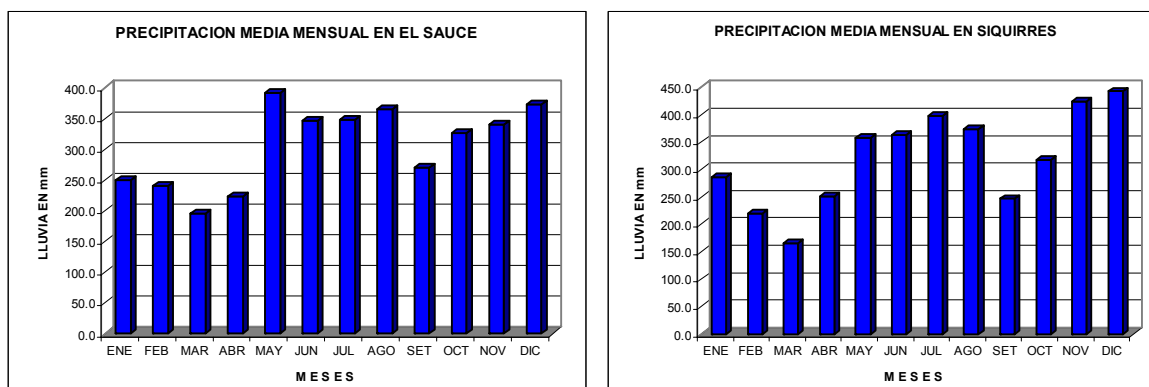
En la zona media de la cuenca, comprendida entre los 600 y 2000 metros de altitud, la pluviosidad es alta durante todo el año. En las faldas de la cordillera de Talamanca del lado del Caribe se ubica la estación 73036 T-Seis, donde en el mes de agosto tiene una precipitación media superior a los 790 mm y en el mes de marzo que es el más seco presenta 363 mm. En la zona media inferior se localiza la estación 73044 La Suiza, cuya distribución presenta su mínimo en el mes de marzo con 67 mm y el mes más lluvioso es setiembre con 298 mm. Ambas estaciones tienen una distribución temporal de la precipitación similar, pero los valores medios mensuales difieren grandemente en el total de lluvia. En la figura 7.4.4 se grafican los valores de estas dos estaciones.

Figura 7.4.4
Precipitación media mensual en T-Seis y La Suiza



En las proximidades del sitio de presa Reventazón se ubica la estación 73096 El Sauce, la cual se puede considerar como representativa de la zona. El mes más lluvioso es mayo con 392 mm y el mínimo se presenta en marzo con 195 mm. El promedio anual es de 3668 mm. La parte baja de la cuenca presenta un régimen de alta precipitación durante todo el año; la estación 75002 Siquirres no pertenece a la cuenca del río Reventazón, pero está muy próxima a ella y se puede considerar como representativa de las condiciones cercanas al sitio de presa; se observa que aunque llueve durante todo el año se pueden distinguir dos ciclos de lluvia bien definidos, uno de abril a setiembre con un máximo en el mes de julio y otro ciclo de octubre a marzo con un máximo en el mes de diciembre. Esta distribución es propia de las regiones costeras de la vertiente del Caribe del país en donde la influencia del flujo alisio define los máximos de lluvia en diciembre y julio. El mes con menor precipitación es marzo con valores cercanos a los 165 mm, los meses de julio, noviembre y diciembre presentan totales mensuales superiores a los 400 mm. El total promedio anual de precipitación es 3846.4 mm. En la figura 7.4.5 se grafican los valores de estas dos estaciones.

Figura 7.4.5.
Precipitación media mensual en El Sauce y Siquirres



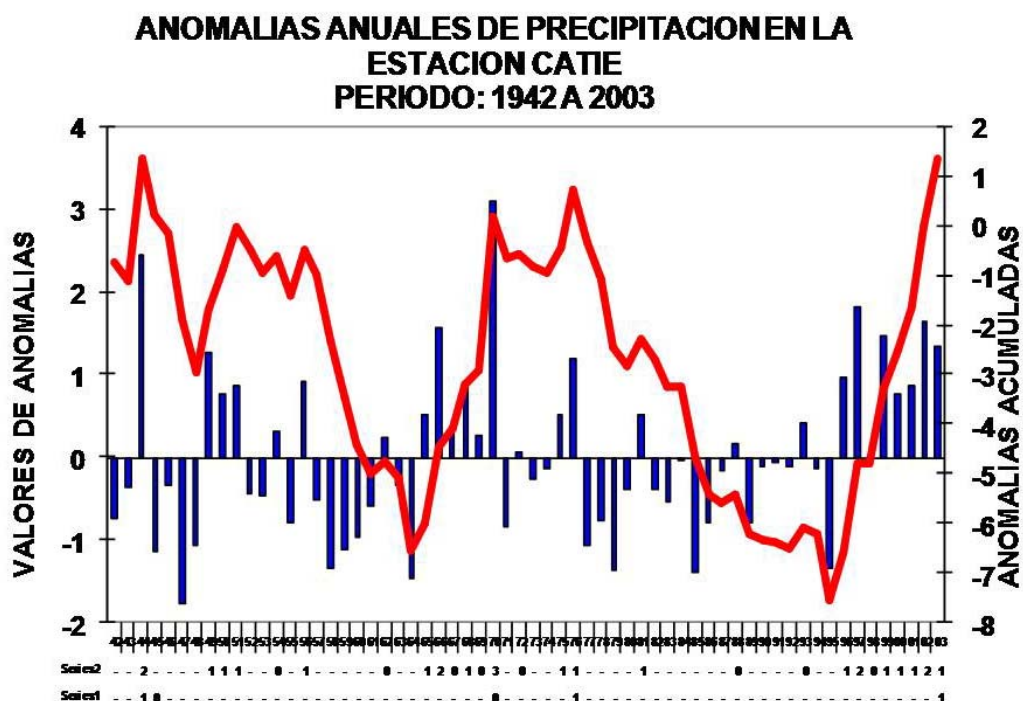
El comportamiento temporal de la precipitación a largo plazo, es posible analizarlo con los datos de precipitación de una serie lo suficientemente larga para poder definir los ciclos secos y húmedos que se han observado. El patrón de precipitación registrado en la estación 73010 CATIE, localizada cerca del centroide de la cuenca, se puede tomar como representativo de las condiciones promedio sobre la cuenca. Esta estación tiene un registro pluviográfico bastante extenso el cual se inicia en el mes de enero de 1942. Con base en los 62 años de registro del CATIE, de 1942 a 2003, se hace la clasificación de años secos y húmedos usando la distribución estadística de quintiles. A continuación se presentan los límites de los quintiles:

<u>QUINTIL</u>	<u>PRECIPITACIÓN</u>	<u>CLASIFICACIÓN</u>
I	$P < 2267.3$	Muy seco
II	$2267.3 < P < 2492.2$	Seco
III	$2492.2 < P < 2743.4$	Normal
IV	$2743.4 < P < 3134.3$	Lluvioso
V	$P > 3134.3$	Muy lluvioso

Con base en los registros anuales de precipitación en la estación del CATIE, es posible determinar los ciclos de precipitación que se han presentado durante el período desde

1942 a 2003. Esto es posible con las anomalías normalizadas anuales y con la acumulación de las mismas. En el gráfico de la figura 7.4.6 se muestran las anomalías con barras y su acumulación con línea roja.

Figura 7.4.6
Gráfico de las anomalías de la precipitación anual registrada en la estación del CATIE con respecto a la precipitación media anual del período 1942-2003.



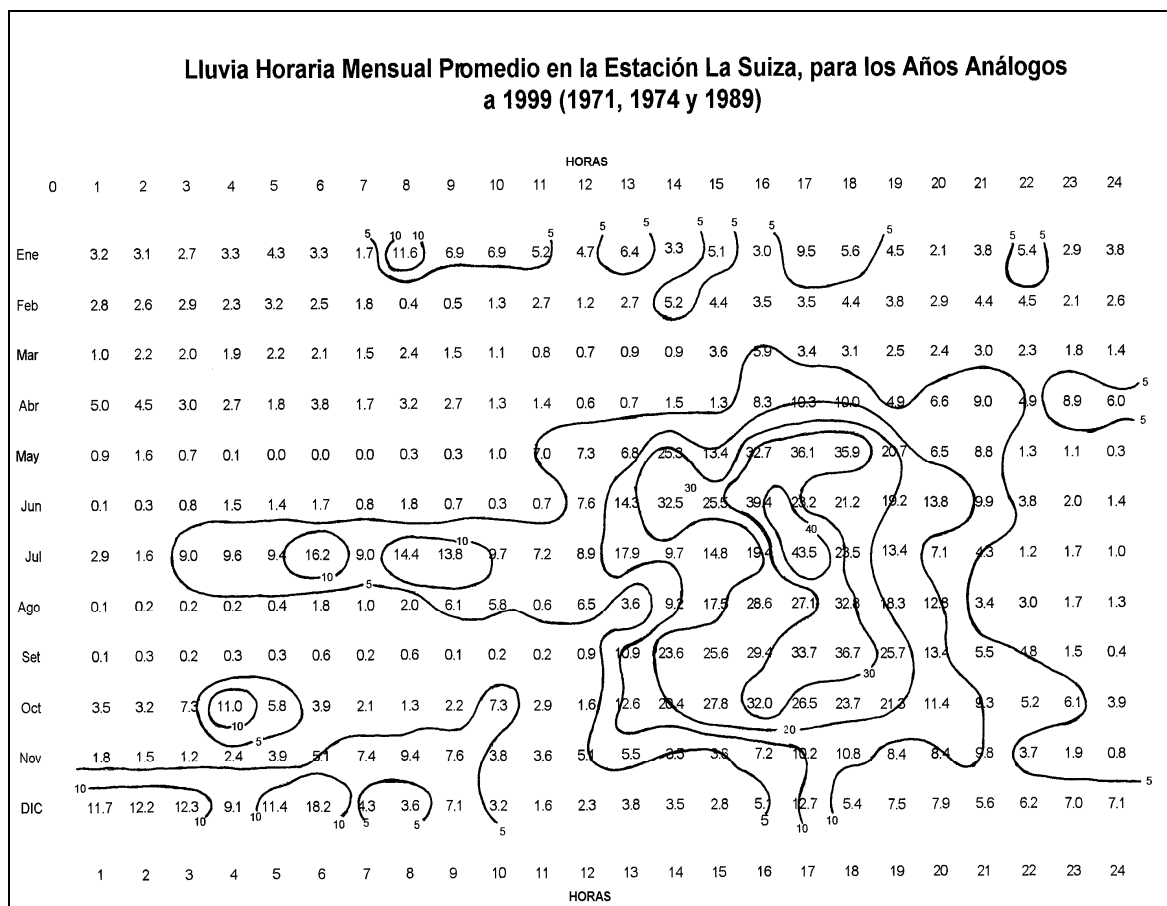
De este gráfico se puede concluir que la precipitación en esta zona no presenta ninguna tendencia determinada; se registran 35 años con desviaciones negativas y 27 con desviaciones positivas. Sin embargo, se tiende a agrupar los años secos y los años húmedos.

Durante el período analizado se dieron dos ciclos secos prolongados: de 1952 a 1964 y de 1977 a 1995. La precipitación anual media del 52 al 64 fue 10% menor que el promedio y la del 77 al 95 fue 8.5% inferior al promedio. Se dieron dos ciclos húmedos prolongados: entre 1965 y 1970 se presenta un período húmedo cuya precipitación promedio es 21.6% superior a la precipitación media anual; el año más crítico de este período fue 1970 con un total de precipitación 60% superior al promedio anual. Finalmente, de 1996 al 2003 se presenta otro ciclo húmedo que es 21% superior al promedio. Los años con mayor desviación positiva son: 1970 con 60% y 1944 con 47.5%. Los de mayor desviación negativa son: 1947 con 34% y 1964 con 28%.

En cuanto a la distribución horaria de la precipitación sobre la cuenca, se ha graficado la distribución horaria mensual de la lluvia para la estación 73044 La Suiza para varios años análogos al año 1999. Se escogió esta estación por ser muy cercana al centroide de la cuenca y tener una distribución temporal de la precipitación a nivel mensual que es

representativa de la zona media de la cuenca comprendida entre los 600 y 2000 metros de altitud. En la figura 7.4.6 se muestran los valores horarios mes a mes para obtener en forma gráfica el comportamiento de las horas y meses de mayor precipitación a lo largo del año. En la figura se tienen las horas a lo largo del eje X y los meses a lo largo del eje Y, los valores de lluvia están expresados en milímetros.

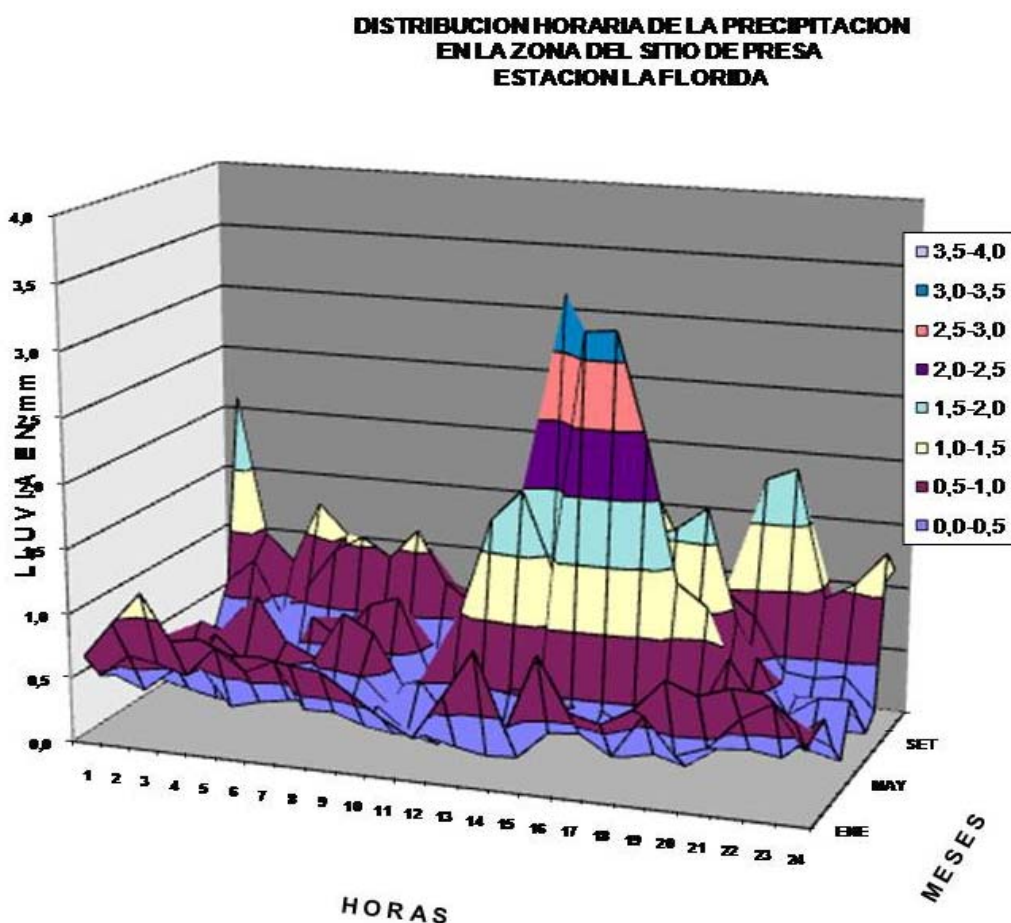
Figura 7.4.7.
Distribución horaria mensual de la lluvia en la estación La Suiza.



En la figura 7.4.7 se puede apreciar que los meses con más escasa precipitación son febrero y marzo. De abril a enero se observan dos patrones bien definidos de distribución horaria de la precipitación: uno de tipo convectivo que se centra en horas de la tarde y se extiende hasta casi media noche durante los meses de la estación lluviosa y con valores superiores a 43 mm por hora en el mes de julio a las 17 horas; este núcleo de media tarde y noche es consistente de abril a noviembre. En el mes de julio, además del núcleo convectivo de la tarde, se notan núcleos menores durante la madrugada y por la mañana como consecuencia de la aceleración del flujo alisio sobre la vertiente del Caribe. En los meses de noviembre y diciembre se muestran lluvias entre la media noche y primeras horas de la mañana por efecto de la aceleración del flujo alisio y de los empujes frontales propios de esos meses y que son responsables de los temporales del Caribe a finales y principios de años.

Para tener un mejor criterio del comportamiento horario de la precipitación cerca del sitio de presa, hemos tomado los datos horarios de la estación La Florida, con datos de los últimos dos años hemos graficado su comportamiento y se muestra en el gráfico de la figura 7.4.8. El patrón de lluvias horarias es bastante similar al de la estación La Suiza mostrado en la figura 7.4.4. Este patrón de distribución horario de la precipitación es el que predomina en las zonas medias de las cuencas de la vertiente del Caribe de todo el país.

Figura 7.4.8.
Distribución horaria mensual de la precipitación en la estación La Florida



- **Comportamiento Mensual de la Evaporación, la Temperatura y la Humedad Relativa.**

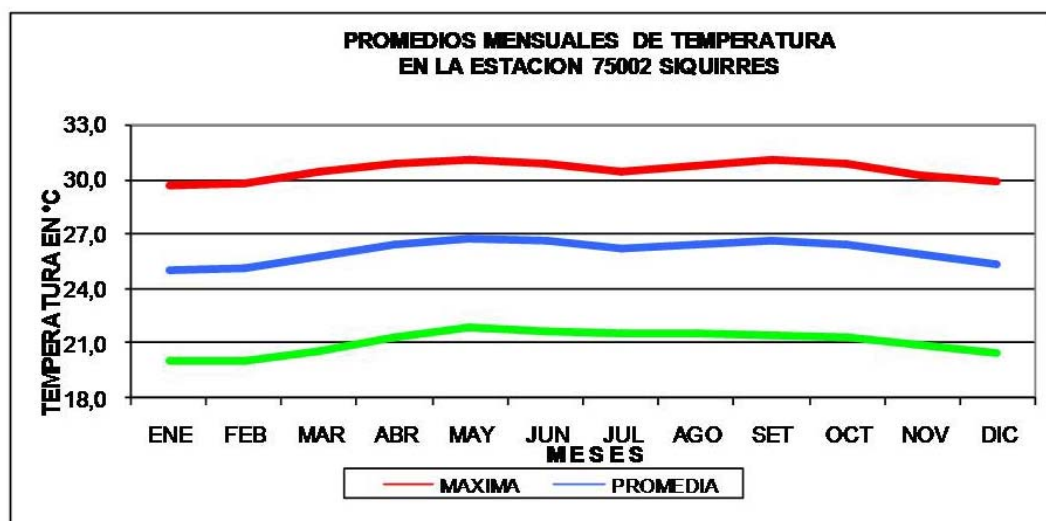
Las distribuciones mensuales de la temperatura, la humedad relativa y la evaporación se presentan en el cuadro 7.4.2, el 7.4.3 y 7.4.4. Las estaciones 75002, Siquirres, 73080 Repetidora Cerro de la Muerte y 73046 Cachí, se tomaron como las más representativas de los parámetros arriba enumerados para la cuenca del Río Reventazón en los niveles bajos, altos y medios respectivamente. La estación 75002, Siquirres se encuentra en la cuenca del Río Pacuare a una elevación de 70 m.s.n.m., la estación 73080 Repetidora Cerro de la Muerte se encuentra en la cuenca del Reventazón a una elevación de 3475 msnm, finalmente, la estación 73046 Cachí se ubica en la presa del mismo nombre con una elevación de 1018 m.s.n.m.

Cuadro 7.4.2.
Valores medios mensuales en la Estación 75002 Siquirres

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T. MAXIMA	29.7	29.8	30.4	30.8	31.1	30.9	30.4	30.8	31.1	30.9	30.2	29.9	30.5
T.PROMEDIO	25.0	25.1	25.8	26.4	26.8	26.6	26.2	26.4	26.6	26.4	25.9	25.3	26.1
T.MINIMA	20.0	20.1	20.5	21.3	21.9	21.7	21.6	21.6	21.5	21.3	21.0	20.5	21.1
EVAPORACION	98.0	95.3	122.3	113.7	115.5	98.4	97.9	104.5	99.4	101.9	89.8	89.0	1225.7
HUM. RELATIVA	83	82	80	81	83	84	85	85	84	84	85	84	83

En la cuenca del Río Reventazón, el patrón de distribución mensual de temperaturas muestra muy poca variación a lo largo del año. En la estación 75002, Siquirres la temperatura media anual es de 26.1 °C. El mes más frío es enero con una temperatura media de 25.0 °C y el mes más cálido es mayo con un temperatura promedio de 26.8 °C. En la figura 7.4.9 se muestra el gráfico de temperaturas en Siquirres.

Figura 7.4.9.
Promedios mensuales de temperatura en Siquirres

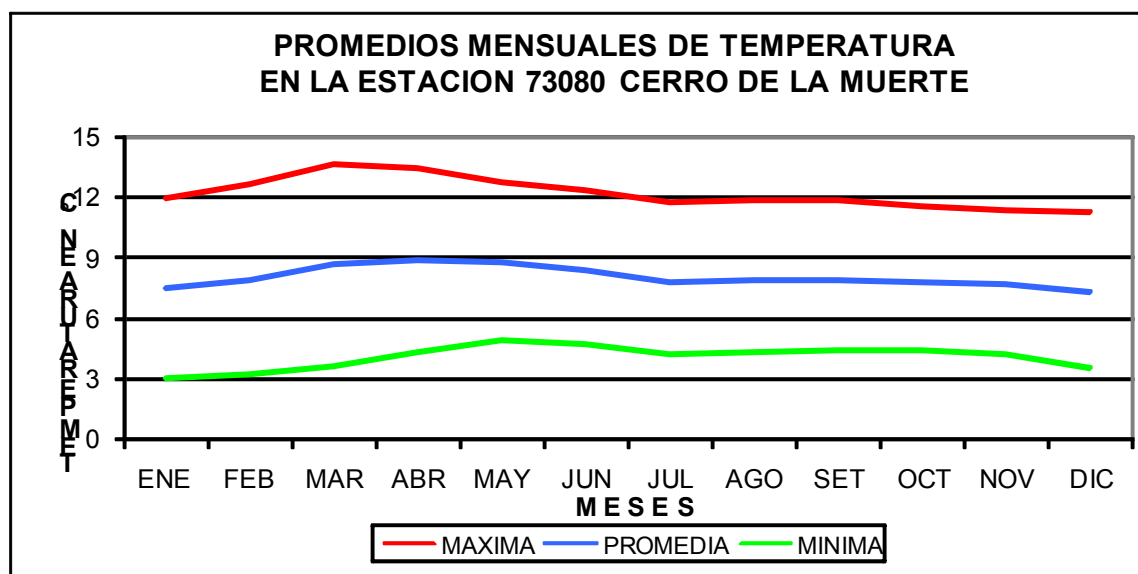


Cuadro 7.4.3.
Valores medios mensuales en la Estación 73080 Cerro de la Muerte

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
T. MAXIMA	12.0	12.7	13.6	13.5	12.8	12.4	11.8	11.9	11.9	11.6	11.4	11.3	12.2
T.PROMEDIO	7.5	7.9	8.7	8.9	8.8	8.4	7.8	8.0	7.9	7.9	7.8	7.3	8.1
T.MINIMA	3.0	3.2	3.7	4.3	4.9	4.7	4.2	4.3	4.5	4.5	4.2	3.5	4.1
EVAPORACION	88.8	86.0	101.2	84.2	64.1	58.8	59.9	63.7	57.6	54.6	54.4	70.1	843.4
HUM. RELATIVA	80	80	79	83	90	91	91	91	92	92	90	86	87

La temperatura muestra una notable variación con la altura, en la estación 73080, Cerro de la Muerte, a una elevación de 3475 msnm, la temperatura promedio anual es de 8.1 °C. La temperatura promedio mensual más alta se registra en el mes de abril con un valor de 8.9 °C, mientras que la temperatura promedio mensual más baja se da durante el mes de diciembre y tiene un valor de 7.3 °C. Cabe recordar que el gradiente de temperatura varía con la altura a razón de 6° C por cada 1000 metros. En la figura 7.4.10 se grafican los valores de la temperatura en la estación del Cerro de la Muerte.

