

Estudio de las pendientes de los planos de reptación, en laderas conformadas por coluviales, en la cuenca del río Negro, Morona Santiago, Ecuador

Study of the slopes of the creeping planes, on slopes made up of colluvial rocks, in the Negro River basin, Morona Santiago, Ecuador

Patricio Ochoa¹

¹ Colegio de Ingenieros Civiles del Azuay CICA. Cuenca – Ecuador. E-mail: ingeochoa@hotmail.com

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 26-11-2022

Fecha de aceptación: 13-04-2022

Resumen

La investigación se llevó a cabo en la cuenca del río Negro, cuyas laderas están conformadas por coluviones que experimentan reptación. El principal objetivo fue deducir una ley empírica para estimar la tangente del ángulo que forman los planos de movimiento de las masas con respecto al plano horizontal, bajo determinadas condiciones de precipitación y caudales del río Negro que fluye al pie de las laderas. Para esto, se estudiaron los movimientos de ladera mediante monitoreos topográficos semanales en 77 puntos ubicados en el terreno o mojones. Entre cada período de tiempo, se calculó la tangente del ángulo que forma el vector desplazamiento resultante de cada mojón con el plano horizontal, y su media aritmética. Mediante un gráfico de dispersión, se verificó que existe una proporcionalidad inversa de esta tangente con la precipitación y el caudal, lo que condujo a establecer la ley matemática para estimar las pendientes de los planos de reptación en función de estas variables. El modelo permitió establecer efectos en la fricción interna por la acción climática, y umbrales críticos de lluvia y caudal para inicio de procesos de flujo o avalancha.

Palabras clave:

Caudal, pendiente, precipitación, reptación.

Abstract:

The research was carried out in the Negro River basin, whose slopes are made up of colluvium that experience creep. The main objective was to deduce an empirical law to estimate the tangent of the angle formed by the planes of movement of the masses with respect to the horizontal plane, under certain precipitation conditions and flows of the Negro River that flows at the foot of the slopes. For this, the slope movements were studied through weekly topographic monitoring at 77 points located on the ground or landmarks. Between each period of time, the tangent of the angle formed by the displacement vector resulting from each milestone with the horizontal plane, and its arithmetic mean, were calculated. Using a scatter graph, it was verified that there is an inverse proportionality of this tangent with precipitation and flow, which led to establishing the mathematical law to estimate the slopes of the creeping planes based on these variables. The model made it possible to establish effects on internal friction due to climatic action, and critical thresholds for rainfall and flow for the initiation of flow or avalanche processes.

Keywords:

Flow, colluvial, slope, precipitation, creep.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la cuenca del río Negro, provincia de Morona Santiago, se llevó a cabo una investigación en la que se determinó una ley empírica para estimar la velocidad de reptación V en laderas de coluviales, obteniéndose como principal resultado la proporcionalidad directa de la velocidad con la precipitación media P y caudal medio Q del río Negro: $V \propto P^p Q^q$ [1]. La metodología consistió en: (1) Construcción de modelos geológicos definitivos a partir de estudios de sismica de refracción y ensayos de corte triaxiales y permeabilidad in situ de la matriz. (2) Monitoreos topográficos de la velocidad del suelo en 77 mojones ubicados en las laderas inestables. (3) Análisis estadístico de la relación entre la velocidad media observada V_o con la precipitación media y caudal medio del río Negro en los correspondientes periodos de tiempo y obtención de la ley.

Se investigaron seis zonas inestables, designadas mediante el posicionamiento de la tubería de conducción de la central HIDROSANBARTOLO, que aprovecha las aguas del río Negro para la generación de energía eléctrica (tabla 1).

Tabla 1. Zonas inestables investigadas (Tomada de la referencia [1]).

Zona No:	Abcisas
1	2+300 – 2+430
2	3+114 – 3+300
3	3+650 – 3+753
4	3+900 – 4+093
5	4+400 – 4+731
6	4+790 – 4+900
7	4+900 – 5+493

1.2 Naturaleza del problema investigado

En la zona de estudio se dan procesos gravitacionales de movimientos en masa. Hutchinson (1988) [2], realizó la siguiente clasificación en ocho grupos (A a H) (figura 1):

A	<p>Rebote</p> <p>1. Movimientos asociados con excavaciones antrópicas.</p> <p>2. Movimientos asociados con erosión de valles.</p>
B	<p>Creep</p> <p>1. Superficial, predominantemente estacional.</p> <p>2. Profundo, continuo o de masa.</p> <p>3. Prefalla o creep progresivo.</p> <p>4. Posfalla.</p>
C	<p>Hundimientos profundos de laderas de montañas.</p> <p>1. Asociados con la etapa inicial de un deslizamiento.</p>