Figura 7.4.10.
Promedios mensuales de temperatura en Cerro de la Muerte

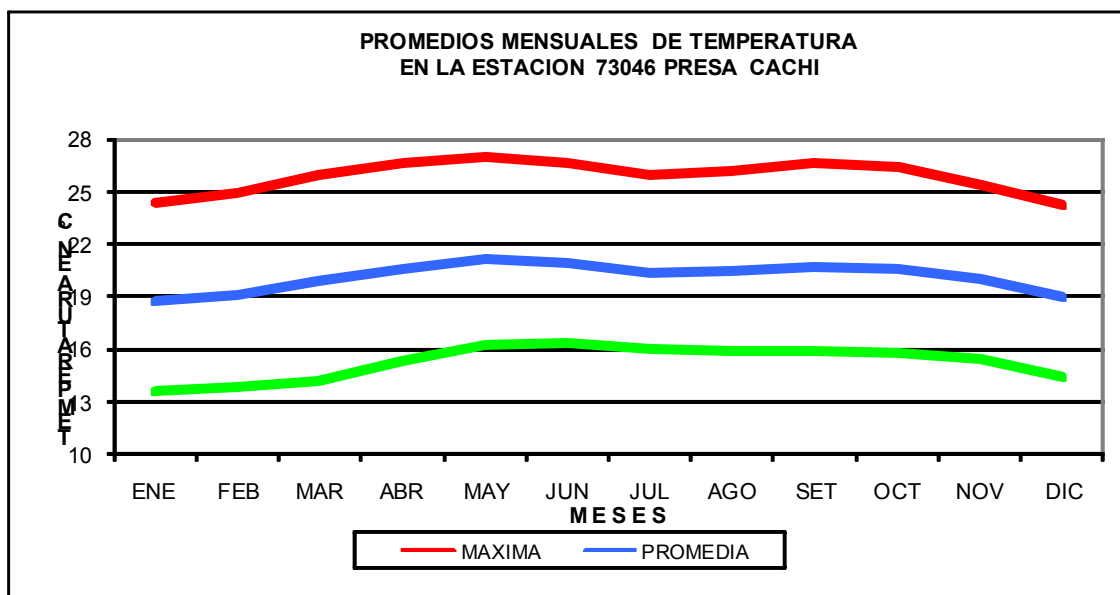


La estación 73046 Cachí se ubica a orillas de la presa del mismo nombre y consideramos que es representativa de las condiciones climáticas de la zona media de la cuenca. En el cuadro 7.4.4 se muestran los valores promedio mensuales de varios parámetros en esta estación.

Cuadro 7.4.4.**Valores medios mensuales en la Estación 73046 Cachi**

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
T. MAXIMA	24.5	25.0	26.1	26.7	27.1	26.7	26.0	26.3	26.8	26.5	25.4	24.3	25.9
T.PROMEDIO	18.8	19.1	19.9	20.7	21.2	21.0	20.4	20.6	20.7	20.6	20.0	19.1	20.2
T.MINIMA	13.6	13.8	14.2	15.4	16.3	16.3	16.0	15.9	15.9	15.8	15.5	14.4	15.3
EVAPORACION	100.6	106.5	134.0	128.7	116.9	101.8	104.4	105.6	106.5	109.5	92.4	92.0	1298.7
HUM. RELATIVA	83	82	80	79	81	84	84	84	84	84	85	85	83

Al igual que en la parte baja de la cuenca, el patrón de distribución mensual de temperaturas muestra muy poca variación a lo largo del año. En la estación 73046, Cachi, la temperatura media anual es de 20.2 °C. El mes más frío es enero con una temperatura media de 18.8 °C y el mes más cálido es mayo con un temperatura promedio de 21.2 °C. En la figura 7.4.11 se muestra el gráfico de temperaturas en Cachi

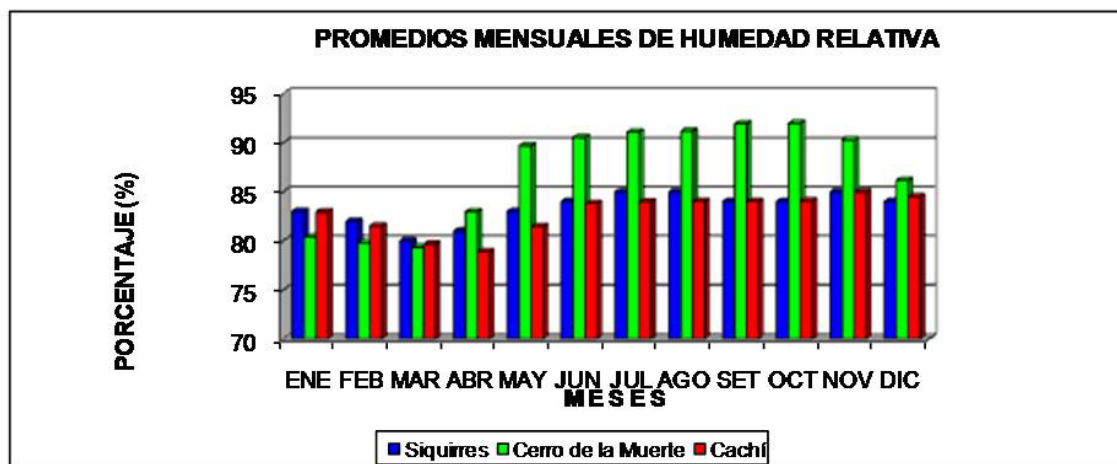
Figura 7.4.11.**Promedios mensuales de temperatura en Cachi**

La humedad relativa muestra valores altos en toda la cuenca a lo largo del año. Estos valores están en concordancia con el régimen de precipitación de la zona que no muestra una marcada época seca en esta región del país. El valor promedio anual de la humedad relativa en la estación 75002, Siquirres es de 83%, en la estación 73080, Cerro de la Muerte es de 87% y en la estación 73046 Cachi es 85%. En el comportamiento mensual es que se notan ligeras variaciones, en Siquirres y Cachi los valores son muy similares a lo largo del año, pero en el Cerro de la Muerte se nota una mayor variación entre los meses que corresponden a la estación seca en la vertiente del Pacífico, diciembre a abril, y los que corresponden a la estación lluviosa, mayo a noviembre. Esto se debe a la ubicación de la estación en la divisoria continental, esto hace que las características

climáticas propias de la vertiente del Pacífico influyan en su comportamiento; a esto debe sumarse la altitud de la estación que favorece la presencia de niebla durante la tarde y horas de la noche. En el gráfico de la figura 7.4.12 se muestra el comportamiento de la humedad relativa en las tres estaciones.

Figura 7.4.12.

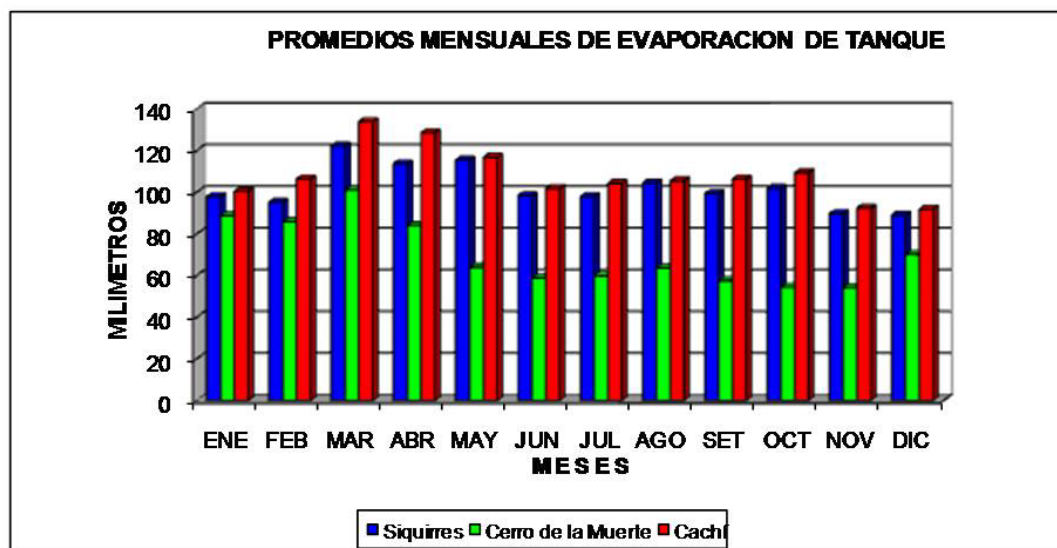
Promedios medios mensuales de humedad relativa en estaciones del Reventazón



El valor promedio anual de la evaporación, medida en un tanque de evaporación tipo A, es de 1225.7 mm en la estación 75002, Siquirres, de 843.4 mm en la estación 73080, Cerro de la Muerte y de 1298.7 mm en la estación 73046, Cachí. La figura 7.4.13 muestra la variación mensual de la evaporación en las tres estaciones. Para fines de referencia en la zona del embalse tomaremos los datos de la estación 75002 Siquirres. El valor mínimo de la evaporación promedio mensual es de 89.0 mm y se registra en el mes de Diciembre, mientras que el valor máximo ocurre en el mes de Marzo con un valor de 122.3 mm.

Figura 7.4.13.

Promedios mensuales de evaporación de tanque.



- **Evapotranspiración potencial (ETP).**

La evapotranspiración potencial, ETP, puede ser definida de acuerdo con Penman (1942) como “la cantidad de agua que se pierde en forma de vapor desde el complejo suelo-planta, en la unidad de tiempo, una cobertura vegetal completa, cubriendo totalmente el suelo, de altura uniforme y siempre que el suministro de agua no sea limitante”.

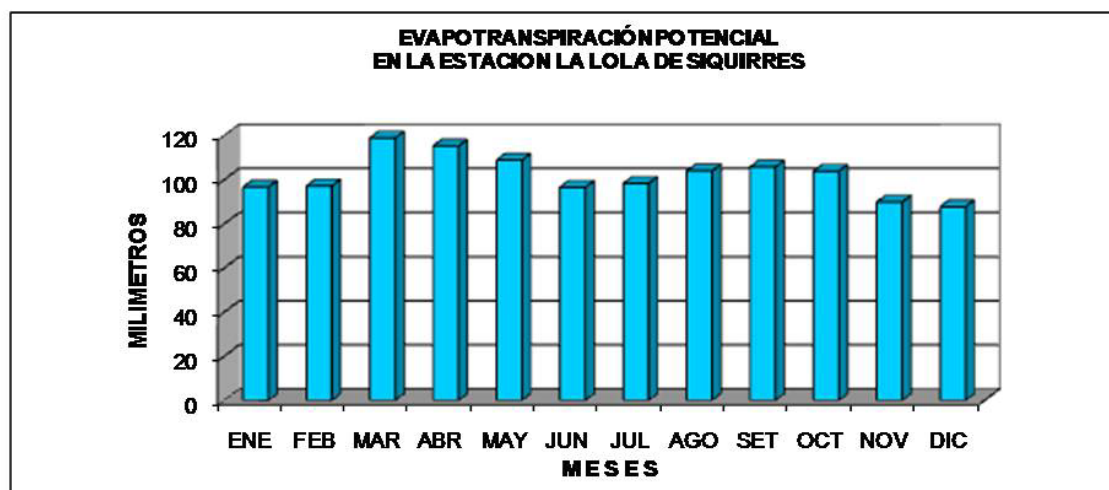
La E.T.P. depende del poder evaporativo del aire, determinado por la radiación, temperatura, viento y humedad.

El embalse del Proyecto Hidroeléctrico de Reventazón tendrá un área de 6.86 Km² en la cota 275 msnm, las pérdidas anuales de volumen se estimarán con base en la evaporación y evapotranspiración potencial calculadas en la estación N° 77002 La Lola de Siquirres que se considera representativa de las condiciones del futuro embalse.

La evapotranspiración se suele calcular a partir de diferentes variables climatológicas, como la temperatura, radiación solar, humedad del aire y viento. El método ideal para estimar la E.T.P. es aquel que considera todos los factores antes mencionados; sin embargo, en la cuenca, no se dispone de muchos de ellos, limitando la utilización de métodos como el de Penman. Según estudios de Castro el método de Penman se basa en fundamentos físicos y químicos que gobiernan la E.T.P. y ha sido comprobada su exactitud en diversos regímenes climáticos. Un método alternativo para Penman en el caso de Costa Rica es el método de Radiación, que permite utilizar estimaciones dentro de rangos amplios de humedad y viento.

En la figura 7.4.14 se presentan los valores mensuales de la E.T.P. (mm) en la estación 77002 La Lola de Siquirres. El total anual de E.T.P. es de 1223 mm. Los valores mensuales se obtuvieron aplicando la fórmula de Penman (1942).

Figura 7.4.14.
Evapotranspiración potencial en La Lola de Siquirres



La evapotranspiración real, o pérdida de agua en una cuenca bajo las condiciones reales de ella, se puede considerar como un porcentaje de la evapotranspiración potencial. El

porcentaje varía de acuerdo a la clase de terreno, superficie de los cultivos y vegetación que tenga la cuenca y la disponibilidad de agua para satisfacer estos consumos. En el caso del embalse del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, este se localiza en una zona donde hay predominio de bosques. Como no se dispone de mediciones directas de evapotranspiración real el sitio, se opta por obtener la evapotranspiración real con base en la E.T.P., multiplicando ésta por un coeficiente, K, que toma en cuenta el consumo propio de cada cultivo o vegetación que tengan los suelos. El coeficiente escogido es de 0.60 de acuerdo a estudios previos realizados en la cuenca.

La evapotranspiración actual del terreno cubierto con bosques es:

$$1223\text{mm} \times 0.60 = 733.8\text{mm}.$$

La evaporación es de 1241 mm, aplicando un coeficiente de embalse de 0.78 (estimado por el Proyecto Hidroeléctrico Centroamericano para el Istmo Centroamericano) para reducir la evaporación del evaporímetro a la correspondiente de la superficie libre del lago, se puede esmerar 968 mm de evaporación media anual representando un volumen de:

$$0.968 \text{ m} \times 6.86 \times 10^6 \text{ m}^2 = 6.64048 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Las pérdidas actuales son:

$$\text{Evaporación real} = 0.733\text{m} \times 6.86 \times 10^6 \text{ m}^2 = 5.02838 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La pérdida adicional de agua ocasionada por la creación del embalse será:

La evaporación del lago - pérdidas actuales del sitio

$$6.64048 \times 10^6 \text{ m}^3 - 5.02838 \times 10^6 \text{ m}^3 = 1.6121 \times 10^6 \text{ m}^3$$

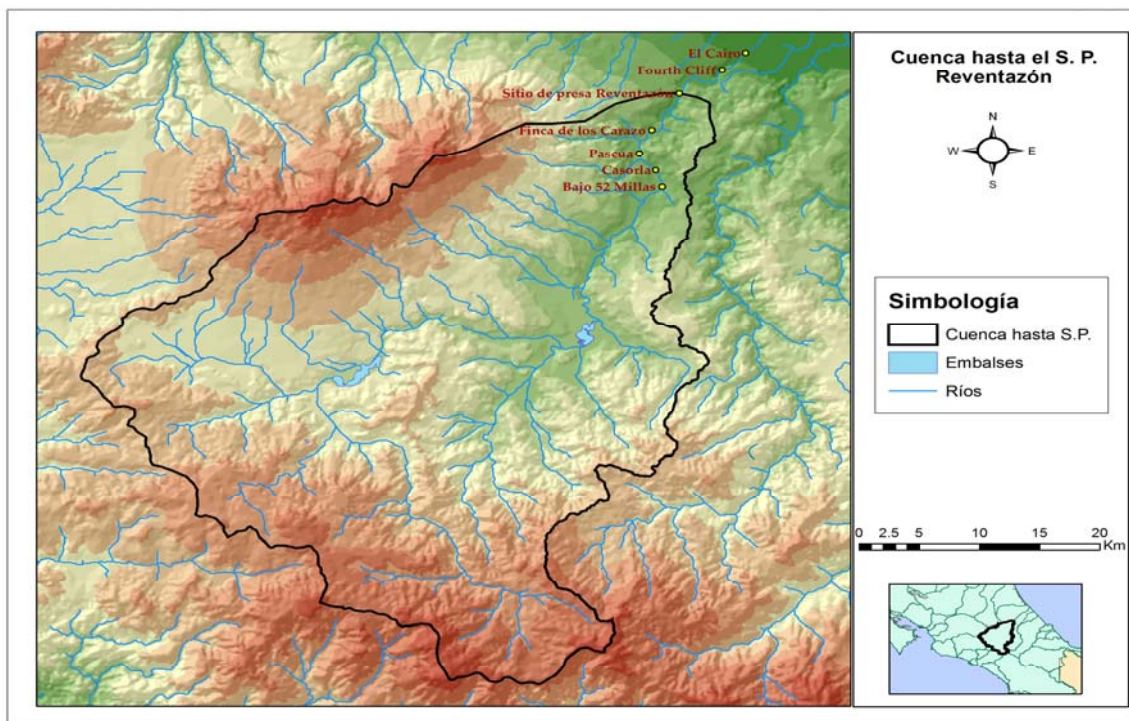
El resultado indica que la creación del embalse alterará la cantidad de agua disponible.

7.5 Hidrología

7.5.1 Aguas superficiales

La siguiente figura muestra la red de ríos principales, así como las estaciones hidrológicas que se encuentra dentro del área tributaria al sitio del proyecto.

Figura 7.5.1.1
Red hídrica y embalses en la cuenca tributaria al P.H. Reventazón



Calidad del agua

Para el estudio de caso del río Reventazón, se utilizó la información proporcionada por el Laboratorio de Estudios Básicos del Instituto Costarricense de Electricidad de los muestreos mensuales que se realizaron en el período 2000 – 2004 en el sitio donde se proyecta se ubicará la presa para el P.H. Reventazón. Se valoraron 18 parámetros físico químicos. A partir del año 2006 se continuó el estudio incorporando un sitio más de muestreo en la cuenca baja, donde se ubica la estación de medición hidrológica de Hamburgo y en el 2008 se adicionó otro punto de muestreo cerca de la restitución de Angostura (sitio Las Juntas).

De acuerdo al Reglamento para la evaluación y clasificación de cuerpos de agua superficiales (decreto 33903- MINAE-S, La Gaceta 2007) se recomienda utilizar el índice Holandés y el índice BMWP-CR.

EL Índice Holandés utiliza tres parámetros básicos para identificar contaminación orgánica en un cuerpo de agua: el porcentaje de saturación de oxígeno (OD), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el nitrógeno amoniacal. Este modelo de clasificación permite identificar temporal y espacialmente un cuerpo de agua, de manera que es posible identificar la calidad de un tramo en una época del año.

Dado que se contaba con mayor información de parámetros fisicoquímicos para el estudio del P.H. Reventazón se utilizó un índice estándar llamado Índice de Calidad del Agua (ICA), comúnmente llamado ICAFNS, desarrollado en 1970 por la Fundación Nacional de

Sanidad de los Estados Unidos de América (FNSEUA), el cual puede ser usado en la determinación de la calidad del agua de un río en un período de tiempo y poder comparar la calidad del agua en distintos puntos de un mismo río. Este ICA se compone de 9 parámetros físico-químicos y bacteriológicos. (Deininger,R. 1980.)

A cada uno de estos parámetros se les asigna un peso relativo a su aporte en el proceso de contaminación del cuerpo de agua, de manera que la sumatoria es igual a 1.0. Los valores obtenidos de cada parámetro físico-químico se grafican para obtener un valor Q, que debe multiplicarse por el peso correspondiente. Al sumar los valores obtenidos para cada parámetro re-obtiene un porcentaje total, con el cual se califica la categoría de calidad.

Categorías de calidad de aguas, aplicadas al ICAFNS

Valor (%)	Descripción de la calidad
90 - 100%	excelente
70 – 90%	buena
50 – 70%	regular
25 – 50%	mala
0 - 25%	Muy mala

Para los sitios del P.H. Reventazón se aplicó un ICA modificado en donde se toma en consideración sólo 6 parámetros físico – químicos. Porcentaje de saturación de oxígeno, pH, DBO, fosfatos totales, nitratos y sólidos totales.

Adicionalmente, se tomó como referencia la información de estudios anteriores de muestras de sedimentos en los sitios que alimentan el embalse de Cachí. También, en forma complementaria se utilizó el trabajo de Segura (2006) en el estudio de avance para la factibilidad del P.H. Reventazón, donde se aplicó el índice **BMWP'CR**, basado en la composición de las comunidades de invertebrados acuáticos y sus características como indicadores de contaminación para algunos afluentes y puntos en el cauce principal del Río Reventazón. Como parte de los estudios biológicos del EslA, se realizaron muestreos de invertebrados acuáticos en enero y febrero del 2008 y se utilizó la información para aplicar este mismo índice a los mismos sitios que se utilizaron para el estudio de peces.

Estudios sobre la calidad del agua del Reventazón, anteriores a la instalación de la Planta de Angostura, valoraron la calidad del agua para diferentes usos. Los resultados, revelaban una alta carga de contaminación orgánica, por lo que solo recomienda su uso en navegación y paisajismo (Mora, 1997)

Desde el punto de vista físico químico, la composición del agua del río Reventazón es relativamente constante durante el año. Las concentraciones de minerales disueltos son normales, lo cual indica que al nivel del sitio de muestreo (sitio presa Reventazón) y de la Estación Hamburgo, las aguas no muestran condiciones de contaminación. Si se aplica el índice de calidad (ICA), la calidad de aguas es buena y en algunos meses del año llega a Excelente. (Cuadro 7.5.1. 1)

Cuadro 7.5.1.1**Indice de calidad ICA modificado para los sitios de muestreo Hamburgo y sitio Presa P.H. Reventazón (La Florida)**

	Hamburgo		sitio presa	
	ICA	Calidad	ICA	Calidad
ene-06	87.07	buena	85.80	buena
feb-06	63.93	desechada	63.74	desechada
mar-06	88.13	buena	87.08	buena
abr-06	85.62	buena	84.26	buena
may-06	87.15	buena	88.97	buena
jun-06	85.66	buena	84.86	buena
jul-06	85.24	buena	89.40	buena
ago-06	85.37	buena	86.19	buena
sep-06	81.66	buena	82.08	buena
oct-06	87.60	buena	87.56	buena
nov-06	86.02	buena	85.72	buena
ene-07	87.37	buena	89.99	buena
feb-07	90.66	excelente	87.64	buena
abr-07	83.47	buena	83.55	buena
may-07	84.71	buena	88.84	buena
jun-07	88.46	buena	74.46	buena
jul-07	294.05	desechada	90.07	excelente
ago-07	88.93	buena	91.4	excelente
set-07	88.86	buena	89.61	buena

Variación química del agua del río reventazón en el sitio Florida

La variación química de los iones mayoritarios de las muestra tomadas del río Reventazón en el sitio Florida desde diciembre del año 1999 hasta diciembre del año 2004 y de enero 2006 a mayo 2008, así como el promedio en cada mes se muestran en las figuras 7.5.1.2, 7.5.1.3

Los iones magnesio, sodio, bicarbonato y sílice muestran variaciones mayores que otros compuestos, como por ejemplo nitrato, cloruro, sílice y calcio.

Figura 7.5.1.2.
Variación química de iones mayores en el agua del río Reventazón

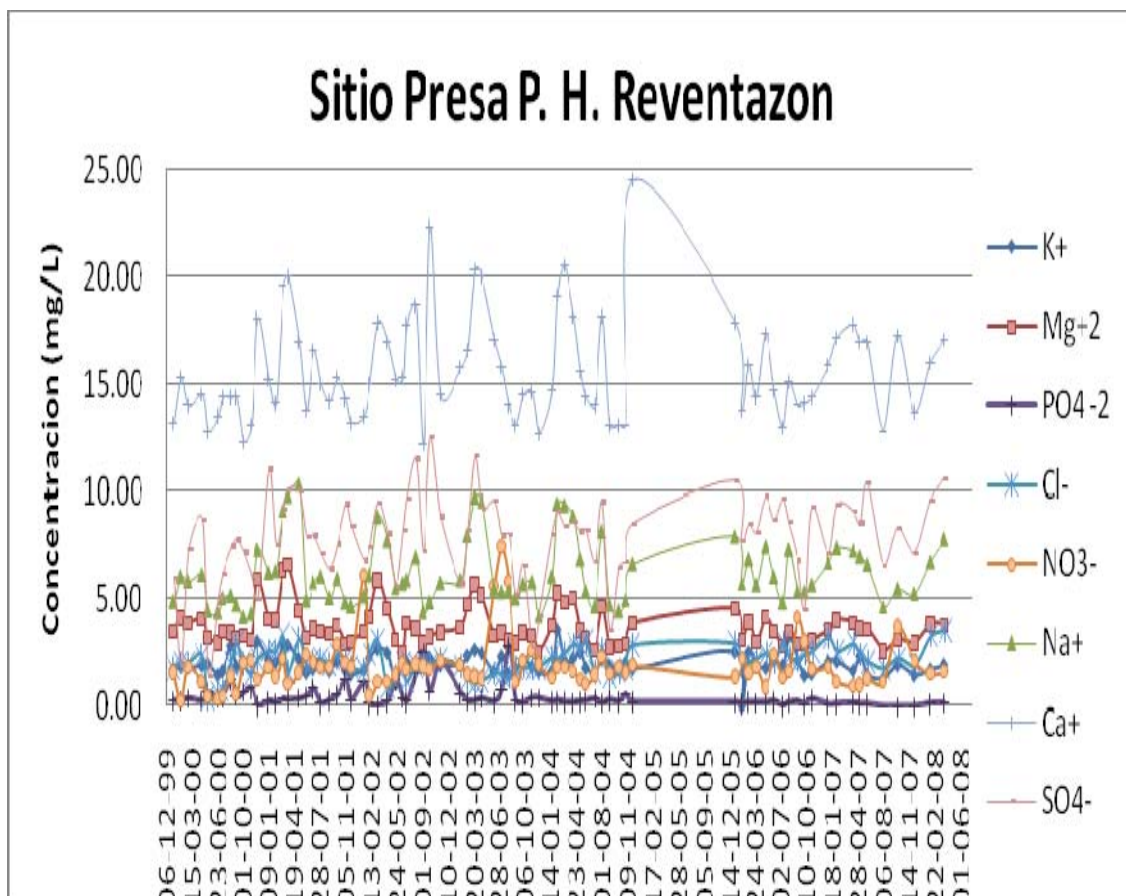
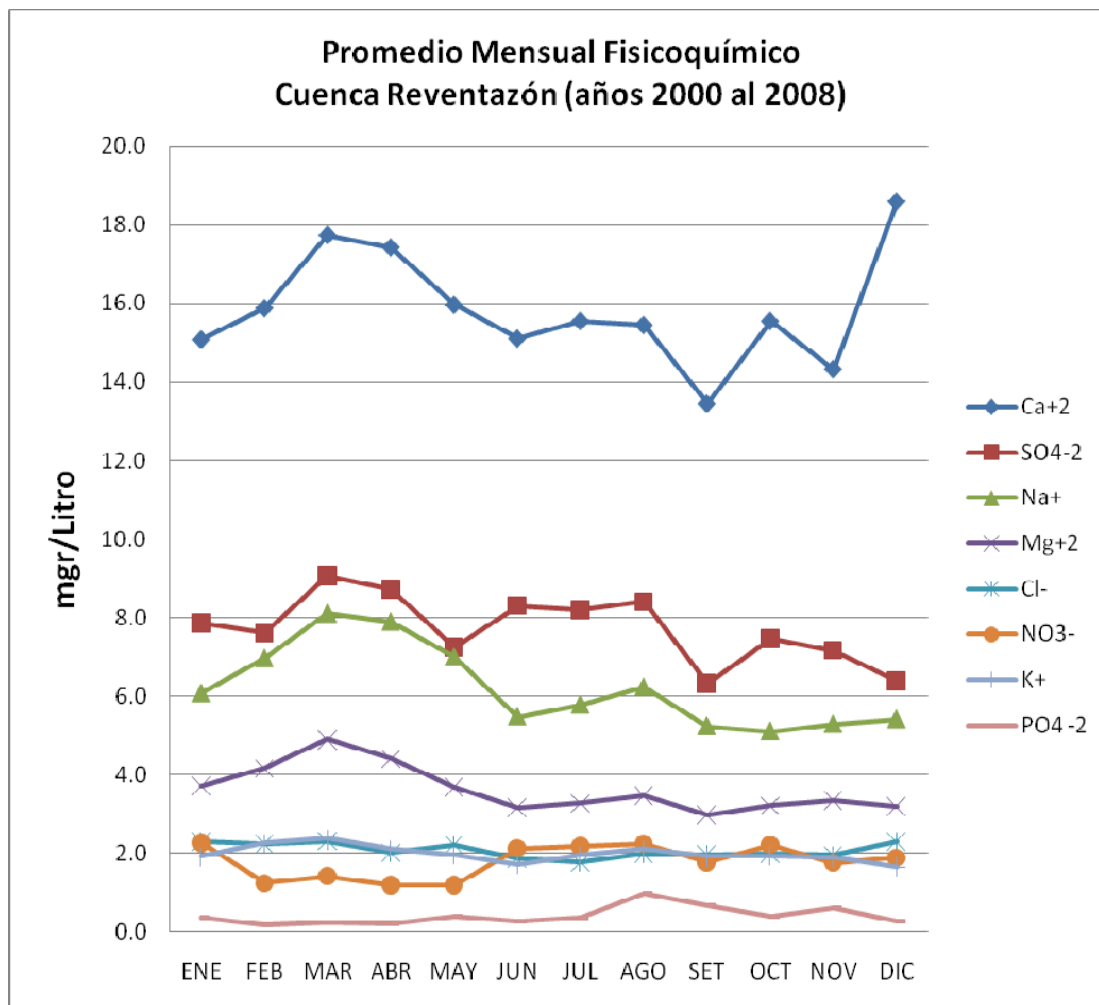


Figura 7.5.1.3

Variación promedio mensual de iones mayores en el agua del río Reventazón



Es notable el hecho de que las variaciones de la concentración de varios compuestos se presentan de manera sincrónica (figura 7.5.1.5), es decir las variaciones coinciden en el tiempo, tanto para los meses de verano como de invierno.

Figura 7.5.1.4. Variación de sílice, bicarbonato y dureza total en el SP del P.H. Reventazón (2000 al 2008)

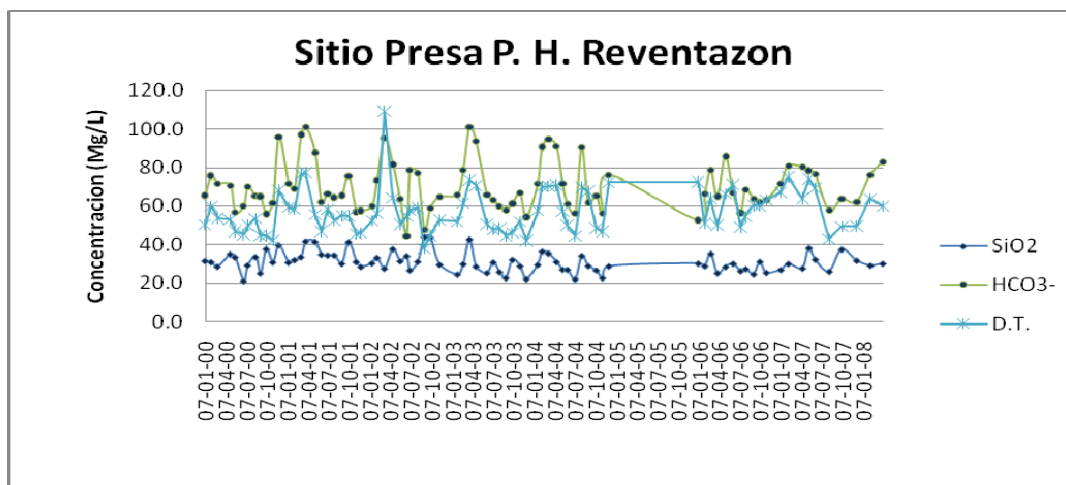


Figura 7.5.1.5. Variación promedio mensual de silicatos, bicarbonato y dureza total en el SP del P.H. Reventazón

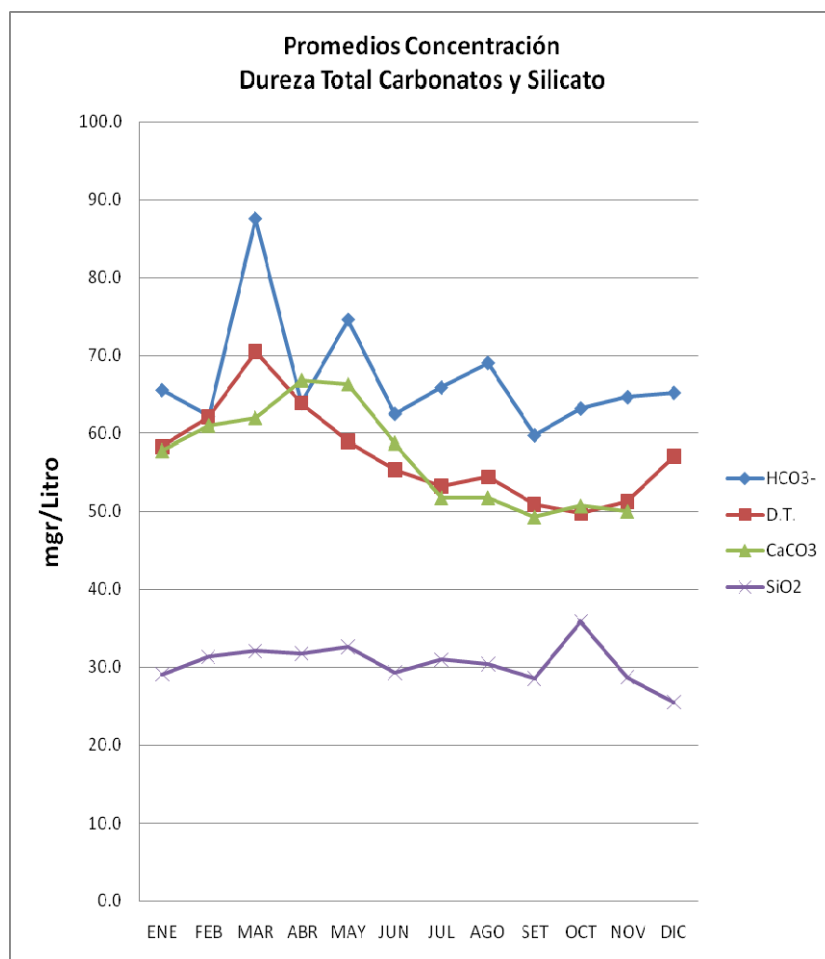
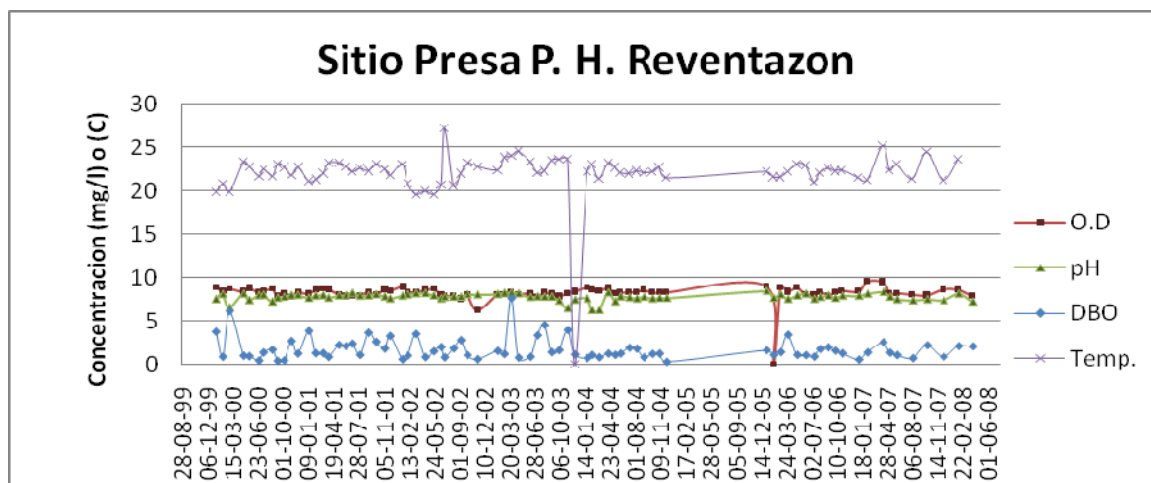


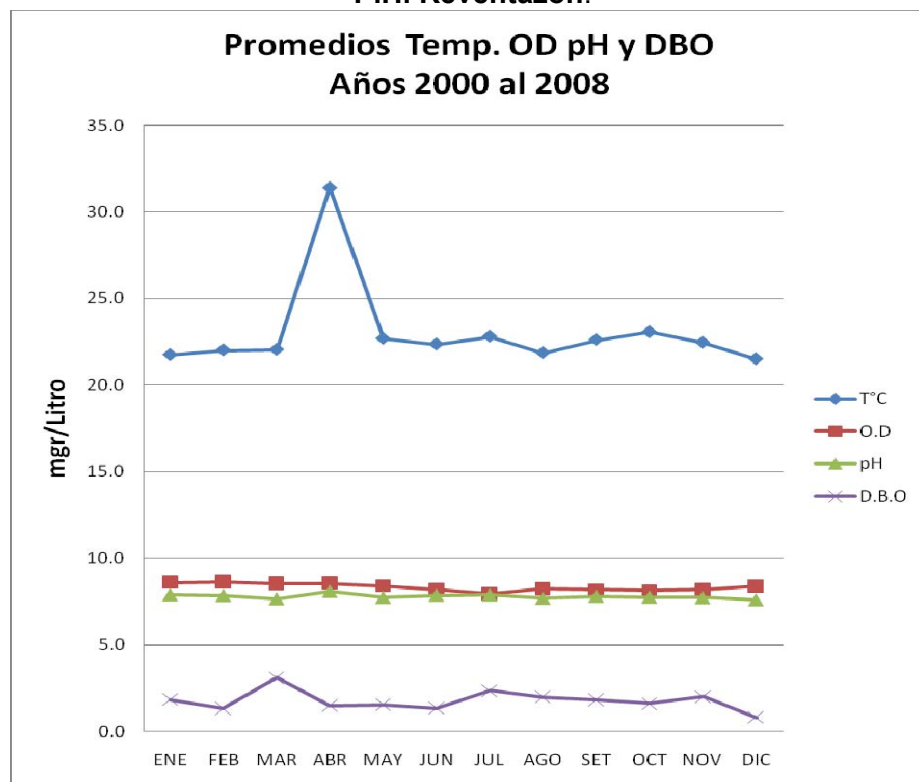
Figura 7.5.1.6. Variación de OD, DBO, pH y Temperatura para el SP del P.H. Reventazón.



La concentración del oxígeno disuelto se presentó relativamente constante alrededor de un valor de 8 mg/l, inducido por el proceso de turbulencia que ocasiona la superficie rugosa del lecho del río (figura 7.5.1.6).

Los promedios mensuales para el Sitio de Presa (figura 7.5.1.7)

Figura 7.5.1.7.
Variación del promedio mensual de OD, DBO, pH y Temperatura para el SP del P.H. Reventazón.



El análisis de los sedimentos recolectados en diferentes puntos del río Reventazón y afluentes aguas arriba del embalse de Cachí y en el propio embalse, muestran elevados niveles de varios metales, lo que sugiere que los efluentes de las industrias de la zona están afectando la calidad del sistema, pero no se refleja en los análisis de calidad del agua

Como ya fue mencionado, los metales de los sedimentos son adsorbidos a partículas por lo que tienen un impacto solo a nivel local. En el momento que estos sedimentos son liberados del embalse existente (o de un futuro embalse), las suspensiones contaminadas con metales serán transportadas aguas abajo. Los metales pueden ser tomados por los organismos acuáticos y los cuerpos se cargan alcanzando niveles tóxicos. En especial el cobre, el zinc y el estaño aparecen con niveles elevadamente críticos en algunas de las muestras de sedimentos y pueden causar problemas cuando estos sedimentos quedan suspendidos en el agua.

Otro aspecto importante en el estudio de calidad del agua es el tema relacionado a los agroquímicos., dado que el uso de la tierra en la cuenca del Reventazón indica que estas sustancias pueden ser un problema, hace falta recolectar información sobre un análisis de las concentraciones de agroquímicos, a fin de separar las afectaciones a la calidad como consecuencia de estas actividades. Algunos plaguicidas utilizados frecuentemente en Costa Rica son susceptibles a ser acumulados en el tejido de los organismos vivos y alcanzan niveles tóxicos. La mortalidad frecuente de peces en los ríos de Costa Rica es evidencia de que estos niveles peligrosos han sido alcanzados.

El uso de indicadores biológicos para la calidad del agua se ha intensificado en los últimos años, actualmente se cuenta con un índice adaptado para Costa Rica (Springer 2007). El índice BMWP/CR otorga valores del 1 al 10 a las diferentes familias de insectos acuáticos dependiendo de su tolerancia a la contaminación orgánica, otorgando los valores más altos a las familias más sensibles y los valores bajos a las más tolerantes. Al sumar los valores de todas las familias presentes se obtiene el puntaje total índice de BMWP/CR (cuadro 7.5.1.2).

El puntaje promedio por taxa conocido como ASPT (Average Score Per Taxon), se calcula dividiendo el valor del BMWP/CR entre el número de taxa presente en cada sitio de muestreo. Este índice presenta valores entre 0 y 10. Un valor bajo de ASPT asociado a un puntaje bajo de BMWP/CR indicará condiciones graves de contaminación (cuadro 7.5.1.3).

Ambos valores son de gran utilidad al construir mapas de calidad de agua. En estos la información se codifica por colores que van del color azul para las aguas con valores altos, verde y amarillo para valores intermedios, mientras que el color naranja y rojo representan valores bajos (cuadro 7.5.2.). al igual que otros métodos, es importante tomar en cuenta las limitaciones de un método que ha sido adaptado, por lo que la interpretación de los resultados debe ser cauta. Además, siempre es importante destacar el contexto de que es una medición puntual en un sistema muy dinámico y de gran magnitud, como lo es el río Reventazón.

Cuadro 7.5.1.2.
Interpretación de los puntajes del índice BMWP-Costa Rica. 2007.

NIVEL DE CALIDAD	BMWP-C.R.	Color representativo
Aguas de calidad excelente	>120	Azul oscuro
Aguas de calidad buena, no contaminadas o no alteradas de manera sensible	101-120	Azul claro
Aguas de calidad regular, eutrofia, contaminación moderada	61-100	Verde
Aguas de calidad mala, contaminadas	36-60	Amarillo
Aguas de calidad mala, muy contaminadas	16-35	Naranja
Aguas de calidad muy mala extremadamente contaminadas	<15	Rojo

Cuadro 7.5.1.3.
Interpretación de los valores ASPT. Índice BMWP-Costa Rica. 2007.

Composición de la Comunidad	Valor ASPT	Predominancia de grupos tolerancia a la contaminación
muy homogénea	10	no tolerantes
homogénea	7.6--9.9	no tolerantes
ligeramente homogénea	6--7.5	ambos>no tolerantes
heterogénea	5--5.9	ambos
homogénea	3--4.9	tolerantes
muy homogénea	0--2.9	tolerantes

Según los resultados de Segura (2006) con indicadores biológicos de contaminación, los sitios de muestreo ubicados en la restitución de la casa de máquinas de la planta de Cachí y en la planta de Angostura, muestran un valor **BMWP'CR** de 96 y 79 respectivamente, que corresponde al color verde, lo que se interpreta como aguas de calidad regular con contaminación moderada. Para el tramo donde se ubicará el embalse y el sitio de presa del PH Reventazón, el índice presentó valores de 51 y 60 respectivamente, lo que revela una condición amarilla, lo que se interpreta como aguas de baja calidad y en categoría de contaminadas. Las muestras de los afluentes al embalse del PH Reventazón (río Bonilla, Q. Lajas y Q. Rubio) presentan una condición verde, así mismo, la quebrada Guayacán que se encuentra aguas abajo de donde se ubicaría la presa, en el tramo crítico (antes de la restitución de la propuesta planta). Los tramos que presentan la condición amarilla son las zonas pobladas de la cuenca media baja, donde además hay actividad agrícola y ganadera en las orillas del río. Para el estudio realizado en el 2008, se incluyeron todos los afluentes que desaguan en el sector del embalse y los que se ubican aguas abajo del sitio de presa proyectado. En el cuadro 7.5.4 se presentan los resultados de los grupos de invertebrados y el valor **BMWP'CR** y **ASPT** correspondiente.

Cuadro 7.5.1.4.**Índice BMWP'CR para los principales afluentes y puntos de muestreo del río Reventazón enero y febrero 2008**

SITIO	NÚMERO FAMILIAS	PUNTAJE BMWP	ASPT	Color	Nivel
Margen izquierda					
Río Bonilla	22	92	5.09	Verde	Regular Contaminación moderada
Río Bonilla confluencia con Reventazón	15	64	4.26	Verde	Regular
Laguna Bonilla	16	50	3.12	Amarilla	mala contaminada
Quebrada entre río Bonilla y La Hermosa	22	112	5.09	Celeste	Muy Buena No alterada
Río Pascua	19	88	4.63	Verde	Regular
La Herediana Arriba)	26	117	4.50	celeste	Muy buena
La Herediana- La Florida	20	99	4.95	Verde	Regular
La Herediana Puente-Pista	25	103	4.12	celeste	Muy Buena
Quebrada Rubio	22	100	4.54	Verde	Regular
Río Peje	22	103	4.68	celeste	Muy buena
Margen Derecha					
Q. Lajas	24	107	4.56	celeste	Muy buena
Calvario (Bajo 52)	14	74	5.28	Verde	Regular
Bajo 52	9	34	3.77	naranja	Mala, muy contaminada
Q. Patincho (Bajo 52)	17	62	3.64	Verde	Regular
Reventazón Bajo 52- andarivel	21	87	4.14	Verde	Regular
Quebrada Carazo	21	75	3.57	Verde	Regular

QuebradaLajas	24	107	4.56	celeste	Muy buena
Quebrada Rivulus	29	149	5.13	azul	excelente
Quebrada Sibon	30	111	3.77	Celeste	Muy Buena
Quebrada Tres Amigos	21	104	4.95	Celeste	Muy Buena
Río Reventazón (S. préstamo AB)	6	29	4.83	naranja	Mala, muy contaminada
Quebrada Guayacán Arriba	25	115	4.60	celeste	Muy Buena
Quebrada Guayacán (medio)	17	100	5.88	Verde	Regular
Confluencia Quebrada Guayacán-Río Reventazón	12	98	8.16	Verde	Regular
El Cocal (El Carmen)	6	24	4.0	Naranja	Mala, muy contaminada
Río Siquirres-El Coco	13	72	5.53	Verde	Regular

Los sitios que presentaron las mejores condiciones son los afluentes que se muestrearon en la parte alta, observándose un leve deterioro al acercarse a los centros de población. Los tramos del cauce principal a la altura de la Florida (Sitio de Presa) presentan una condición naranja, así mismo el sitio de muestreo cerca de la población del Carmen. Esta condición es catalogada como aguas contaminadas de mala calidad. Es importante anotar que el muestreo de 2008 coincide con la época menos lluviosa, temporada en la que los parámetros fisicoquímicos muestran también alteración. Otro aspecto importante es lo que fluctúa la calidad del agua según el estado de los afluentes, así después de revelar una condición bastante crítica en la Florida, las características se recuperan después de recibir las aguas de quebradas de buena calidad como la Rivulus, Sibon, Tres Amigos y Guayacán. De nuevo la calidad se deteriora cuando pasa por el Carmen (sitio el Cocal).

Los valores para el ASPT revelan que la mayoría de los sitios presentan comunidades heterogéneas con comunidades tolerantes e intolerantes a la contaminación, unos pocos sitios presentan comunidades homogéneas poco tolerantes a la contaminación, donde se destaca la quebrada Guayacán en su confluencia con el Reventazón y otros más presentan comunidades homogéneas tolerantes a la contaminación.

Caudales

Caudales Medios.