	<p>2. Asociados con la etapa inicial de deslizamientos dobles que permiten la expansión y el hundimiento en el centro de la montaña.</p> <p>3. Asociados con volcamiento múltiple.</p>
D	<p>Deslizamientos.</p> <p>1. Fallas confinadas en taludes: naturales y hechos por el hombre.</p> <p>2. Rotacionales: único, sucesivo y múltiple.</p> <p>3. Compuestos: liberado por cizallamiento interno en materiales moderadamente frágiles o muy frágiles y con mecanismo progresivo.</p> <p>4. Traslacionales: láminas, lajas, turba, rocas (planar, escalonado, cuña), detritos y fallas por propagación repentina.</p>
E	<p>Movimientos de detritos del tipo flujo.</p> <p>1. Flujo de lodo (no periglacial).</p> <p>2. Flujo de lodo periglacial (gelifluxión de arcillas).</p> <p>3. Deslizamientos tipo flujo (Flowslide).</p> <p>4. Flujos de detritos.</p> <p>5. Avalanchas de rocas (Sturzstroms).</p>
F	<p>Volcamientos</p> <p>1. Delimitados por discontinuidades preexistentes.</p> <p>2. Liberados por fallas de tensión en la parte superior de una masa.</p>
G	<p>Caídas</p> <p>1. Primaria, que involucra la roca desalojada inicialmente (rocas y suelos).</p> <p>2. Secundaria, involucra el material caído previamente, que se desprende desde otro sitio.</p>
H	<p>Movimientos complejos de taludes</p> <p>1. Combaduras y pandeos o abultamientos de valles</p> <p>2. Movimientos de laderas del tipo Bloque.</p> <p>3. Acanalados o farallones de arcilla abandonados.</p> <p>4. Deslizamientos que irrumpen en la pata de deslizamientos de lodo o flujos.</p> <p>5. Deslizamientos causados por erosión asociada a filtración.</p> <p>6. Deslizamientos en varios niveles.</p> <p>7. Deslizamientos de varios pisos.</p>

Figura 1. Clasificación de Hutchinson (1988) [2].

Los movimientos en masa estudiados son extremadamente lentos, perceptibles solo mediante mediciones durante períodos prolongados de tiempo. Atendiendo a esto, en los coluviones de la zona de estudio, los movimientos en masa se clasifican como “Creep” profundo o de masa. Se producen sobre superficies con variadas pendientes, las cuales cambian con el tiempo, debido a factores desencadenantes, como la precipitación y el caudal erosivo del río Negro, que erosiona el pie de las laderas.

En el proceso de movimiento de las masas, para un determinado período de tiempo, el material se desplaza una cierta distancia colina abajo, con una pendiente determinada en ese período.

Se ha observado en las laderas la formación de lomas, abultamientos o montículos de material, que sugieren que los movimientos en ciertos períodos se dan con pendientes ascendentes, que pueden ser causados por el choque o interacción con masas más duras y competentes, que se encuentran inmersas en masas menos competentes. En movimientos en masa, al darse la interacción con un obstáculo, la energía cinética

disminuye, y se transforma en energía potencial, presentándose elevaciones en la superficie, que son proporcionales a la velocidad de la masa [3]. Una vez vencida la resistencia, la masa adopta un movimiento descendente pendiente abajo.

Cabe señalar que los movimientos lentos descendentes o subsidencia, suelen darse también como consecuencia del colapso estructural de la bóveda de una cavidad subterránea [4], que por lo general se da de manera puntual, por ello la pendiente de reptación puede no presentar una distribución uniforme en la extensión de la ladera.

1.3 Contexto geológico

En la cuenca del río Negro, las laderas están conformadas por coluviales, que se componen de rocas metamórficas como pizarras y cuarcitas, con alteración media a alta. La zona de estudio se sitúa en el frente subandino, en donde un sistema de fallas de cabalgamiento pone en contacto a rocas metamórficas jurásicas con los sedimentos cretácicos más recientes de la Cuenca Oriente. Este sistema de fallas ha ocasionado que el basamento rocoso, se encuentre cizallado y muy fracturado, por lo que su resistencia es muy baja, particularmente en los niveles superficiales en los cuales la roca está descomprimida y alterada [5]. El tipo de fallamiento, se da a causa del avance lento de la placa oceánica hacia la continental, lo que ha provocado cizalladuras en el basamento rocoso y alteración de las rocas de media a alta. Se da la presencia de grietas de tracción y elevado fracturamiento del basamento rocoso, que facilita la infiltración del agua hasta grandes profundidades en la masa del suelo. La región se halla en el frente subandino, mayormente afectada por este tipo de fallas. La figura A1 del apartado ANEXOS, muestra las unidades geológicas que componen las laderas [1]. La figura A2 del apartado ANEXOS, expone un corte geológico, en donde se presentan los espesores de las principales litologías de la zona de estudio.

Las masas al reptar, adoptan una determinada pendiente. Si esta es muy pronunciada, estarán involucradas fuerzas gravitacionales cuya dirección se oriente hacia los estratos más profundos y competentes, generando fuerzas de fricción retardadoras del movimiento. Por otro lado, una pendiente muy baja, implicará fuerzas movilizadoras orientadas según planos menos inclinados, alejados de los estratos competentes. Como consecuencia de esto, las fuerzas retardadoras serán de menor magnitud. Los estratos más competentes se hallan a profundidades de entre 15 a 20 metros (figura A2).