Para la obtención de los caudales promedio mensuales en el sitio de presa se trasladaron los caudales registrados en la estación Pascua; período de junio de 1963 hasta el 30 de abril del 2005, para completar el año hidrológico 2004-05. Dichos traslados se hicieron utilizando una relación de área/lluvia. En el cuadro 7.5.1.5 se presentan los caudales promedio mensuales para el período mencionado, y en las figura 7.5.1.8 y 7.5.1.9. se muestra: el régimen de caudales promedio mensuales y la variación del caudal promedio anual respectivamente

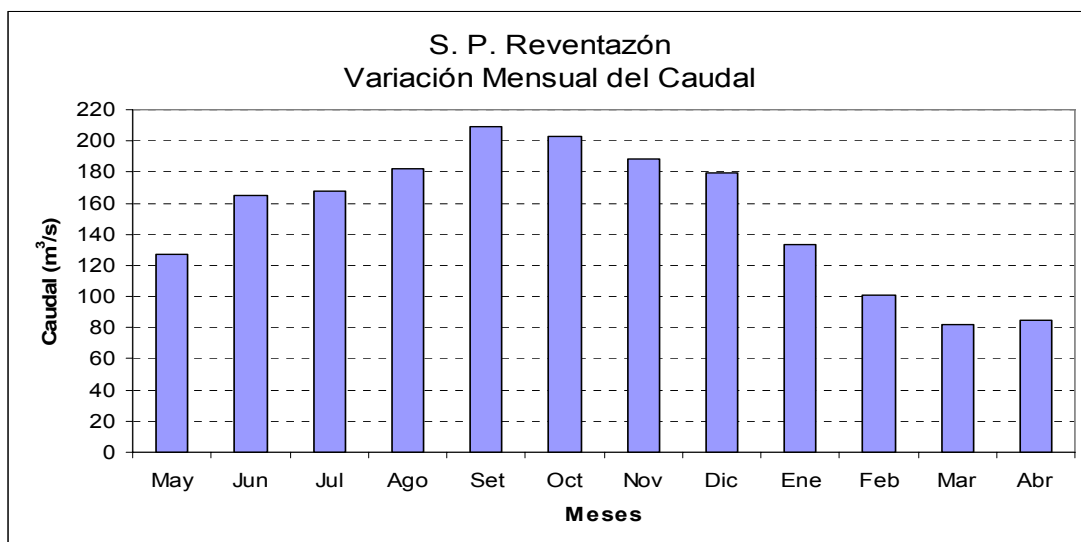
Cuadro 7.5.1.5
Caudales promedio mensuales en el sitio de presa Reventazón (m³/s)

Año	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Prom
63-64		149.6	157.7	163.3	214.3	198.1	216.2	163.8	123.4	56.4	45.5	44.9	139.4
64-65	80.0	143.0	204.7	176.1	189.2	191.1	153.4	86.2	175.1	97.9	103.7	59.5	138.3
65-66	129.7	169.9	162.8	175.4	163.5	193.3	198.9	143.9	167.3	202.1	109.1	98.5	159.5
66-67	163.9	198.2	163.9	184.1	170.0	192.8	194.2	289.0	138.4	100.4	89.9	131.9	168.1
67-68	130.3	244.5	197.2	207.5	324.7	255.1	163.8	128.5	98.4	141.1	131.3	127.7	179.2
68-69	138.4	175.6	197.6	168.2	204.5	171.6	173.2	155.1	84.9	73.4	61.1	72.5	139.7
69-70	78.2	125.1	107.2	184.9	196.2	193.5	296.9	234.2	193.9	218.3	92.6	250.8	181.0
70-71	188.4	204.0	205.0	163.7	200.3	198.8	252.2	440.5	170.8	95.8	105.0	121.0	195.5
71-72	127.4	138.6	175.2	174.6	171.7	209.6	131.6	80.3	100.3	80.5	65.9	96.6	129.4
72-73	118.0	102.2	103.0	145.3	168.2	175.6	150.8	142.6	109.9	77.8	61.4	39.3	116.2
73-74	77.7	191.1	137.8	171.4	136.6	163.0	150.6	193.1	124.3	84.2	76.1	74.1	131.7
74-75	110.6	182.4	166.6	171.3	127.5	162.1	133.9	258.6	81.0	71.4	55.4	69.7	132.5
75-76	74.0	137.2	169.5	205.8	243.1	190.1	220.2	301.1	165.4	88.4	64.2	58.3	159.8
76-77	113.1	192.3	231.5	206.5	210.9	158.5	227.2	112.7	86.0	69.4	63.1	65.3	144.7
77-78	82.3	120.4	152.1	213.7	151.5	165.8	140.6	80.4	50.9	116.4	60.8	65.4	116.7
78-79	90.6	116.7	127.9	129.3	178.0	171.6	153.4	133.3	67.6	44.4	38.6	101.5	112.7
79-80	149.7	154.5	131.9	172.0	180.9	192.6	155.7	102.1	101.3	124.2	51.6	46.3	130.2
80-81	80.0	163.9	153.6	149.4	218.3	175.9	166.3	303.2	174.6	105.8	124.6	131.8	162.3
81-82	216.0	230.2	170.6	189.7	267.3	205.4	312.7	194.9	91.3	55.1	50.1	41.4	168.7
82-83	89.3	148.7	222.4	141.5	192.1	240.9	171.7	94.6	89.7	51.1	78.5	49.8	130.8
83-84	108.5	130.6	112.6	141.1	188.5	248.1	213.7	104.1	145.6	77.1	93.1	40.8	133.7
84-85	86.9	140.5	175.7	178.4	237.6	177.9	156.3	223.8	120.1	98.6	78.4	62.8	144.8
85-86	77.1	186.1	118.5	163.4	179.9	175.2	148.8	103.3	133.1	72.9	116.1	94.9	130.8
86-87	80.2	120.5	160.4	150.2	168.4	210.6	122.4	68.4	70.6	76.0	48.8	76.0	112.7
87-88	89.5	142.7	159.1	209.7	173.2	257.4	126.0	156.8	247.1	161.9	126.3	86.1	161.3
88-89	94.5	157.3	164.8	295.2	310.0	333.3	153.8	150.3	132.3	89.6	94.5	88.4	172.0
89-90	102.5	147.5	166.5	209.9	249.6	206.7	206.1	160.3	145.0	69.7	112.6	57.5	152.8
90-91	157.3	210.0	206.5	201.0	214.0	274.6	198.4	272.5	66.4	77.4	50.7	67.4	166.4
91-92	143.9	162.5	174.1	206.7	152.8	178.6	191.5	161.9	88.3	75.3	92.7	73.8	141.8
92-93	131.7	134.5	153.4	197.1	251.7	240.0	119.9	124.5	116.0	124.7	90.4	73.1	146.4
93-94	160.5	165.0	166.6	172.2	242.5	207.5	127.8	168.1	76.9	61.5	53.8	55.4	138.1
94-95								190.6					
95-96	109.4	124.1	135.8	174.2	215.7	168.9	129.3	79.4	127.5	171.9	77.2	67.1	131.7
96-97	141.3	146.6	170.0	135.3	191.4	148.4	149.0	154.3	96.2	125.1	109.6	83.8	137.6
97-98	144.1	209.5	184.8	203.9	200.7	235.7	277.0	183.5	95.0	52.5	58.3	71.3	159.7
98-99	81.3	168.0	247.2	191.5	224.3	187.9	178.3	241.5	115.4	128.0	101.2	108.7	164.4
99-00	231.3	196.7	163.0	210.3	302.5	288.1	240.5	320.4	356.5	184.8	115.2	96.3	225.5
00-01	164.4	212.6	191.0	164.5	229.4	203.7	165.3	121.9	135.8	130.1	76.4	122.7	159.8
01-02	111.0	186.4	194.2	193.9	184.1	144.9	232.4	272.8	179.7	107.9	78.3	81.2	163.9
02-03	222.0	154.6	192.7	274.8	327.8	196.1	321.2	157.9	119.7	93.6	50.5	124.7	186.3
03-04	191.4	263.1	141.6	150.8	222.9	224.6	181.7	301.5	119.7	60.4	115.9	78.4	171.0
04-05	208.8	118.0	142.6	149.6	209.4	192.7	306.3	166.8	379.5	147.3	86.0	120.8	185.6
Prom	126.9	165.0	167.3	182.1	209.4	202.6	188.0	179.1	133.2	101.0	81.8	84.8	151.9

Como se puede observar durante el año 1994-95, la estación salió de operación por lo que no aparecen valores registrados.

Figura 7.5.1.8 .

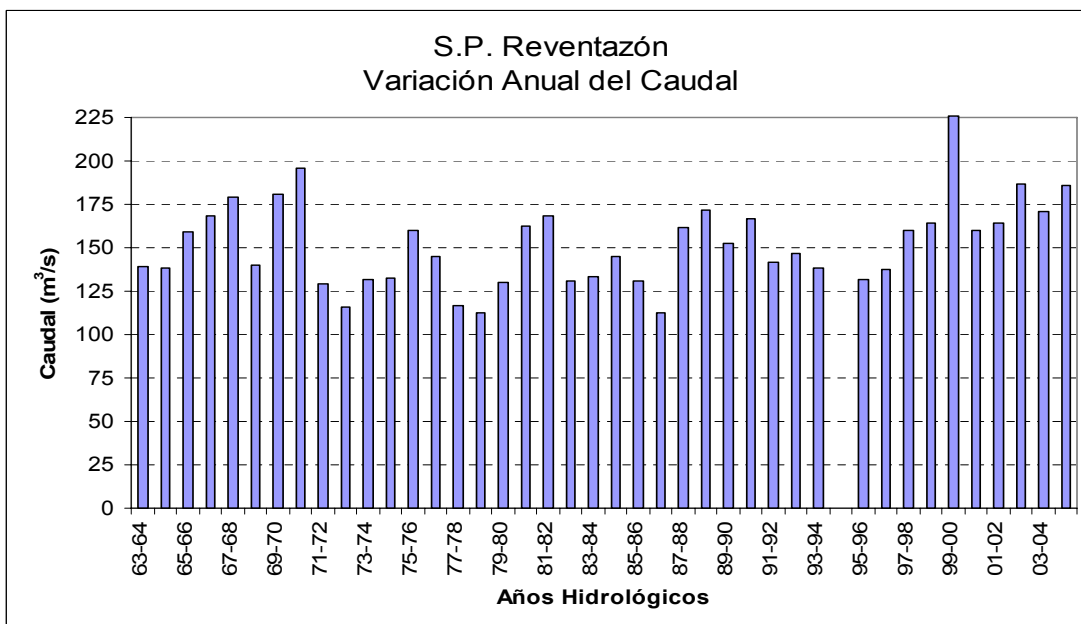
Variación mensual del caudal en el S.P. Reventazón.



A pesar de que la estación 9-12 se ubica claramente en la vertiente Caribe del país, el comportamiento del caudal mensual es más semejante al de la zona Pacífica; es decir, los meses máximos por septiembre y octubre, mínimos por marzo y abril, y un proceso de disminución o transición de noviembre, diciembre y enero.

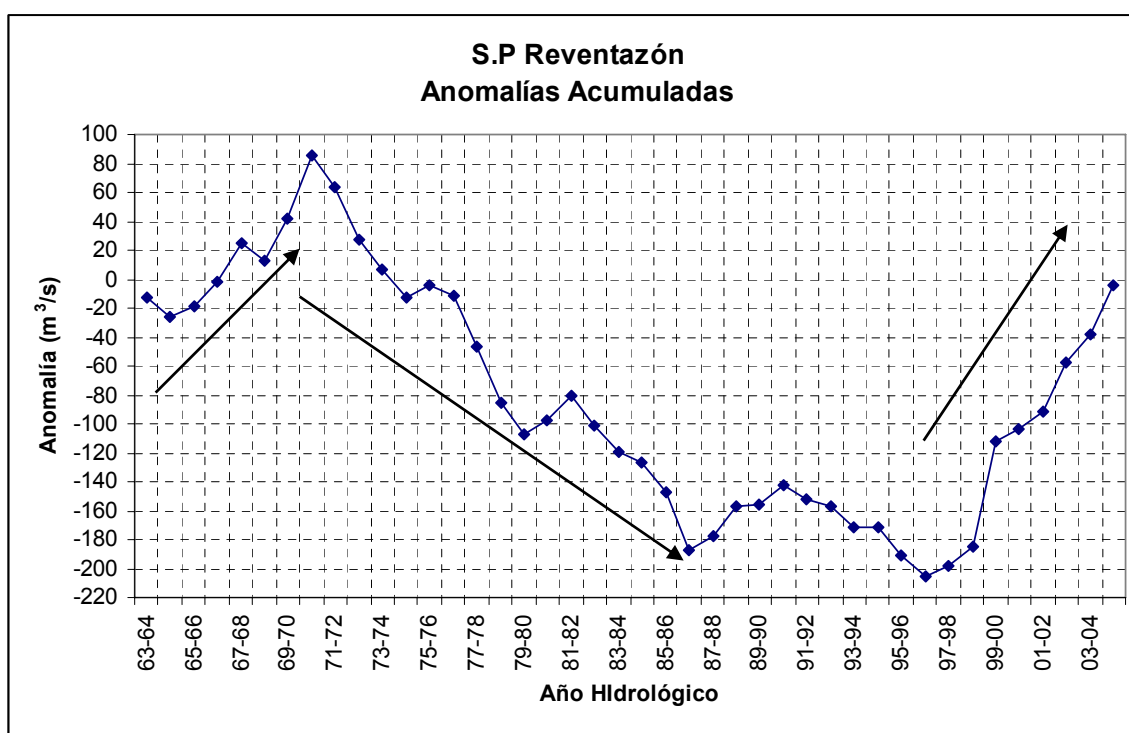
Figura 7.5.1.9

Variación anual del caudal en el S.P. Reventazón.



El caudal promedio para este período de registro es de $151.9 \text{ m}^3/\text{s}$, en el pasado informe de pre factibilidad, cuyo registro fue hasta abril del 1999 (año hidrológico 1998-99) el valor fue de $138.7 \text{ m}^3/\text{s}$; es decir, un aumento de $13.2 \text{ m}^3/\text{s}$ que representa un 9.52% más tomando como base la cifra original. Esto se explica porque en los últimos años se han venido registrando aumentos en los caudales, lo cual parece que se enmarca dentro de la ciclicidad que la naturaleza presenta en el tiempo. Esta última apreciación se puede observar con el estudio de las anomalías (caudal de cada año menos el promedio de todo el registro) acumuladas del caudal durante todo su registro, donde es posible determinar algunas tendencias ascendentes o descendentes de la producción de agua en las estaciones fluviográficas (figura 7.5.1.10).

Figura 7.5.1.10.
Tendencias del caudal promedio anual.



Análisis de Frecuencia de Caudales Extremos.

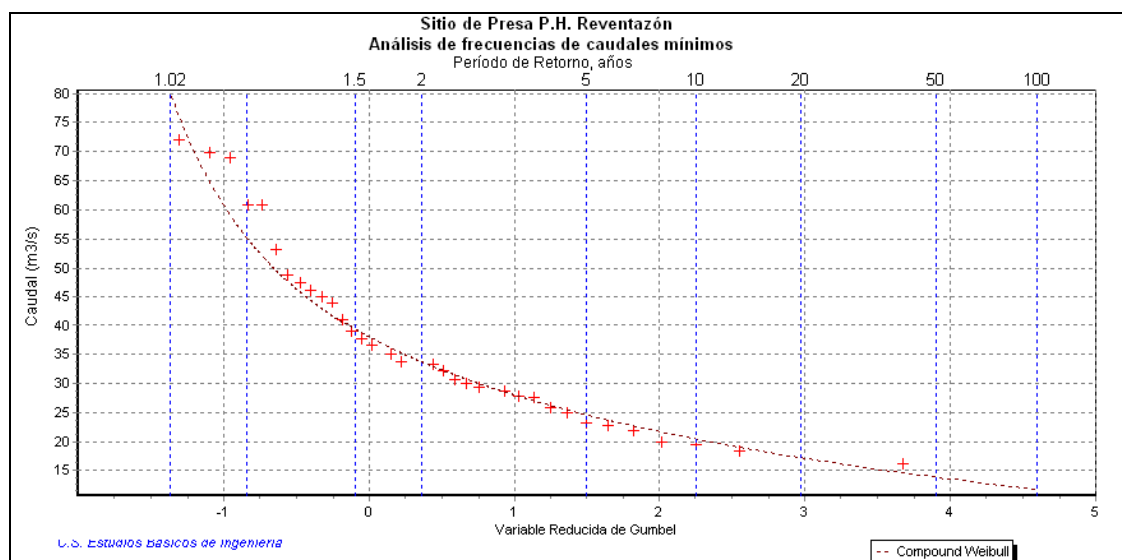
Caudales Mínimos Promedio Diarios

Los caudales mínimos promedio diarios anuales de la estación 9-12 Pascua se trasladaron mediante una relación de áreas al sitio de presa; luego, se les hizo un análisis de frecuencia. En los siguientes cuadro y figura se muestran los resultados de los análisis de frecuencia utilizando la distribución Weibull Compuesta, que fue la que mejor ajustó.

Cuadro 7.5.1.6
Análisis de frecuencia de caudales mínimos

Período de Retorno en años	Probabilidad mayor o igual en %	Caudal m ³ /s
1.01	99.0	93.57
1.05	95.0	65.64
1.25	80.0	45.93
2	50.0	33.65
5	20.0	24.58
10	10.0	20.44
20	5.00	17.24
50	2.00	13.88
100	1.00	11.83
200	0.50	10.08
500	0.20	8.17

Figura 7.5.1.11.
Análisis de frecuencias de caudales mínimos.



Caudales Máximos Instantáneos

A continuación se presentan los resultados de los estudios para el análisis de caudales máximos para el sitio de presa Reventazón. Estos se basan en lo obtenido por el proyecto de cooperación técnica “Estimación de valores extremos máximos de precipitación y de caudal para propósitos de diseño”, realizado entre el personal de Hidrología del ICE y consultores de la compañía sueca AB Hydroconsult, de 1997 al 2000.

En el estudio en mención se definieron dos curvas regionales de frecuencias de caudales máximos instantáneos, una para la vertiente del Caribe y otra para la del Pacífico. Para el caso del Caribe, que es el que corresponde para este proyecto, se utilizaron 3414 valores registrados en 39 estaciones de dicha región, y la distribución que mejor se ajustó a los datos fue la GEV indirecta.

Dentro de la metodología, la curva regional se hizo adimensional mediante las medianas de las series de caudales máximos instantáneos utilizadas en el estudio. Para el caso del P.H. Reventazón se estimó la mediana en 1059.61 m³/s, de forma que los resultados del análisis de frecuencias se presentan en el cuadro 7.5.1.7.

Cuadro 7.5.1.7**Análisis de frecuencia de caudales máximos**

Período de Retorno Años	Probabilidad Excedencia %	Caudal m ³ /s	Intervalos de Caudal para Niveles de Confianza de 90%	
			Límite Inferior	Límite Superior
1.01	99.01	497	462	514
1.05	95.24	598	563	611
1.25	80.00	768	735	778
2	50.00	1028	998	1031
5	20.00	1448	1396	1469
10	10.00	1780	1686	1839
20	5.00	2145	1993	2263
50	2.00	2698	2430	2948
100	1.00	3181	2766	3568
200	0.50	3729	3209	4274
300	0.33	4084	3454	4739
400	0.25	4353	3627	5153
500	0.20	4571	3770	5423
600	0.17	4757	3922	5732
700	0.14	4918	4003	5919
800	0.13	5062	4152	6125
900	0.11	5192	4191	6341
1000	0.10	5311	4229	6502
1500	0.07	5790	4549	7175
2000	0.05	6154	4777	7850
2500	0.04	6450	4969	8217
3000	0.03	6700	5126	8522
3500	0.03	6920	5273	9043
4000	0.03	7114	5480	9202
4500	0.02	7290	5461	9423
5000	0.02	7451	5604	9790
5500	0.02	7599	5734	10020
6000	0.02	7705	5771	10117
10000	0.01	8592	6197	11379

Para considerar el caso más extremo, históricamente asociado a la avenida máxima probable (AMP), se estima de mayor confiabilidad utilizar el período de retorno de 10000 años al límite superior del 90% de confianza; es decir en este caso 11379 m³/s.

Caracterización morfológica

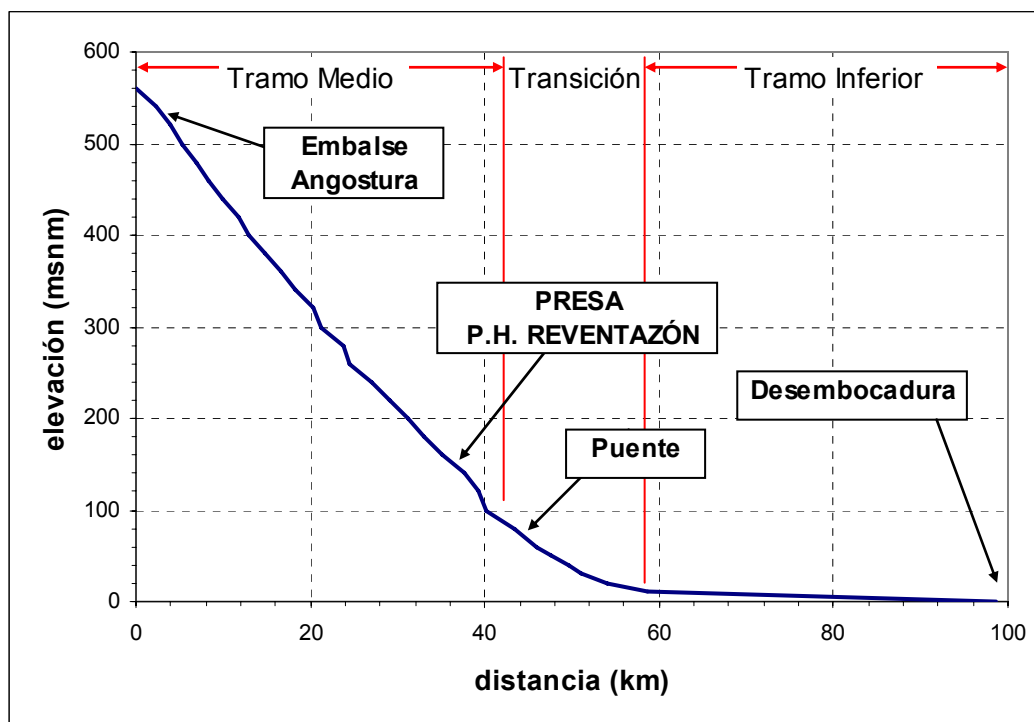
La caracterización de las variables morfológicas del río es importante para interpretar la situación actual y los posibles efectos de cualquier acción que se efectúe sobre el mismo.

La caracterización morfológica se hace en la longitud del río que abarca desde el embalse hasta la desembocadura. El tramo que sería afectado en forma directa estaría comprendido de la cola del embalse hasta la restitución del proyecto. El tramo siguiente sería afectado indirectamente por la operación del proyecto. Se debe aclarar que en este estudio no se evalúan los efectos del proyecto sobre el río ya que esto corresponde a una etapa posterior.

En la figura 7.5.1.12 se muestra el perfil longitudinal del río desde la presa de Angostura obtenido a partir de las hojas cartográficas escala 1:50 000. La presa de Angostura es una condición de frontera importante ya que el sedimento grueso de la parte alta de la cuenca queda retenido aguas arriba de la misma. En el perfil se pueden detectar 3 tramos con características diferentes y que en este caso están representados por la variación en la pendiente del canal. El perfil de la figura se puede dividir en 3 secciones que se consideran unidades morfológicas diferentes:

- La primera corresponde a la parte final del tramo medio del río que es donde se ubicarían las obras del proyecto. Este tramo está influenciado por estructuras geológicas que restringen su movimiento lateral y la dimensión de la sección. Se caracteriza por el transporte y almacenamiento temporal de sedimento grueso proveniente de deslizamientos aguas arriba.
- La segunda sección es el tramo de transición que se caracteriza por la deposición o almacenamiento permanente del sedimento grueso (gravas y bolones) y porque la pendiente disminuye rápidamente cuando el río sale de la zona montañosa y entra en zona aluvial.
- La tercera sección corresponde al tramo aluvial del río donde la pendiente es baja y el material del lecho consiste en arenas y limos. En este tramo el río tiene mayor libertad de acción ya que las márgenes están conformadas por material más fácilmente erosionable.

Figura 7.5.1.12 Perfil longitudinal de río Reventazón desde Angostura a la desembocadura.



La misma división de los tramos se muestra en la figura 7.5.1.13 donde se observa la red hídrica que conforma la parte baja del río Reventazón y que será analizada posteriormente.

En cada uno de estos tramos se hace la caracterización de las variables morfológicas. Normalmente en un cauce se identifican 5 variables morfológicas: caudal, sedimento transportado, sección transversal, forma en planta y perfil longitudinal. De estas solo el caudal y el sedimento transportado se consideran variables independientes. Por lo tanto, ante cualquier cambio o perturbación en las variables independientes, el río reaccionará modificando sus variables dependientes: sección transversal, forma en planta y perfil.

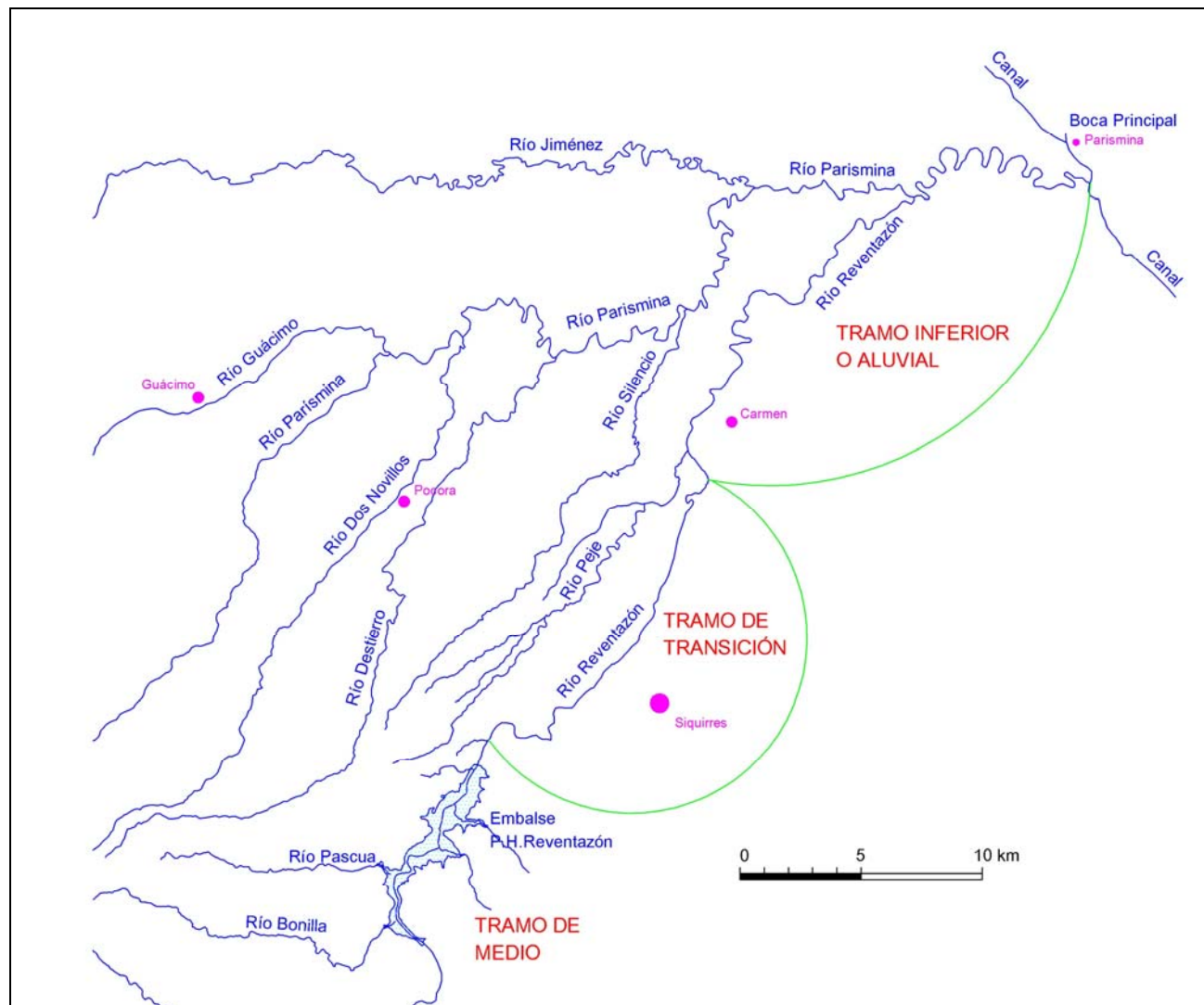


Figura 7.5.1.13 Vista en planta del río Reventazón y afluentes en el área de estudio.

Las características morfológicas a analizar en esta revisión son:

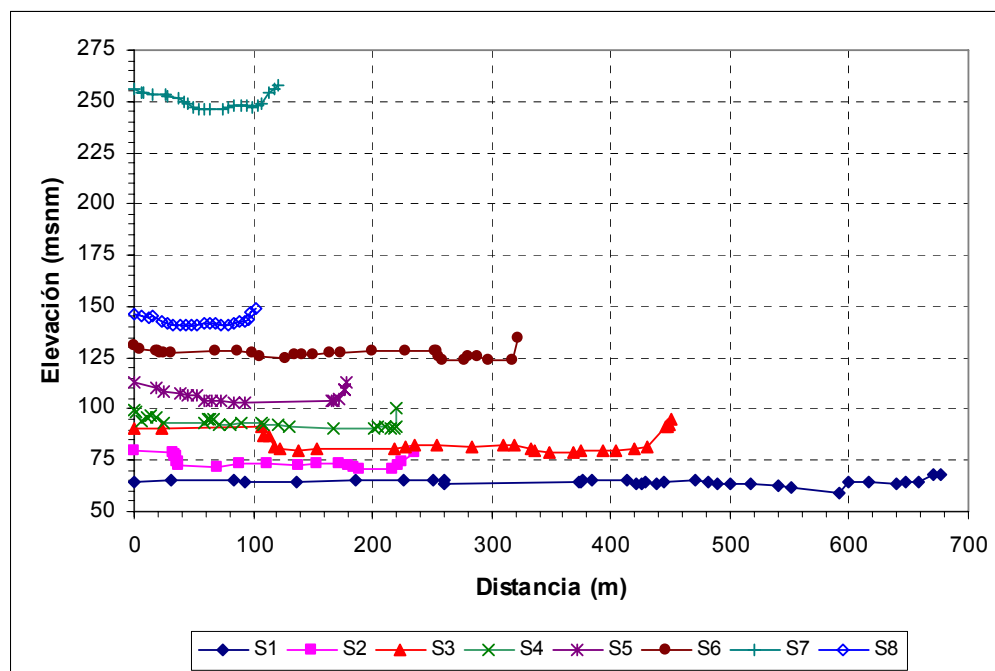
- **Caudal Formativo:** El caudal es muy variable en el tiempo y por ello se usa el concepto de caudal formativo o caudal dominante que es un caudal conceptual que explica la forma y tamaño de la sección transversal del río. Algunos investigadores recomiendan usar el caudal que llena el cauce como caudal formativo que coincide muchas veces con el caudal con período de retorno entre 1.5 y 5 años. Otros recomiendan usar el caudal efectivo que es el caudal que transporta la mayor cantidad de sedimento durante el año. En este estudio se utiliza el criterio de 2 años de retorno en los tramos medio y de transición mientras que el tramo aluvial se usa el caudal a cauce lleno.
- **Sedimento Transportado:** El sedimento puede ser transportado por lecho del cauce (transporte de fondo) o en suspensión, dependiendo de la capacidad de arrastre o la energía del flujo. La capacidad de transporte se estima usando ecuaciones empíricas o a través de mediciones directas. Existe otra forma de transporte que se conoce como carga de lavado y que consiste en el sedimento fino (limos y arcillas) que no precipitan fácilmente ni siguen ninguna relación con el caudal. Desde el punto de vista morfológico el sedimento en suspensión solo es importante en la parte baja del río y en la formación de planicies de inundación pero tiene poca relevancia en los tramos de sedimento grueso.
- **Sección Transversal:** La geometría de la sección está representada por la profundidad hidráulica y el ancho. Estos dos parámetros se obtienen del análisis de las secciones transversales levantadas en cada tramo. El ancho es un parámetro muy importante ya que tiene a seguir una relación potencial con el caudal formativo. La profundidad hidráulica es la razón del área entre el ancho y representa la profundidad equivalente a una sección rectangular o el radio hidráulico en secciones muy amplias.
- **Forma en Planta:** La forma en planta se refiere al alineamiento horizontal del río. Este puede ser de meandros o trenzado y/o ramificado cuando tiene varios canales. Fallas geológicas o afloramientos rocosos influyen la forma en planta. Para analizar esta variable se usaron las fotos aéreas disponibles y las hojas cartográficas del IGN.
- **Perfil Longitudinal:** El perfil longitudinal indica el cambio en la pendiente del cauce que está asociado a la energía del flujo. Afloramientos rocosos representan controles verticales que limitan la variación del perfil. El perfil longitudinal de cada tramo analizado se obtuvo a partir de los levantamientos topográficos disponibles.

Tramo Medio y de Transición

Este tramo se caracteriza por la presencia de material grueso en el lecho. Este material tiene su origen en deslizamientos masivos en las márgenes del cañón o en las subcuencas de sus principales afluentes.

Para el análisis se usaron fotografías aéreas de 1998, las hojas cartográficas 1:50000 del IGN, el análisis de frecuencia de avenidas en la estación Pascua y las secciones topográficas levantadas en el cauce. En la figura 7.5.1.14 se muestran las secciones transversales al cauce, disponibles dentro del tramo en estudio. La numeración de las secciones se hizo desde aguas abajo hacia aguas arriba. La sección 2 corresponde al puente del ferrocarril y la sección 3 al puente de la carretera.

Figura 7.5.1.14
Secciones transversales en los tramos medio y transición.



Caudal Formativo

La definición más usada del caudal formativo es la de cauce lleno. Sin embargo, esa definición es fácil de aplicar dentro del tramo aluvial pero no se puede usar en el tramo montañoso donde el río corre dentro de un cañón. Bray (1982) encontró que el caudal de cauce lleno tiene un período de retorno de 1.5 a 2 años y para efectos de esta caracterización supondremos que el caudal formativo tiene un período de retorno de 2 años que corresponde a $1024 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal formativo en este tipo de tramos debe tener capacidad de transportar el material presente en el lecho.

Con las secciones transversales disponibles se corrió el modelo HEC-RAS para calcular los parámetros hidráulicos del tramo en estudio. Este modelo resuelve el nivel del agua utilizando la ecuación de energía del flujo. Los resultados principales se presentan en el Cuadro 7.5.1.8 para el caudal de 2 dos años de período de retorno. El primer caudal será usado como base para la caracterización morfológica y el segundo se usó en un estudio anterior.

Cuadro 7.5.1.8
Parámetros hidráulicos en las secciones.

Sección	Nivel Min. (msnm)	Nivel Agua (msnm)	Velocidad (m/s)	Area (m²)	Ancho (m)
8	246.46	250.27	5.34	193.14	68.50
7	141.14	145.24	3.79	272.29	87.63
6	124.21	127.22	5.05	242.59	139.39
5	103.34	105.81	4.14	247.77	117.58
4	90.14	93.24	3.64	293.73	156.15
3	78.81	81.89	2.82	362.50	254.26
2	70.71	74.17	3.05	336.06	186.22
1	58.62	64.26	3.78	321.63	295.46

Del análisis de los resultados se encontró que el ancho medio de las secciones 2 a 6 es de 170 m y de 78 m entre las secciones 7 y 8. La velocidad disminuye hacia aguas abajo desde 5 m/s hasta 3 m/s. La sección 1 no se tomó en cuenta ya que es la sección de control y además es exageradamente amplia en relación a las demás. La separación de las secciones se hace porque de acuerdo a lo observado estos tramos tienen características diferentes como se discute más adelante.

Granulometría

Las características del sedimento son una variable morfológica muy importante en la cuantificación del transporte. El material presente en el lecho consiste de material grueso desde arena hasta gravas, cantos rodados y bolones. El tamaño del material se determinó a través de muestreo superficial y muestreo volumétrico. El muestreo superficial se basó en una serie de fotografías de las barras de sedimento activas. El muestreo volumétrico se realizó durante la excavación de trincheras de prueba en los playones del río por personal del área de Geotecnia. En la figura 7.5.1.15 se muestra una de las fotografías utilizadas en la confección de la curva granulométrica por el método superficial. La cinta métrica en la figura tiene una extensión de 40 cm.

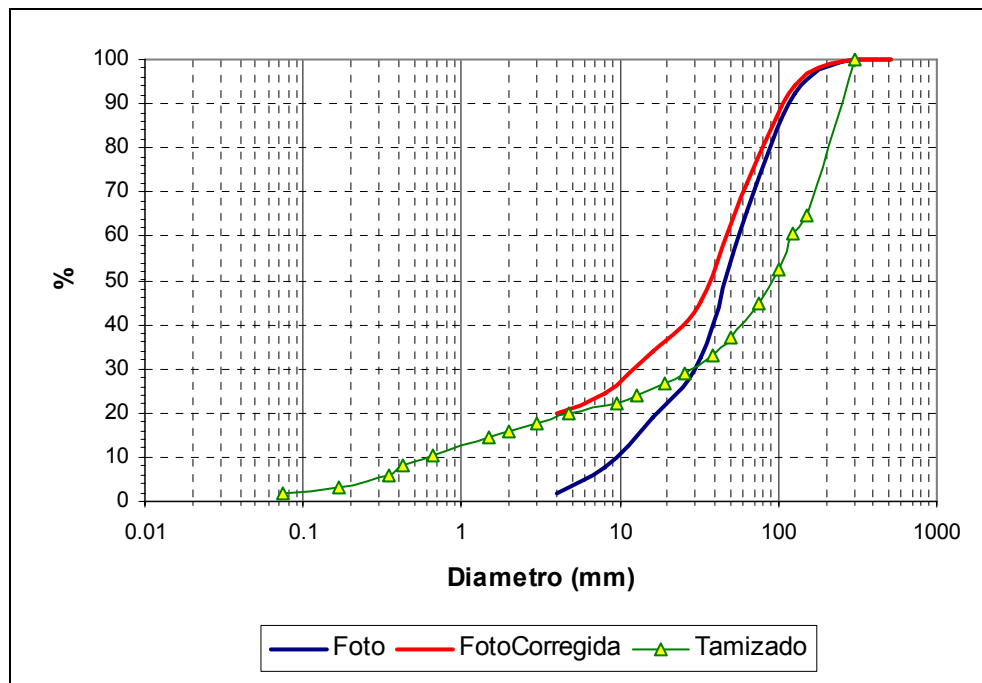
Figura 7.5.1.15
Ejemplo del material observado en el sitio.



En la figura 7.5.1.16 se presentan las curvas granulométricas obtenidas tanto con el método fotográfico como con el método volumétrico. En el caso del método volumétrico se presenta la curva promedio. En el gráfico también se muestra la curva fotográfica obtenida al hacer una corrección por el contenido de finos. La corrección es debida a que el flujo arrastra el material más fino y este no aparece en la foto. Es interesante observar en el gráfico que la curva del método volumétrico contiene material más grueso que la del método superficial. Normalmente el muestreo volumétrico bajo la capa superficial produce una curva con diámetros inferiores a los de la superficie. Esto puede ser evidencia de que la deposición se no se produce en capas delgadas sino que hay un movimiento general del material.

Para este estudio se consideró conveniente usar la curva corregida del método fotográfico. Los diámetros medios más importantes de dicha curva son:

$$\begin{aligned}D_{16} &= 2.3 \text{ mm} \\D_{50} &= 35.6 \text{ mm} \\D_{84} &= 85.3 \text{ mm} \\D_{90} &= 108.3 \text{ mm}\end{aligned}$$

Figura 7.5.1.16 Curvas granulométricas representativas en los tramos medio y transición.

La desviación estándar del material muestreado es 2.4, un valor mayor de 2 es normalmente indicativo de la posibilidad de acorazamiento del lecho. El acorazamiento del lecho limita la erosión del mismo ya que las partículas se traban unas con otras y aumentan el esfuerzo cortante necesario para producir el movimiento. En este caso el material es muy grueso y solo se produce arrastre significativo durante avenidas extraordinarias. Este aspecto se debe tomar en cuenta al estimar el transporte de sedimento durante caudales bajos.

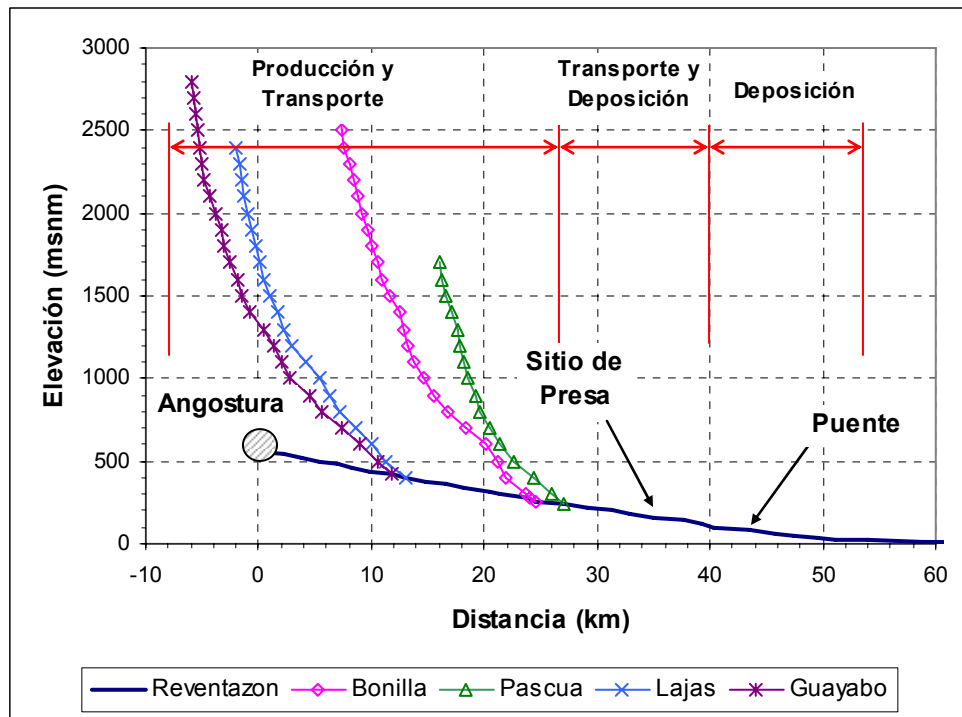
Perfil Longitudinal

En la figura 7.5.1.17 se muestra el perfil longitudinal del tramo medio y de transición, obtenido a partir de las hojas cartográficas Tucurrique y Bonilla del IGN, escala 1:50000. En la figura se ha indicado la ubicación de la presa del proyecto y del puente de la carretera San José-Siquirres y se han agregado los principales afluentes en términos de suministro de sedimento grueso.

En el perfil se pueden establecer dos tramos que como ya se ha dicho tiene características diferentes:

- 1) El tramo medio que corresponde a un río todavía de montaña donde se produce el sedimento grueso que es transportado hacia aguas abajo. Obsérvese la alta pendiente de los afluentes incluidos. Las fuentes de sedimento están en deslizamientos o derrumbes que ocurren tanto en los taludes del río principal como en sus afluentes: Guayabo, Lajas, Pascua y Bonilla. Aguas abajo de la confluencia con el río Pascua disminuye la producción masiva de sedimento y coincide aproximadamente con la cola del embalse. Este tramo iniciaría aguas abajo de Angostura y termina alrededor de la elevación 120 m.s.n.m. Nótese que las obras del proyecto estarían ubicadas en este tramo. La producción de sedimento grueso es elevada y en el canal se presenta tanto transporte como deposición o almacenamiento temporal. La pendiente media es de 1.3% y favorece al transporte sobre el almacenamiento;

Figura 7.5.1.17
Perfil del río Reventazón y sus principales afluentes en el tramo medio y de transición.



2) El tramo que hemos llamado de transición es el tramo de adaptación entre río de montaña y río de llanura. El proceso predominante es el almacenamiento del sedimento grueso. La pendiente media disminuye rápidamente a 0.6% lo que afecta sensiblemente la capacidad de arrastre. En este tramo se retiene todo el sedimento grueso y se inicia posteriormente la parte aluvial del río donde el sedimento de fondo es arena.

En lo que respecta al patrón vertical se observó una secuencia de rápidos cortos de mucha pendiente y pozas. Este tipo de patrón es común en este tipo de ríos y es responsable de la disipación de la energía del flujo.

Forma en Planta

En el tramo medio, la forma en planta del río está controlada por estructuras geológicas como fallas y afloramientos. En el tramo de transición, la cantidad y el tamaño de sedimento depositado son responsables del patrón en planta.

En la zona de deposición se observan grandes barras de material grueso en el lecho. El almacenamiento de material en el cauce provoca un patrón de trenzamiento de 2 a 4 canales a lo ancho del canal activo. Este tipo de ríos tiene un cauce poco definido y presenta movimiento lateral frecuente. En la fotografía 7.5.1.1 se observan los aspectos mencionados. La foto fue tomada hacia aguas abajo desde el puente de la carretera, el puente observado es el del ferrocarril.

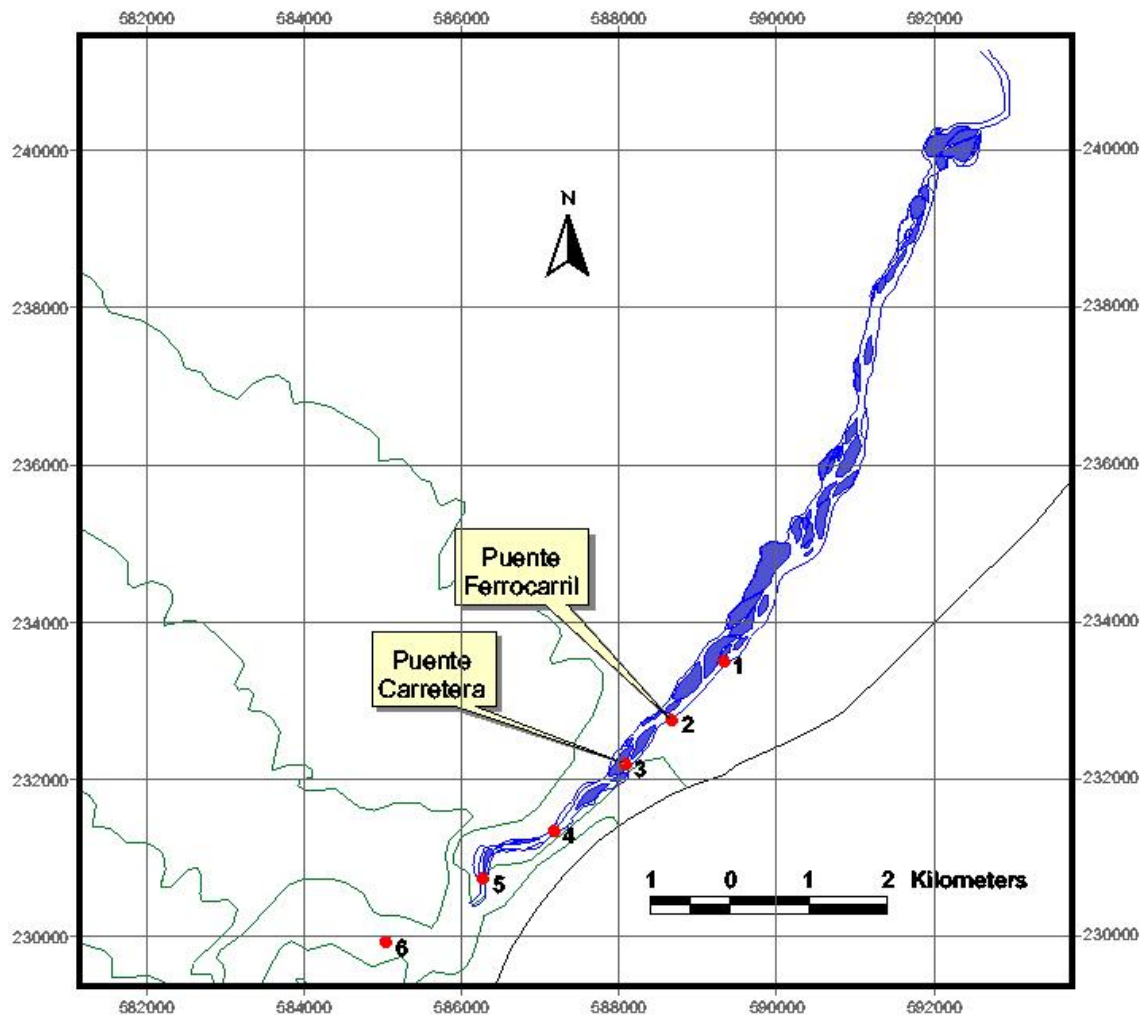
Fotografía 7.5.1.1
Vista hacia aguas abajo desde el puente de la carretera.



En la figura 7.5.1.18 se muestra la forma en planta del tramo de deposición con barras tanto en las márgenes como dentro del cauce, además se indica con puntos rojos la ubicación de las secciones; el flujo del río va de abajo hacia arriba. La figura fue obtenida a partir de fotografías aéreas de 1998 en escala 1:40 000. En la parte superior de la figura inicia el tramo aluvial del río donde éste sigue un solo canal con patrón de meandros y el material en el lecho es arena.

La mayor parte de las barras observadas en el sitio parecen tener carácter permanente lo que indica que el nivel del lecho podría estar ascendiendo como resultado del almacenamiento de sedimento.

Figura 7.5.1.18
Vista en planta en el tramo de transición.



Transporte por el Fondo

En el tramo medio el transporte en suspensión tiene mínima importancia en el proceso de formación del cauce. Por otro lado, el transporte de fondo de material grueso en grandes cantidades es fundamental en la morfología del tramo.

El transporte de sedimento se considera una variable morfológica independiente y se relaciona a la rapidez de la respuesta del cauce ante una perturbación. El cálculo del transporte por el fondo se hizo por fracciones de la curva granulométrica usando 4 ecuaciones: Ackers y White modificada (AW), Schocklitch (Sch), Meyer-Peter-Muller (MPM) y Parker. Dichas ecuaciones se usaron para el caudal formativo adoptado y luego para los caudales de la curva de duración diaria.

En el cuadro 7.5.1.9 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en el tramo medio donde el transporte es preponderante. En el cuadro 7.5.1.10 se muestra la estimación realizada en el tramo de transición donde el almacenamiento es dominante. En el cálculo del promedio no se ha tomado en cuenta el resultado de la ecuación de Meyer-Peter-Muller ni de Parker ya que el resultado de estas ecuaciones se considera exagerado.

Cuadro 7.5.1.9
Parámetros hidráulicos en las secciones.

	AW	MPM	Sch	Parker	Promedio
Total (kg/m3)	4.8	14.0	3.6	12.1	4.2
Total (m3/h)	6735.0	19488.7	4994.3	16863.8	5664.5

Cuadro 7.5.1.10
Parámetros hidráulicos en las secciones.

	AW	MPM	Sch	Parker	Promedio
Total (kg/m3)	0.59	4.5	1.0	5.0	0.8
Total (m3/h)	815.6	6311.5	1355.5	6931.3	1085.5

La concentración media en el tramo medio es de 4.2 kg/m^3 que se puede considerar como muy alta para sedimento de fondo. Obsérvese que la capacidad de transporte disminuye significativamente en el tramo de transición donde la concentración promedio es 0.8 kg/m^3 . De acuerdo a la ecuación de Schoklitch la capacidad de arrastre es de solo un 27% de la capacidad de aguas arriba. Visto de otra forma, el 73% del sedimento proveniente de aguas arriba se almacena en el tramo de transición lo que es consistente con lo observado en el sitio.

En la fotografía 7.5.1.2 se puede constatar el almacenamiento de sedimento grueso en una barra en la margen izquierda a unos 2 km aguas arriba del puente de la carretera. Observando con detalle se puede apreciar a una persona caminando dentro de la barra y da una idea de la escala. A la derecha se observa un brazo auxiliar, activo durante avenidas.

Fotografía 7.5.1.2
Barra de sedimento en la margen izquierda, tramo de transición.

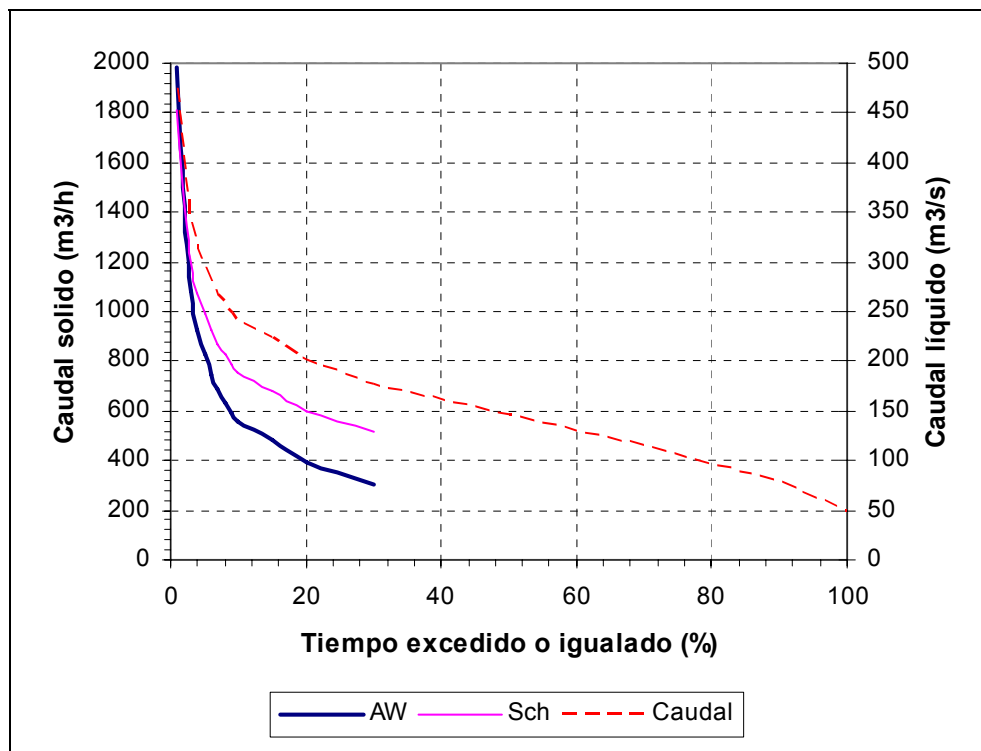


El volumen anual transportado se calcula en forma teórica con las ecuaciones de Ackers-White modificada y la ecuación de Schocklitch junto con la curva de duración de caudales diarios en la estación Pascua (figura 7.5.1.19). En este cálculo se usa la curva granulométrica adoptada pero se debe descartar el arrastre en caudales que no pueden romper el acorazamiento del lecho. El acorazamiento es un entramamiento entre los elementos que forman el lecho y que se obtiene por el transporte selectivo de las partículas más finas por parte de caudales medios.

Chin et. al. (1994) establecieron que el D_{50} de la capa acorazada es igual a 1.8 veces el diámetro máximo del material original. El diámetro máximo se puede aproximar con el D_{90} de la curva granulométrica original. Este resultado se usó para estimar el caudal mínimo que no podría romper el acorazamiento con base en los parámetros de movilidad de ambas ecuaciones. Caudales iguales o inferiores al mínimo encontrado no presentarían arrastre de fondo.

En la figura 7.5.1.19 se muestra el caudal sólido o de arrastre de fondo obtenido, se agrega la curva de caudal líquido como referencia. El cálculo corresponde al tramo 2 donde predomina el transporte. Obsérvese que en ambas ecuaciones el transporte se produce únicamente el 30% del tiempo. La ecuación Schocklitch produce un mayor arrastre, sin embargo para caudales altos la diferencia entre ambos resultados disminuye.

Figura 7.5.1.19
Curva de duración de caudal sólido y líquido.



Integrando los resultados del sedimento transportado se encuentra que el volumen sólido transportado anualmente está entre 1 y 1.5 Hm^3 , dependiendo de la ecuación usada. Si se usa el promedio de 1.25 Hm^3 de sedimento sólido y se supone una porosidad de 0.4 se obtiene un volumen total de 2 Hm^3 al año. En términos de peso dicho volumen equivaldría aproximadamente a 3 000 000 Ton de material al año que se almacenan actualmente en el tramo de transición.

Estabilidad del Cauce

En el tramo medio del río está controlado por estructuras geológicas y en apariencia es estable. Hay una gran producción de sedimentos aguas arriba pero la capacidad de transporte es suficiente para mantener el equilibrio dinámico. La fuente principal de sedimento grueso viene de deslizamientos masivos que caen directamente al río o bajan por sus afluentes.

Anteriormente se estimó el ancho promedio de la sección representativa en 78 m, que es cercano al valor obtenido con ecuaciones de régimen. Por ejemplo la fórmula de Hey y Thorne(1986) dio un ancho de 75 m. Es importante tener en cuenta que dicha ecuación se basa en la estadística de ríos con lecho de grava en condiciones de estabilidad. A partir de esta comparación y lo observado en el sitio se puede concluir que el tramo medio es estable. Recordemos que las obras del proyecto estarían localizadas dentro del tramo medio.

En el tramo de transición es más difícil establecer el grado de estabilidad ya que el río es trezado. Desde el punto de vista de la capacidad de arrastre es claro que esta es muy limitada mientras que el suministro de sedimento grueso es muy alto. Este desbalance es indicador de inestabilidad a pesar de que el río se ha mantenido en su cauce en los últimos 30 años.

En la clasificación de Rosguen el tramo de transición es de tipo *D3* que corresponde a un río de tipo trezado con bloques y bolones. El tipo *D* se caracteriza por presentar barras de material que dividen el flujo en varios canales y por ser anchos con márgenes erosionables. Específicamente el tipo *D3* es muy sensible a las perturbaciones en su cauce, su potencial de recuperación es bajo, el suministro de sedimento es muy alto y el potencial de erosión en sus márgenes es muy alto. La clasificación descrita se ajusta muy bien a las condiciones observadas en el sitio.

Un tramo de río con las características descritas para el tramo de transición se considera como inestable ya que la energía del flujo no tiene capacidad para transportar todo el material que baja desde la cuenca superior y el movimiento lateral del cauce principal es frecuente. Durante avenidas extremas, la formación de barras de sedimento, laterales o longitudinales hace que el río se divida en varios canales y ataque las márgenes.

Un problema latente en el tramo de transición es el ascenso del nivel del lecho debido a la deposición de sedimento grueso y con este el aumento en el nivel del agua durante avenidas. Hay varios poblados que se ven afectados por el desbordamiento del río en la parte final de este tramo como el Cocal y el Cairo.

Para evitar el desbordamiento se han construido diques entre los que los más conocidos son el ubicado en la margen derecha aguas del puente de ferrocarril en el sitio conocido como brazo del Guayacán y otro ubicado en la misma margen cerca del Cocal conocido como el dique Murillo. El brazo del Guayacán fue un antiguo cauce secundario que desaguaba en el río Pacuare.

Estos diques deben ser reconstruidos continuamente ya que son dañados por el río durante avenidas. En la figura 7.5.1.20 se muestra parte del dique en el brazo del Guayacán después de que fue reconstruido en el 2002. La fotografía se tomo hacia aguas abajo. Aparentemente el constructor trató de lograr el efecto de espigones cortos al pie del dique, obsérvese el empinado talud del dique.

Figura 7.5.1.20
Dique en el Brazo del Guayacán.



Tramo Inferior o Aluvial

El tramo inferior consiste en un río de llanura que fluye a través de sedimentos depositados por el mismo en el pasado. El sedimento en el lecho consiste de arenas de tamaño medio a fino. La pendiente promedio es de 0.00036 y esto limita la capacidad de transporte de la sección.

Las márgenes están compuestas por arenas limo-arcillosas que ofrecen resistencia moderada a la erosión. La vegetación en las riberas es variable, va desde escasos árboles de hasta 20 m de altura a potreros. Existen plantaciones extensas de banano en la planicie de inundación y se observaron diques para la protección de las mismas.

La fotografía 7.5.1.3 muestra parte del dique construido en 1992 en la margen izquierda para la protección de plantaciones de banano. El dique se observa desde Islona y llega hasta Hamburgo. Existen otros diques en la margen derecha a la altura del Carmen, aguas arriba de Hamburgo.

Fotografía 7.5.1.3
Dique de protección en la margen izquierda a la altura de Islona.



Caudal Formativo

En el caso del río del tramo inferior del río Reventazón se analizaron las 5 secciones transversales disponibles y se encontró que el caudal que produce un vertido general es de unos $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal es un poco mayor que el caudal con período de retorno de 1 año en la estación Pascua. Este caudal es consistente con observaciones hechas por los habitantes de la zona. Vargas(2005) encontró que a la altura de Hamburgo se producen desbordamiento localizado alrededor de un caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

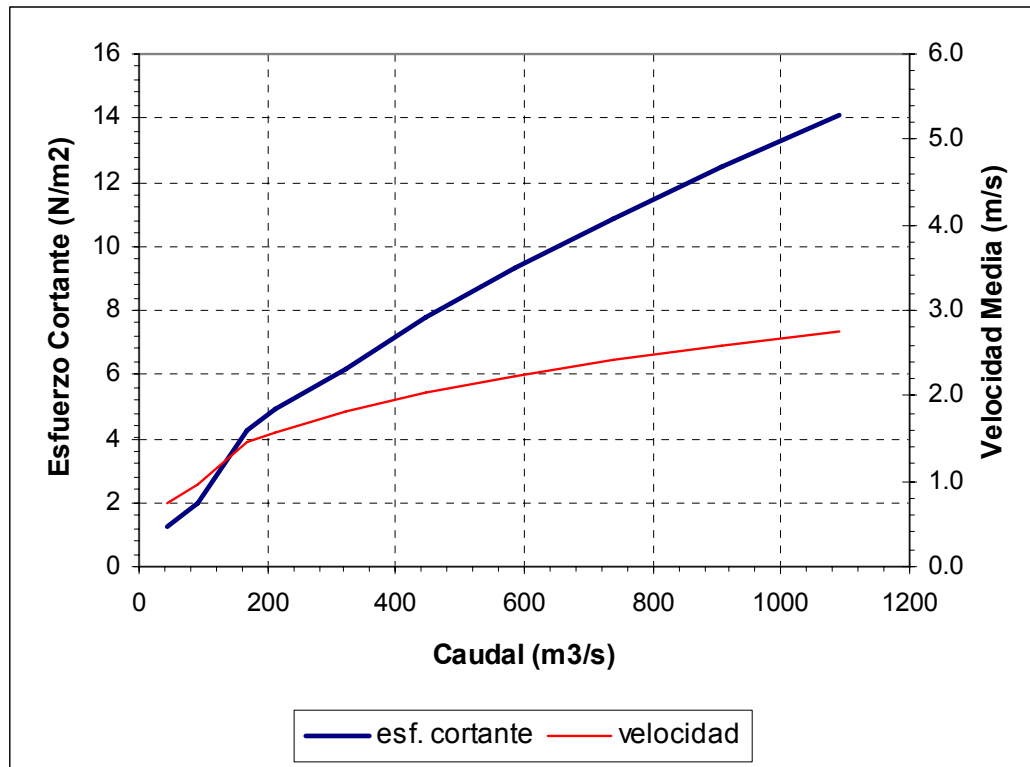
Para el caudal formativo el ancho de la sección típica del tramo resultó en 75 m. Para obtener la capacidad de la sección se tuvo que calcular la resistencia al flujo y el tipo de formas en el lecho.

En ríos que transportan arena se producen perturbaciones en el lecho como rizos o dunas, conocidas como formas del lecho y estas presentan resistencia al flujo que hay que tomar en cuenta. Por lo tanto, fue necesario clasificar el tipo de formas en el lecho para lo que se utilizó la metodología propuesta por Van Rijn(1993).

En el caso del río Reventazón se encontró que para caudales menores a $100 \text{ m}^3/\text{s}$ se forman dunas con mega rizos (con un máximo de 25 cm de altura y 11 m de largo). Para caudales mayores el tipo de forma del lecho más frecuente serían las ondas de arena que no ofrecen resistencia al flujo, la altura teórica máxima de dichas formas sería de 0.5 m. Aunque las ondas no ofrecen resistencia al flujo, si podrían provocar el desbordamiento porque el nivel del lecho se eleva. En la parte externa de curvas cerradas también se puede producir desbordamiento local debido a la sobre elevación del nivel de agua en la parte externa de la curva. Esta sobre elevación es función del radio de la curva y de la velocidad del flujo.

En la figura 7.5.1.21 se presenta la variación de la velocidad media y el esfuerzo cortante en función del caudal. El esfuerzo cortante es la fuerza por unidad de área que se produce entre las paredes del canal y el flujo. El esfuerzo cortante representa la capacidad de erosionar y arrastrar sedimento y es un parámetro muy importante para evaluar los cambios en un canal. Para el caudal de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ la velocidad es de 2.25 m/s y el esfuerzo cortante es aproximadamente de 9.5 N/m^2 . Los valores anteriores se pueden considerar normales. En la parte de baja de las curvas la variación abrupta de las variables se debe a la aparición de dunas en el lecho.

Figura 7.5.1.21
Variación del esfuerzo cortante y la velocidad media con el caudal.



Ancho del Canal

De acuerdo al análisis realizado el ancho de la sección representativa es de 75 m. En los recorridos realizados se observó erosión activa en las márgenes del río indicando que este se tiende a ensanchar la sección y podría no estar en equilibrio actualmente.

Con base en la ecuación propuesta por Lacey el ancho para el caudal formativo debería de ser 78 m y la profundidad media de 3.9 m. La ecuación de Lacey se basa en la teoría de régimen que supone que en el equilibrio no debería producirse erosión ni variación en el nivel del lecho del canal.

Usando las ecuaciones de Julien (2002) se obtuvo un ancho de 115 m y una profundidad media de 4.4 m. Dichas ecuaciones se desarrollaron en forma teórica a partir ecuaciones de equilibrio y toman en cuenta el esfuerzo cortante y el tamaño de la partícula.

En la zona se observó erosión en las márgenes que pueden ser indicio de que el río está en un proceso de adaptación que implicaría un aumento en el ancho del cauce principal. El aumento en el ancho del canal tendría que ser causado por un incremento en el caudal. En la Fotografía 7.5.1.4 se muestra la erosión en la margen derecha a la altura de Islona.

Fotografía 7.5.1.4
Erosión en la margen derecha aguas arriba de Hamburgo.



Fotografía 7.5.1.5
Erosión en la margen derecha debido al oleaje por el tránsito de lanchas.



La fotografía 7.5.1.5 muestra erosión en la margen derecha aguas abajo de Caño Blanco. La erosión es debida al oleaje generado por el tránsito de lanchas.

Transporte de Sedimentos

Las fuentes de sedimento para este tramo están principalmente en el transporte de partículas finas desde aguas arriba y la erosión las márgenes dentro del mismo tramo. El río transporta material grueso pero este queda almacenado aguas arriba del tramo de transición como se demostró anteriormente. A diferencia del tramo de aguas arriba en el tramo inferior el sedimento en suspensión es fundamental en la morfología del cauce.

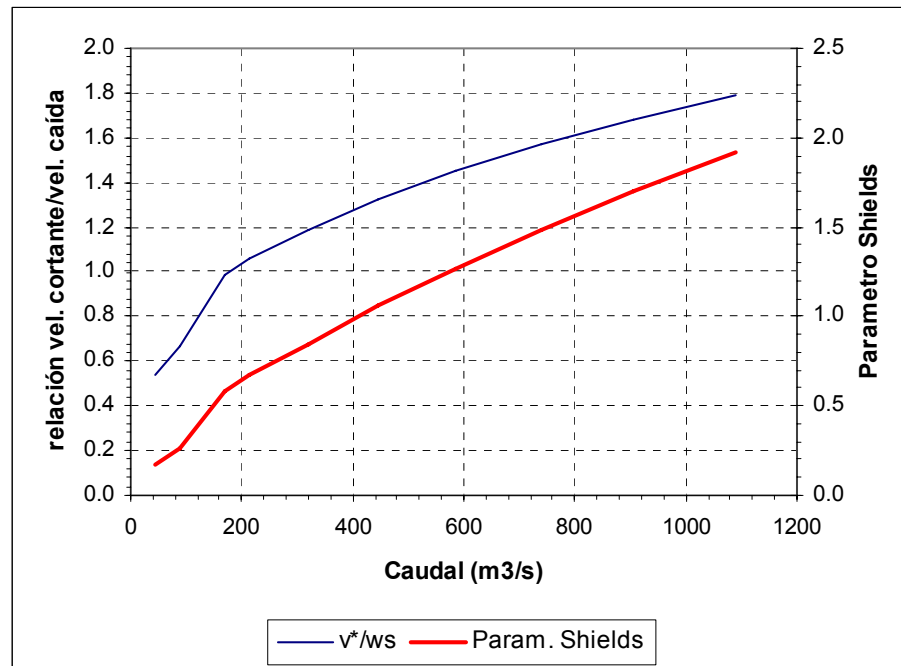
El transporte de sedimento en el tramo inferior se produce dos formas: transporte por el fondo y en suspensión. Existe otro tipo de sedimento que se conoce como carga de lavado o “washload”. La carga de lavado está asociada a limos y arcillas cuyo papel morfológico más importante se presenta en las planicies de inundación. La cuantificación de la carga de lavado solo es posible a través de la estadística de mediciones históricas ya que no sigue ninguna relación con el caudal ni otro parámetro hidráulico. La carga de lavado es la que le da el color café al agua durante avenidas.

En el transporte por el fondo, el sedimento se mueve saltando y rodando cerca del lecho pero cuando la turbulencia del flujo es suficiente el sedimento puede ser levantado y transportado a niveles por encima del fondo o en suspensión. En ríos con lecho de arena el acorazamiento es limitado y flujo tiene la libertad de erosionar el lecho por lo que se puede hablar directamente de transporte en vez de capacidad de arrastre.

El tipo de transporte predominante depende principalmente del tamaño del sedimento y de la energía del flujo. Normalmente se considera que el arrastre en suspensión se inicia cuando la velocidad de cortante es igual o mayor a la velocidad de caída de la partícula. La velocidad de caída es aquella que desarrolla una partícula cayendo dentro de agua en reposo y su relación al tamaño del sedimento se ha medido en laboratorio (Rijn, 1993).

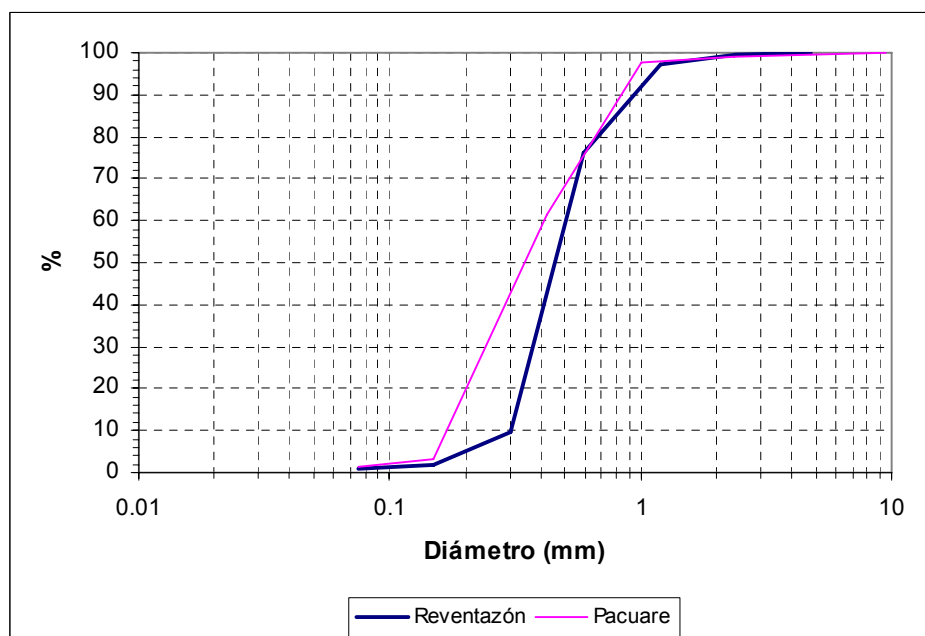
En la figura 7.5.1.22 se muestra la variación de la relación de la velocidad de cortante sobre la velocidad de caída (v^*/w_s) en función del caudal en el tramo inferior del río. En la figura se incluye la variación del parámetro de movilidad de Shields que predice el movimiento si se supera el valor de 0.06. De la figura se concluye que el transporte en suspensión inicia cerca de los 200 m³/s, por debajo de ese caudal solo habría transporte por el fondo. Además, el parámetro de movilidad es mayor al umbral establecido y prácticamente siempre habría transporte de sedimento, como mínimo por el fondo.

Figura 7.5.1.22
Variación de los parámetros de movilidad del sedimento.



Para calcular la capacidad de arrastre de sedimentos se requirió construir la curva granulométrica del sedimento. La curva granulométrica también tiene influencia en el tipo de formas del lecho. La curva se construyó a través del método volumétrico con una muestra tomada en una barra lateral aguas abajo de la confluencia con el río Parismina. La curva obtenida se muestra en figura 7.5.1.23 junto con una curva granulométrica tomada en el tramo inferior del río Pacuare (Vargas y Zúñiga, 2005).

Figura 7.5.1.23
Curva granulométrica para el tramo inferior.



Obsérvese que ambas curvas son consistentes y se trata principalmente de arena de tamaño medio. Los tamaños más significativos obtenidos en la curva son:

$$\begin{aligned} D_{16} &= 0.32 \text{ mm} \\ D_{50} &= 0.45 \text{ mm} \\ D_{84} &= 0.77 \text{ mm} \\ D_{90} &= 0.95 \text{ mm} \end{aligned}$$

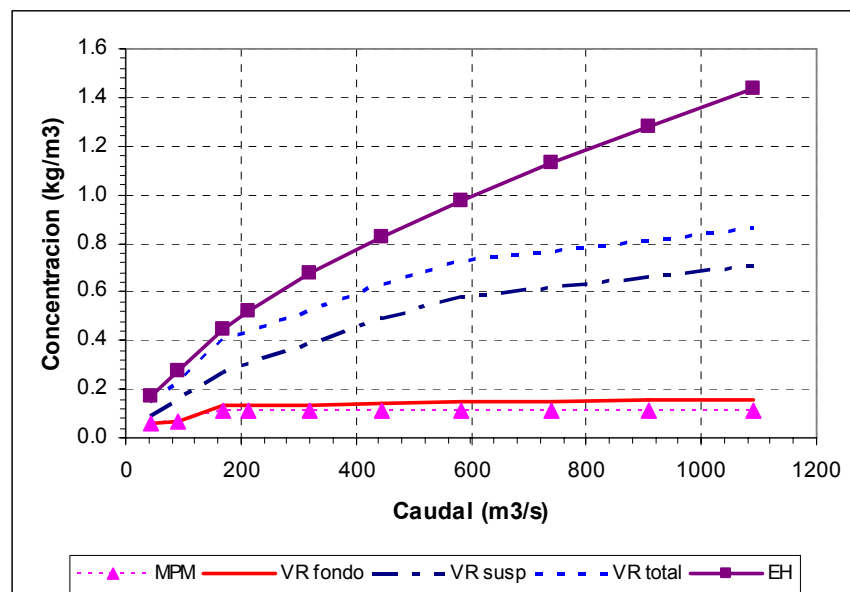
El cálculo de la capacidad de transporte por el fondo se realizó usando las ecuaciones propuestas por Meyer-Peter-Muller y por Van Rijn. La primera se escogió porque es una ecuación muy usada mundialmente, obtenida a partir una enorme base de datos; la segunda se usa porque es relativamente reciente y ha mostrado producir el menor error en diferentes comparaciones.

Por otro lado, el arrastre en suspensión se calculó usando únicamente la metodología propuesta por Van Rijn. El transporte total de sedimento se obtuvo de dos formas: 1) sumando el arrastre por el fondo y el arrastre en suspensión a partir de las ecuaciones de Van Rijn; y 2) usando la ecuación de Engelund-Hansen, esta ecuación fue obtenida a partir de circunstancias en que el arrastre en suspensión era dominante y por lo tanto se considera que produce valores de arrastre total (transporte por el fondo más transporte en suspensión).

Los resultados del cálculo de transporte de sedimento se presentan en la figura 7.5.1.24. La curva *MPM* representa los resultados obtenidos con la fórmula de Meyer-Peter-Muller, la curva *VR* los resultados de Van Rijn para arrastre de fondo, suspensión y la suma de los dos; finalmente la curva *EH* muestra los resultados con la fórmula de Engelund-Hansen.

En el gráfico se observa que el transporte por el fondo representa un porcentaje muy pequeño del transporte total o sea que la mayor parte del sedimento se transporta en suspensión. Los resultados del transporte por el fondo son muy similares en las dos ecuaciones usadas. En el sedimento en suspensión la diferencia entre los resultados de Engelund-Hansen y el método de van Rijn crece con el caudal. La concentración de sedimento es relativamente baja, para el caudal a cauce lleno va de 0.8 a 1 kg/m³. Se considera que la concentración es alta a partir de 10 kg/m³. La concentración en mg/l se obtiene multiplicando por 1000 los valores en kg/m³.

Figura 7.5.1.24
Transporte de sedimentos en función del caudal.



En la fotografía 7.5.1.6 se muestra la acumulación de sedimento en la planicie de inundación en la antigua escuela de Hamburgo. La cinta en la figura tiene una longitud expuesta de 40 cm y está apoyada aproximadamente en el antiguo nivel de piso. La imagen es evidencia de que el arrastre en suspensión es muy significativo en el río Reventazón.

Fotografía 7.5.1.6
Deposición de sedimento en suspensión en la planicie de inundación



La curva de duración de caudal en la estación Pascua se trasladó por relación de áreas hasta el inicio del tramo aluvial. El factor usado fue de 1.08. Con la curva trasladada y las curvas de descarga de sedimento (figura 7.5.1.24) se calculó el volumen anual de sedimento transportado en el tramo inferior. El valor obtenido fue de 2 300 000 ton con la fórmula de Engelund Hansen y de 1 900 000 al año con la de van Rijn. El promedio de ambos resultados es de 2 100 000 ton que correspondería únicamente a arena pero hay que aclarar que el sedimento fino puede estar presente en cantidades imposibles de estimar.

En figura 7.5.1.25 se presenta la curva de duración del caudal sólido obtenido con las dos ecuaciones, la diferencia entre ambas es más marcada en la parte alta de las curvas.

En curvas granulométricas medidas en varias estaciones la fracción de arena varía entre el 10 y el 70% del sedimento en suspensión. En la figura 7.5.1.26 se muestran los datos de dichas mediciones. Obsérvese que las concentraciones mayores se registraron en estaciones ubicadas en el tramo medio. En la estación Hamburgo, ubicada en el tramo inferior, la fracción de arena fue menor al 50%.

Figura 7.5.1.25
Porcentaje de arena en curvas granulométricas de sedimento en suspensión.

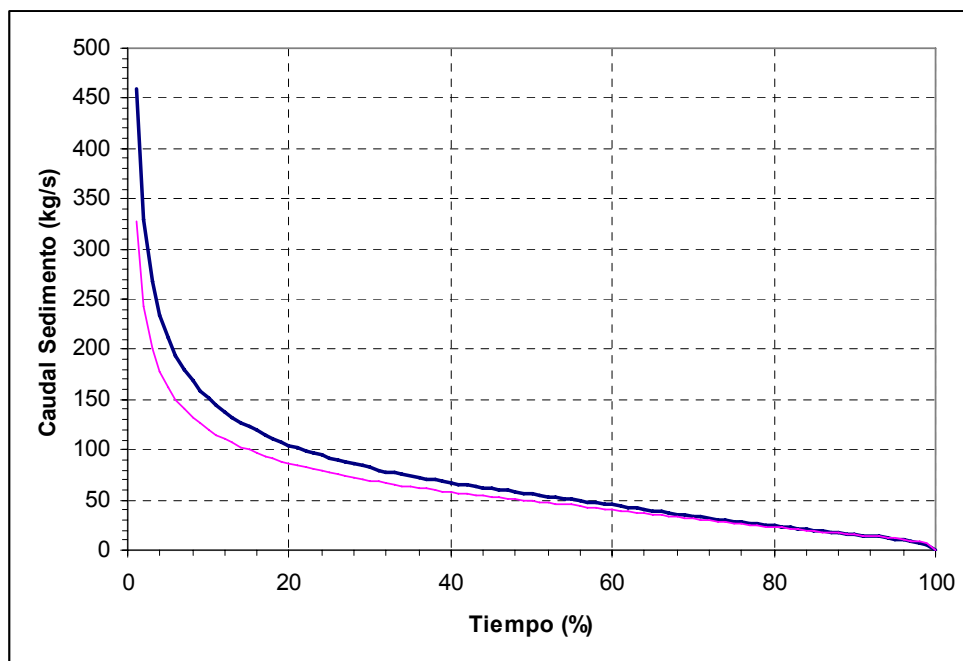
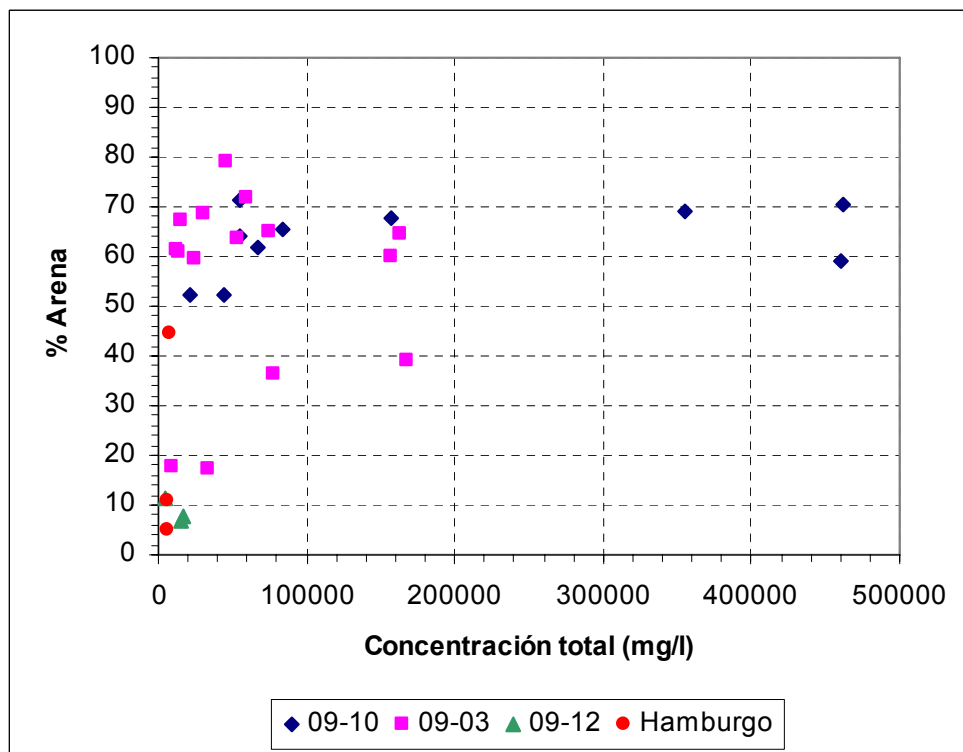


Figura 7.5.1.26
Porcentaje de arena en curvas granulométricas de sedimento en suspensión.



De acuerdo al estudio de sedimento en suspensión presentado en el documento ICE (2006), la producción anual de sedimento en suspensión en la estación Pascua es de 4 000 000 ton pero este valor incluye el sedimento de lavado o sedimento fino cuya fracción del total puede estar alrededor del 50%. Como la producción anual se da en peso de los sólidos es aceptable suponer que el total de arenas es de aproximadamente la mitad de dicha producción. En tal caso la cantidad transportada de arena desde la estación Pascua es prácticamente la misma calculada en forma teórica. Se debe advertir que la fracción de arenas es muy variable y respecto a los sedimentos no es extraño encontrar desviaciones del 100% respecto a las cantidades reales y estos resultados deben manejarse con cuidado. Por otro lado, en la estación Pascua las condiciones del flujo permiten el transporte de concentraciones mucho mayores a las que se pueden transportar en el tramo inferior y debe esperarse el almacenamiento temporal en el cauce.

Forma en Planta

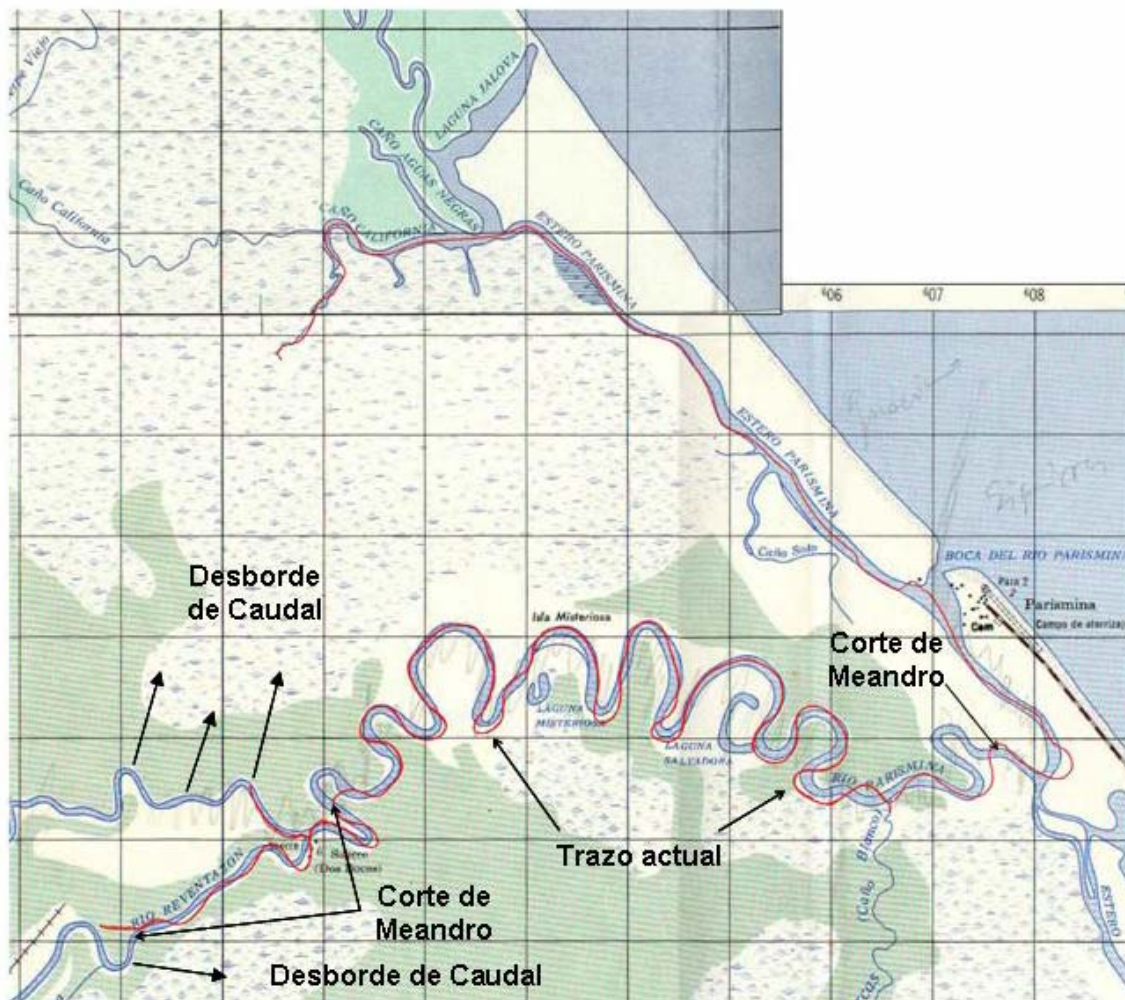
El tramo inferior del río Reventazón presenta un patrón de meandros. El índice de meandro es de 2.1 que es un valor alto y que representa baja capacidad de transporte de sedimento y relativa estabilidad.

Al analizar las imágenes de satélite disponibles se encontró que se han producido 2 cortes de meandro, el primero en 1996, aguas abajo del muelle de Caño Blanco y el segundo en el 2001, aguas abajo de la unión con el río Parismina. Hay un tercer corte hecho artificialmente en el año 2006 aguas arriba de la unión con el río Parismina. Los cortes mencionados se muestran en la figura 7.5.1.27, donde también observa el trazado actual del río registrado con GPS en setiembre del 2007 sobre la hoja cartográfica construida con la fotografías aéreas de 1960.

El corte más reciente se hizo artificialmente para disminuir el vertido en la parte externa de la curva aguas arriba de unión con el río Parismina. El vertido aparentemente fue iniciado por una derivación de caudal que fue erosionada por el flujo hasta desviar aproximadamente un 30% del caudal del río. La abertura en esa curva ocasionó graves problemas de inundación la planicie de margen derecha y en el camino a Caño Blanco.

En la fotografía 7.5.1.7 se muestra el flujo sobre el camino de acceso a Caño Blanco en el 2005, proveniente principalmente del desvío en la curva. El corte realizado ha producido la colmatación en la curva cortada como se muestra en la fotografía 7.5.1.8 y el caudal desviado se ha reducido sensiblemente. En dicha foto se observa el antiguo cauce en la curva visto desde el extremo de aguas abajo.

Figura 7.5.1.27
Situación actual del sistema en el tramo inferior del río Reventazón.



Fotografía 7.5.1.7
Inundación de la planicie de inundación de margen izquierda.



Fotografía 7.5.1.8
Colmatación del cauce en el corte más reciente.



No sabemos si el corte en la parte inferior fue natural pero aparentemente ha promovido la erosión lateral aguas arriba. El corte de un meandro produce una reducción en la longitud y con ello un aumento local en la pendiente del fondo. El efecto en la morfología se manifiesta en tendencia a erosión del lecho hacia aguas arriba y deposición del material hacia aguas abajo hasta alcanzar la pendiente original.

En general es evidente el movimiento en todas las curvas en el tramo final del río. En la fotografía 7.5.1.9 se muestra erosión en la parte externa de la curva, bajo la maleza, en las coordenadas 604 325, 254 093. La erosión es lenta pero activa.

Fotografía 7.5.1.9
Erosión en la parte externa de curva.



También se observó en varias curvas el corte interno de la barra de punta. En la fotografía 7.5.1.10 se muestran cortes en la parte interna de la curva en las coordenadas 601 393, 253 204. Como consecuencia de estos cortes se forman pequeñas islas dentro del cauce.

Fotografía 7.5.1.10
Cortes naturales en la parte interna de curva.

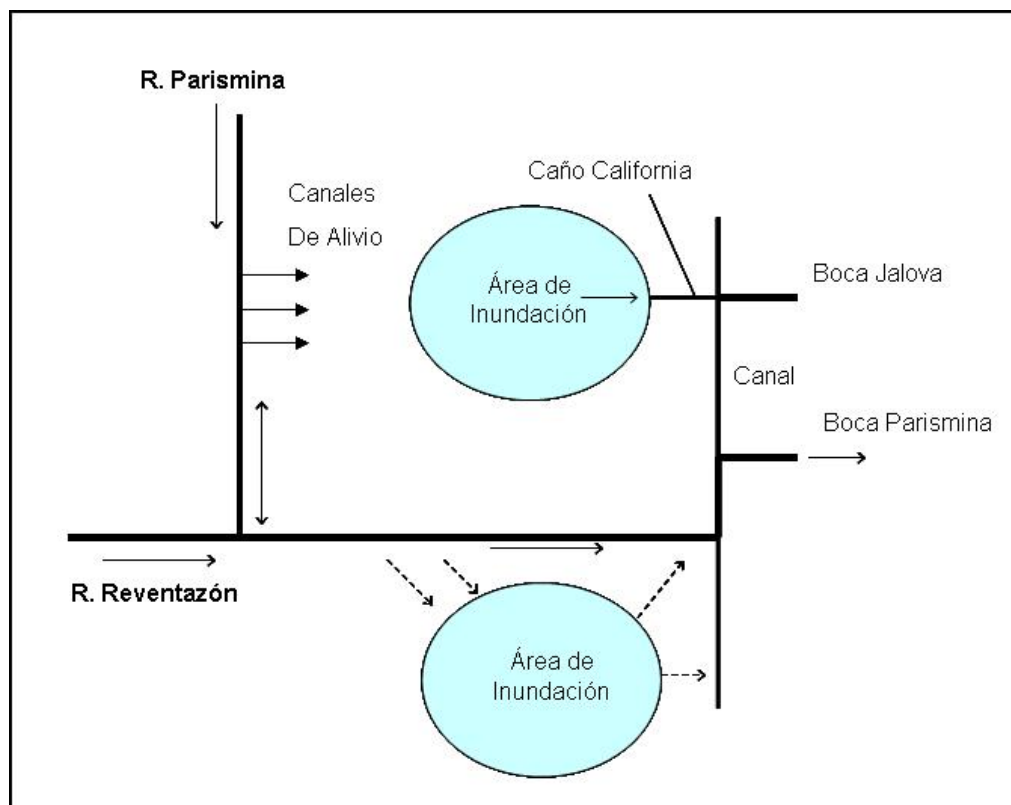


Estabilidad del Tramo Inferior

El sistema fluvial en el tramo inferior es bastante complicado y no parece estar en equilibrio. En la figura 7.5.1.28 se muestra un esquema de dicho sistema. Obsérvese que la conexión entre el río Reventazón y el río Parismina es bidireccional, esto quiere decir que cuando el caudal es bajo en el Parismina el río Reventazón desvía parte de su caudal hacia el Parismina. El caudal desviado hacia el Parismina sale por varios canales de alivio que se han excavado en forma natural en la margen izquierda y que se almacenan en la planicie de inundación. La planicie de inundación se desagua a través del caño California y finalmente sale por la Boca Jalova. El flujo descrito ha aumentado en la última década y ha mantenido abierta la boca que antes se cerraba con frecuencia. El río Parismina tiene un área de cuenca de unos 736 km² y su caudal durante avenidas debe ser significativo.

En la fotografía 7.5.1.11 se muestra el inicio de uno de los canales de alivio. Obsérvese la foto la cantidad de sedimento depositado a la derecha que es evidencia de que el flujo se desbordó sobre ese punto y que la concentración de sedimento en suspensión fue alta. También puede verse gran cantidad de ramas y troncos pequeños depositados en el canal de alivio y que reflejan la actividad del mismo. El flujo del Reventazón hacia el Parismina lleva una gran cantidad de sedimento en suspensión que también se deposita parcialmente en la unión entre ambos. En la fotografía 7.5.1.12 se muestra la barra que se forma sobre la margen derecha a la salida del Parismina. La foto fue tomada desde el río Reventazón dos días después del desembalse de Cachí.

Figura 7.5.1.28
Esquema del sistema fluvial del tramo inferior del río Reventazón.



Fotografía 7.5.1.11
Entrada a uno de los canales de alivio.



Fotografía 7.5.1.12
Barra de arena en la salida del río Parismina.



La Boca Parismina se cierra frecuentemente en forma parcial y disminuye su capacidad de evacuación. La falta de capacidad de esta boca hace que el parte del caudal continúe hacia la Boca Jalova. Este flujo transporta sedimento dentro del canal que se precipita debido a la disminución de la velocidad y dificulta la navegación.

Durante avenidas mayores al caudal a cauce lleno el río Reventazón se desborda en la parte externa de las curvas hacia ambas márgenes donde el agua se almacena temporalmente. El canal de Tortuguero y el canal de Moín funcionarían como parte del área de almacenamiento. Sin embargo, dependiendo del caudal en el río Pacuare se puede generar flujo hacia este río. Anteriormente el caudal desbordado sobre la margen derecha volvía al Reventazón por el río Chiquero pero la reducción de la sección del canal en la unión nos hace pensar que esa situación está variando. También se producen desbordes en otras curvas ubicadas aguas arriba. En la fotografía 7.5.1.13 se muestra el dique construido en el 2002 a la altura del Carmen. Este dique es frecuentemente dañado por el río durante avenidas y provoca la inundación de varios poblados.

Fotografía 7.5.1.13
Dique en la margen derecha a la altura del Carmen.



La situación de estabilidad es difícil de establecer en el tramo medio y da la impresión de que el río se encuentra en un proceso de ajuste. Este proceso puede tardar años, dada la limitada capacidad de erosión del flujo. La interacción de los ríos Reventazón y Parismina debe ser analizada en un modelo detallado que contemple el esquema propuesto. Con los resultados de dicho modelo si sería posible pronosticar la tendencia actual del río en su tramo inferior. La información disponible a la hora de hacer este estudio no es suficiente para construir el modelo ya que no hay secciones topográficas ni datos hidrológicos del río Parismina.

En el esquema no se incluyó el río Peje que un afluente muy pequeño del río Reventazón. La comunicación entre el río Peje y el Reventazón se da al inicio del tramo inferior. Al final del río Peje se forma una laguna de importantes dimensiones que almacena las avenidas de este río y disminuye así el aporte del caudal hacia el río Reventazón. Igualmente el Reventazón solo invade el río Peje durante avenidas mayores al caudal de cauce lleno. El área de la cuenca del río Peje es de solo 40 km² y su caudal base es limitado. En la fotografía 7.5.1.42 se muestra una parte de la laguna mencionada.

Fotografía 7.5.1.14
Vista parcial de la laguna del río Peje.



Sedimentos

Antecedentes

Dado que el tema de sedimentos es una de las preocupaciones primordiales en cuanto a la posible construcción y desarrollo del proyecto, en septiembre el año 2001 se elaboró un informe comprensivo sobre sedimentos. En dicho documento se menciona desde la forma de hacer una curva de descarga de sedimentos hasta la estimación del acarreo, en toneladas, de las principales estaciones hidrológicas que se encuentran en la cuenca.

Para conocer la condición de la información que cada estación hidrológica puede aportar en lo referente a sedimentos, se han definido clasificaciones que denotan la condición de las muestras obtenidas para la definición de su respectiva curva de descarga de sedimentos. Dicha clasificación es la siguiente:

- **Roja.** La cantidad de muestras es totalmente insuficiente para definir una curva de descarga de sedimentos.
- **Amarilla.** Las muestras tomadas no reúnen las condiciones mínimas para definir una curva de descarga de sedimentos. Si se elabora ésta (la curva) muy probablemente la estimación del tonelaje final sea sub-estimada.
- **Verde.** Existe una cantidad de muestras que permiten la estimación de una primera curva de descarga.
- **Azul.** Las muestras tienen una distribución, para caudales bajos, medios y altos, que permite una buena estimación del tonelaje.

- **Azul oscuro.** Se trata de la condición ideal de las muestras, donde existe una presencia de en los tres estratos de caudales, bajos, medios y altos; especialmente de éstos últimos, que permiten una definición bien clara de la curva de descarga de sedimentos.

Para este nuevo informe se actualizan los cálculos para las estaciones 9-27 S.P. Guayabo (condición verde) y 9-12 Pascua (condición amarilla), y se proporciona un estimado del sedimento que podría recibir el futuro embalse del P.H. Reventazón.

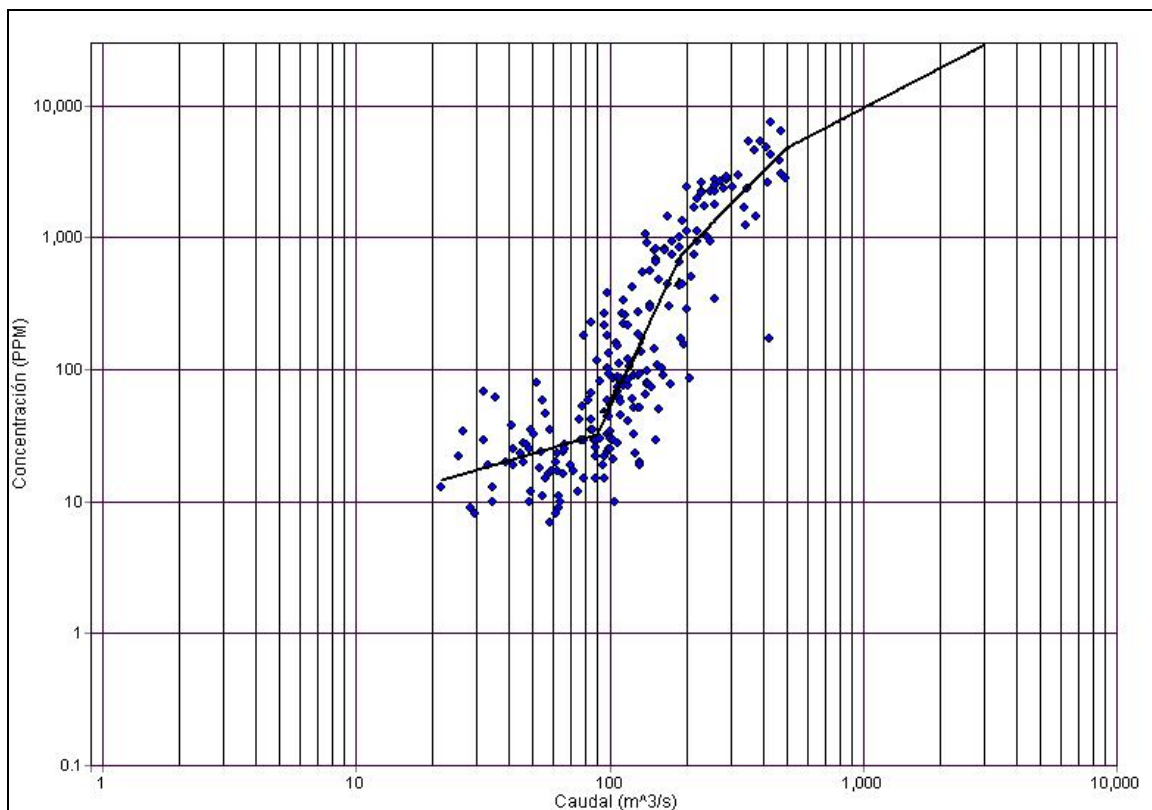
Actualización de las curvas de descarga de sedimentos.

Estación 9-27 Sitio de Presa Guayabo.

En el informe del 2001 esta estación tenía un total de 201 muestras, con las que se elaboró una curva de descarga de sedimentos que arrojó una producción anual de 1,532,136.00 toneladas.

Para este informe se disponen de 221 muestras, 20 más que para el último informe, que mejoraron las estimación pasada, especialmente porque estas nuevas fueron obtenidas para condiciones de creciento. La curva de descarga para sedimentos definida es la siguiente:

Figura 7.5.1.29.
Curva de descarga de sedimentos, estación 9-27 S.P. Guayabo

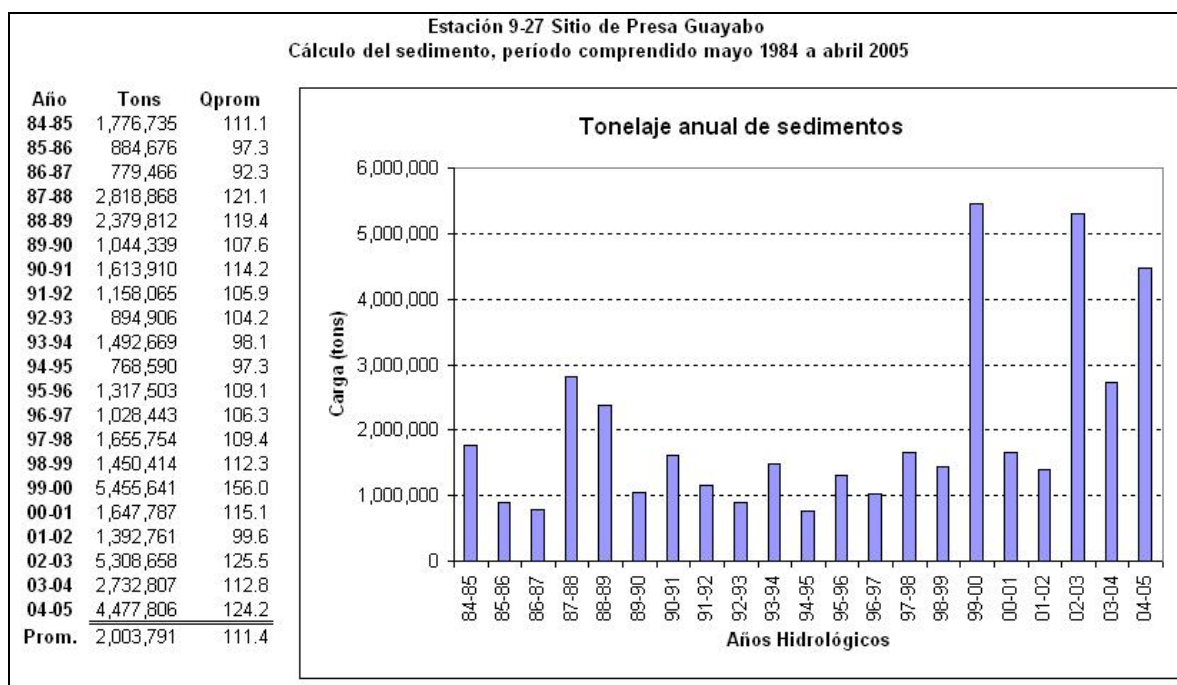


Las ecuaciones de las rectas de mejor ajuste son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{PPM} &= 4.0675 * Q_{\text{liq}}^{0.43676} && \text{para } 0.1 \leq Q_{\text{liq}} < 90 \\ \text{PPM} &= 2.2861\text{E-}7 * Q_{\text{liq}}^{4.1631} && \text{para } 90 \leq Q_{\text{liq}} < 190 \\ \text{PPM} &= 0.019252 * Q_{\text{liq}}^{2.0036} && \text{para } 190 \leq Q_{\text{liq}} < 500 \\ \text{PPM} &= 9.7766 * Q_{\text{liq}} && \text{para } 500 \leq Q_{\text{liq}} < 3000 \end{aligned}$$

Utilizando los caudales promedio diario y aplicando una corrección para la consideración del cálculo horario, se obtienen los siguientes tonelajes:

Figura 7.5.1.30
Tonelajes obtenidos en la estación 9-27 S.P. Guayabo.



El incremento en la producción de sedimentos entre el valor del informe del 2001 y el presentado en la figura 7.5.1.30 es del 30.8% (tomando como referencia el primero), la explicación de aumento estriba en dos aspectos: 1- la curva de descarga se definió de mejor forma con la llegada de muestras tomadas para caudales altos, y 2- como se mostró anteriormente, desde el año 96-97 la cuenca se encuentra en el período de años donde los caudales van en aumento, esto implica más crecientes y de gran magnitud, lo que a su vez ocasiona mayor arrastre de sedimento.

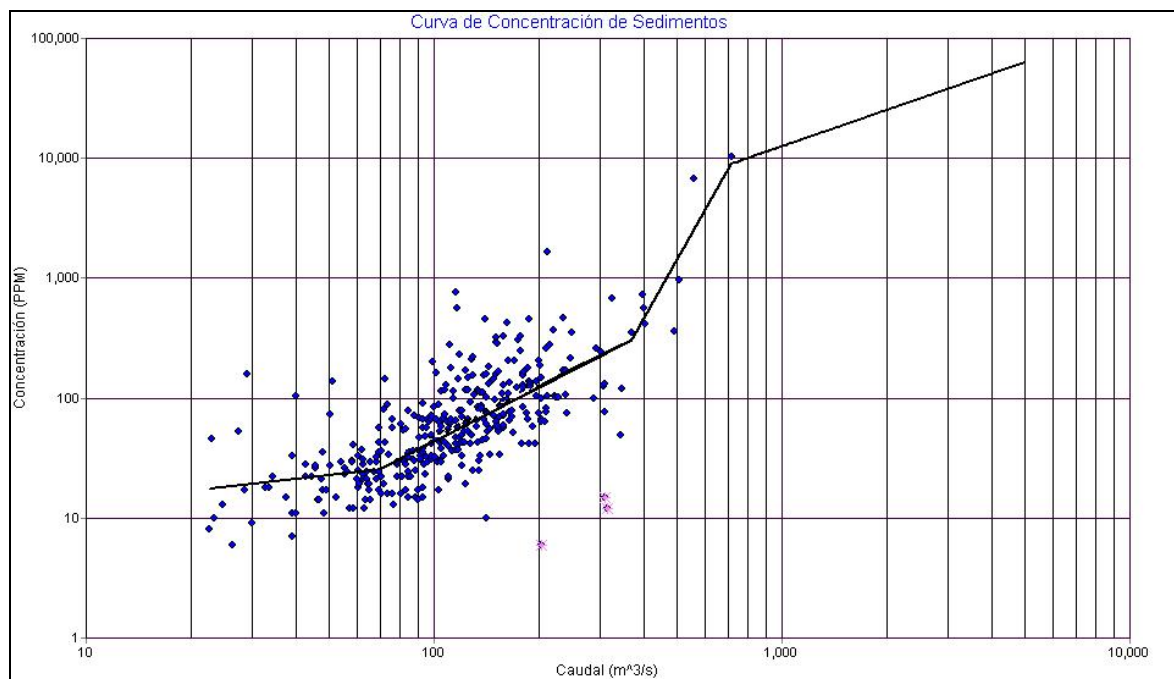
Estación 9-12 Pascua.

Como se mencionó antes, Pascua es la estación más cercana al sitio de presa Reventazón por lo que se considera que los sedimentos entrantes al futuro embalse son los que ésta reporte; además, luego de este sitio no se observan grandes aportes, solo algunas quebradas o ríos pequeños por lo que su contribución en sedimento, se puede ubicar dentro del margen de error de la estimación.

En el informe de pre factibilidad esta estación no se utilizó para la estimación del sedimento entrante ya que su cantidad y calidad de las muestras la ubicaban en una condición muy poco segura para la estimación de sedimentos. En la actualidad se mejoró un poco dicha condición sin llegar a ser tal que permita una clara certeza en la estimación (verde en adelante); no obstante, con las reservas del

caso se obtuvo la curva de sedimentos y se estimó la carga promedio anual, la cual muy probablemente esté subestimada. Seguidamente se presentan la curva de descarga y los resultados utilizando ésta, con la corrección por cálculo horario.

Figura 7.5.1.31.
Curva de descarga de sedimentos, estación 9-12 Pascua

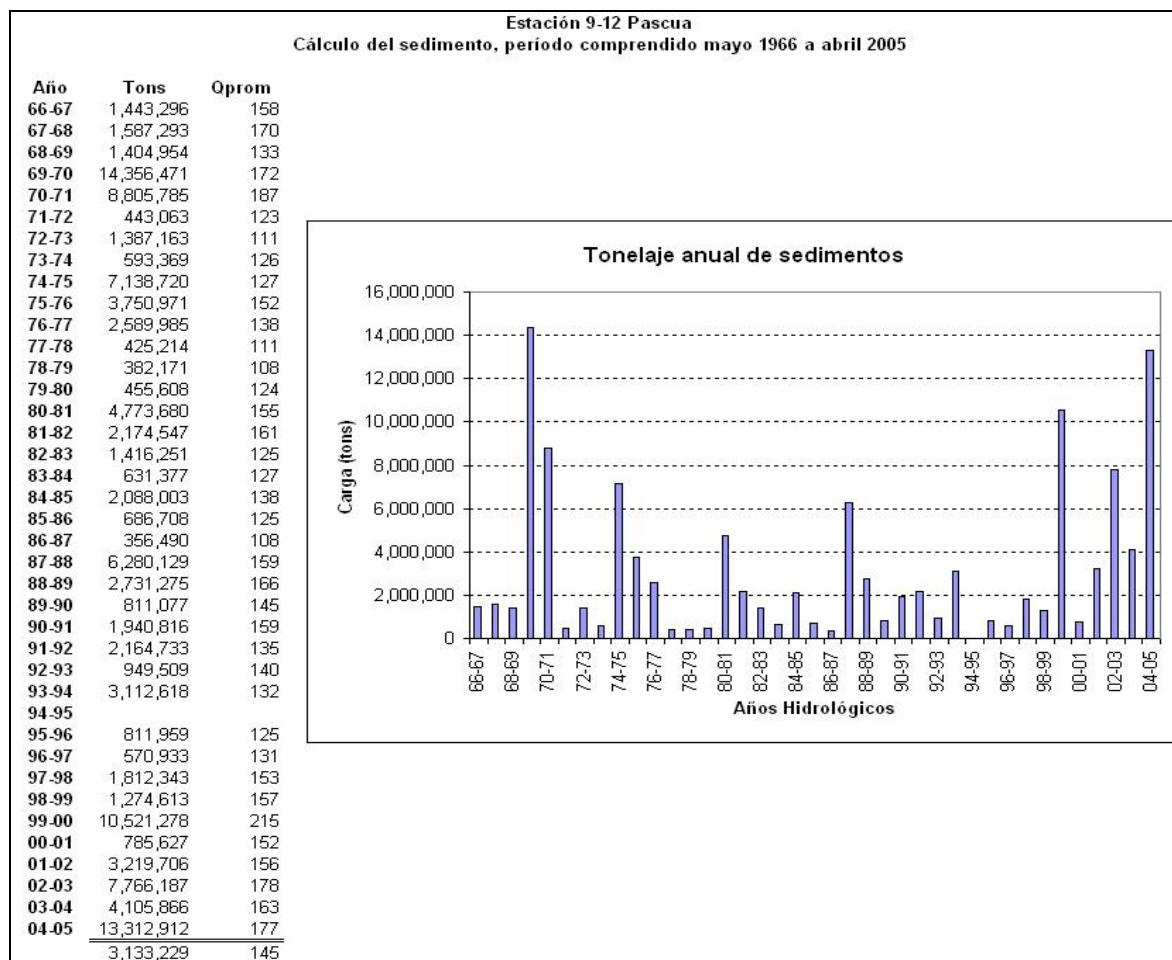


Las ecuaciones de las rectas de mejor ajuste son:

$PPM = 6.2853 * Q_{liq}^{0.32815}$	para $10 \leq Q_{liq} < 70$
$PPM = 0.044987 * Q_{liq}^{1.4922}$	para $70 \leq Q_{liq} < 350$
$PPM = 2.0892E-11 * Q_{liq}^{5.126}$	para $350 \leq Q_{liq} < 717$
$PPM = 12.633 * Q_{liq}$	para $717 \leq Q_{liq} < 5000$

De igual forma que para la estación 9-27, se utilizan los caudales promedio diario y se aplica una corrección para la consideración del cálculo horario propios de esta estación, de modo que se obtienen los siguientes tonelajes:

Figura 7.5.1.32.
Tonelajes obtenidos en la estación 9-12 Pascua



Estimación del tonelaje entrando al embalse.

Además de las condiciones que presenta la estación 9-12 Pascua, es necesario contemplar el efecto que producen los desembalses anuales de Cachí y Angostura en la estimación del material sólido que entra al embalse. Si bien es cierto que esta es una maniobra puntual en el tiempo (dura alrededor de dos y medio días), por la magnitud de lo que ha presentado históricamente debe contemplarse su efecto.

En la figura 7.5.1.32 se muestran los resultados obtenidos de los desembalses de Cachí y Angostura. Algunos aspectos de relevancia a tomar en cuenta:

1. Las mediciones realizadas con buen grado de exactitud (prácticamente continuas en el tiempo) se inician a partir de 1988.
2. De acuerdo a mediciones realizadas en otras estaciones fluviográficas, el efecto hacia aguas abajo del desembalse tiende a disminuir conforme se avanza río abajo. No obstante un estudio, realizado por estudiantes de doctorado de una universidad sueca sobre este tema, demostró que hasta la altura de la estación Pascua con las primeras lluvias que ocurran después del desembalse el material que se queda en las márgenes del río continúa su recorrido.

3. El embalse de Angostura comienza a trabajar desde el año 2000, esto implica un nuevo punto de retención de material, por lo que la información de la estación 9-03 Angostura en lugar de disminuirse en cuanto a la carga de material sólido detectado, aumenta.

Cuadro 7.5.1.11
Tonelajes históricos medidos en los desembalses.

<i>Evolución de la cantidad de sedimentos detectada en los desembalses de Cachi</i>			
Est. 9-10 El Congo		Est. 9-03 Angostura	
Año	Carga (Tons)	Año	Carga (Tons)
1973	NHIS	1973	
1974	411,400	1974	
1975	NHIS	1975	
1976	NO	1976	
1977	84,700	1977	
1978	NO	1978	
1979	NO	1979	
1980	24,500	1980	
1981	476,900	1981	
1982	386,300	1982	
1983	545,400	1983	
1984	665,500	1984	
1985	NHIS	1985	
1986	NO	1986	
1987	NHIS	1987	
1988	1,265,700	1988	
1989	482,200	1989	
1990	653,000	1990	
1991	NO	1991	
1992	132,900	1992	511,000
1993	948,000	1993	597,000
1994	29,392	1994	185,367
1995	1,263,257	1995	936,177
1996	852,800	1996	557,500
1997	NO	1997	
1998	829,425	1998	571,143
1999	1,531,643	1999	918,817
2000	457,962	2000	329,236
2001	441,060	2001	661,931
2002	822,570	2002	1,068,424
2003	1,266,100	2003	1,562,639
Prom	705,706		771,387
Prom*	901,143		905,557
Notas			
**	Mediciones parciales, o, cuestionables		
NO	No se hizo desembalse en ese año		
NHIS	No hay Información Suficiente		
Prom*	Promedios especiales según sea el caso		
★	Promedio del Congo desde el año 1988, sin considerar los datos cuestionados		
⌘	Promedio de Angostura desde el año 2000		

Considerando todo lo anterior, la estimación anual del tonelaje entrante al embalse es:
 $3,133,229.00 + 905,557.00 = 4,038,786.00$ que se puede redondear en **4 millones de toneladas anuales.**

7.5.2. Agua subterránea

En este trabajo se describen las principales unidades hidrogeológicas (incluyendo unidades acuíferas y no acuíferas) ubicadas en el área del proyecto. Así mismo se describen las principales unidades hidrogeológicas en el sitio de presa y se mencionan los valores promedio de la permeabilidad obtenida a partir de pruebas de agua a presión, lo que indica la facilidad del agua para pasar a través de la roca con ciertas presiones. Se presenta un mapa que muestra la profundidad del nivel freático en la zona de la presa y alrededores, donde se cuenta con mayor información a partir de perforaciones de investigación y galerías exploratorias, así como observaciones de elementos hidrogeológicos.

Por otro lado, se determina la susceptibilidad a la recarga potencial, utilizando una metodología que involucra el método DRASTIC modificado tomando en cuenta la densidad de drenaje, uso del suelo, tipo de suelo, pendiente del terreno y constitución de la zona vadosa. En el apartado de zonas de descarga, se incluye un mapa con la ubicación de manantiales ubicados en las cercanías de la presa y los manantiales principales que abastecen comunidades cercanas al proyecto. Se calcula la vulnerabilidad a la contaminación de las unidades hidrogeológicas en el área de la presa, túnel y casa de máquinas, siguiendo la metodología GOD, que toma en cuenta el grado de confinamiento hidráulico, ocurrencia del estrato suprayacente y profundidad al nivel del agua.

También se incluyen datos sobre las características químicas del agua de manantiales y de algunas quebradas ubicadas alrededor del sitio de presa, túnel y casa de máquinas. Además se incluyen gráficos que ilustran la variación de la concentración de elementos químicos mayores del agua del río Reventazón en el sitio denominado Florida desde diciembre del año 1999 hasta noviembre del año 2004.

Finalmente, pero no menos importante, se incluyen valores de concentración de iones mayores determinados a partir de muestras de agua provenientes de los acueductos Coco-Moravia, Siquirres (captación), Guayacán, San Antonio, Florida, La Alegría, Santa Marta y Bajo 52 Millas. Estos acueductos pertenecen a comunidades que se ubican a varios kilómetros de distancia y que no se verán afectadas por las obras del proyecto. Algunos de estos acueductos son vulnerables a la contaminación antropogénica y presentan condiciones de disponibilidad muy variables.

Con estos temas se pretende presentar un diagnóstico de las condiciones hidrogeológicas en el área de influencia directa del proyecto y de las condiciones en que se encuentran los acueductos que utilizan las comunidades alrededor del proyecto.

7.5.2.1. Principales unidades hidrogeológicas en el área del proyecto

Las unidades hidrogeológicas del área del proyecto tienen características hidrogeológicas variables, desde unidades de bajo rendimiento acuífero, considerados acuitardos o acuíclados, hasta unidades de alto rendimiento. En el mapa de unidades hidrogeológicas (figura 7.5.2.1) la unidad hidrogeológica Tuis se considera como un acuitardo debido a la presencia de lutitas y areniscas bien cementadas. La unidad hidrogeológica Uscari, está compuesta de lutitas intercaladas con areniscas calcáreas. Las lutitas forman un acuitardo y las areniscas calcáreas se consideran como un acuífero de moderado potencial en vista de la probable ocurrencia de karsismo. La unidad hidrogeológica caliza bioclástica se considera un acuífero de alto rendimiento. Por su parte la unidad Río Banano constituye un acuífero de moderado rendimiento. Estas unidades afloran en la zona del embalse del proyecto Reventazón, con mayor presencia en margen derecha, aunque en margen izquierda es posible mapearlas en menor extensión. Estas unidades están formadas por rocas sedimentarias estratificadas y en algunos casos plegadas. Considerando la extensión areal de estas unidades mencionadas y en vista de la ausencia de datos sobre sus propiedades hidrogeológicas, por ejemplo a partir de pruebas de bombeo, no es factible presentar valores de permeabilidad, solamente de manera relativa.

En el área de la presa es posible encontrar la unidad hidrogeológica Guayacán con un rendimiento moderado, constituida por lavas fracturadas separadas por capas de tobas de baja permeabilidad y constituyéndose en el basamento local, seguido por la unidad Suretka, considerado como un acuífero de moderado rendimiento, la unidad Doán, de pobre rendimiento, aunque cuando tiene fracturamiento puede conducir de manera notable la precipitación, y culminando la secuencia los aluviones y coluvios. Los aluviones forman acuíferos de menor extensión pero de buen rendimiento, dependiendo del grado de selección de las arenas y gravas. En margen izquierda es posible encontrar con mayor extensión y en buenos afloramientos la unidad de brechas y lavas recientes que constituye un acuífero de moderado rendimiento y los lahares que tienden a formar acuitardos. Por la magnitud de las obras que forman este proyecto, en el sitio de presa se han descrito con mayor detalle las unidades hidrogeológicas.