La figura 2 corresponde al perfil de la zona inestable No. 6 (4+790 – 4+900), y presenta en forma esquemática, las

posibles interacciones entre la masa reptante y el estrato de roca competente de velocidad de onda “S” 3000 m/s, de la formación Napo Deformada.

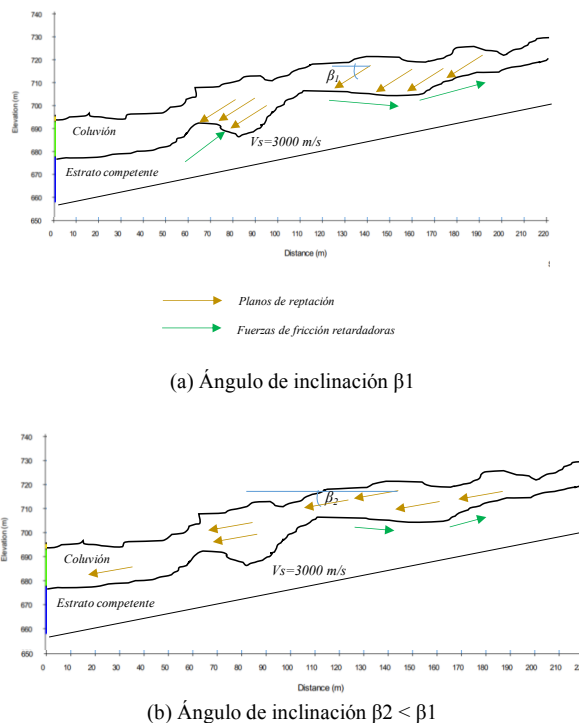


Figura 2. Reptación según planos con variación del ángulo de inclinación.

1.4 Hipótesis fundamental para el modelo

La pendiente de los movimientos en masa en coluviales, está en relación inversa a la precipitación P y al caudal del río Negro Q .

$$\tan\beta \propto 1/(PQ)^b$$

La potencia b , se establece para reflejar el efecto de la disminución brusca de $\tan\beta$ al producirse rupturas luego de la interacción entre las masas en su avance colina abajo.

La figura 3 muestra el diagrama de fuerzas sobre una masa en movimiento sobre planos que forman un ángulo β con el plano horizontal, y la fuerza movilizadora F con la misma inclinación, en virtud de la segunda ley de la dinámica.

Las componentes normales $N1$ y $N2$ disminuyen cuando $\beta1$ disminuye a $\beta2$. Las fuerzas de fricción f entre la masa movible y el estrato firme son proporcionales a las normales, en virtud de las leyes de la física, luego: $f2 < f1$, que da como resultado un aumento en la velocidad de la masa, que, a su vez, aumenta conforme se incrementan la precipitación y el caudal del río Negro.

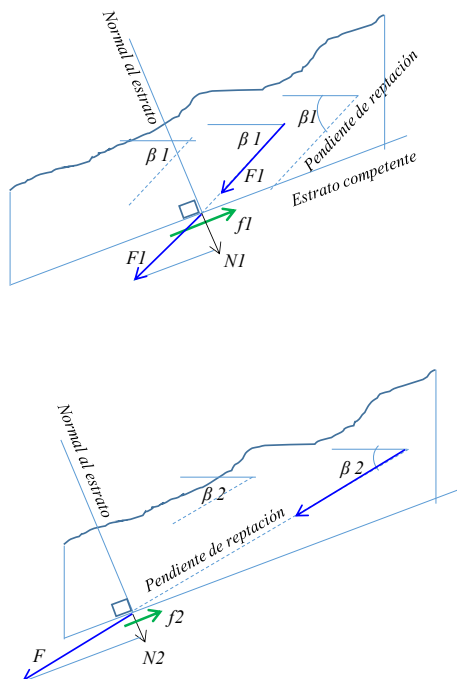


Figura 3. Diagrama de fuerzas.

En consecuencia, las disminuciones del ángulo β , se corresponderán con aumentos de la velocidad de reptación de las masas, lo cual se da a medida que aumentan la precipitación media y el caudal medio del río Negro [1]. La interacción continua de las masas, produce acumulación de material, orientando los fragmentos de suelo hacia la superficie, causando la disminución del ángulo β .

A causa de la heterogeneidad que presentan los coluviones, la determinación real de la inclinación de los planos de reptación, se vuelve muy compleja mediante métodos puramente teóricos, ya que los macizos rocosos presentan varias discontinuidades llenas de material, que pueden o no tener la misma composición mineralógica [5]. Este relleno puede ser material detrítico o hendidura de movimientos de cizallamiento pasados, o material depositado en diaclasas abiertas como resultado del movimiento del agua a través del macizo rocoso [5].

El efecto que tienen las diaclasas rellenas sobre la permeabilidad del macizo rocoso es de gran importancia. La permeabilidad de la arcilla y material de relleno en juntas similares, puede ser de tres o cuatro órdenes de magnitud inferior a la del macizo rocoso circundante [6], y esto puede dar lugar a una acumulación de agua subterránea en compartimentos dentro de la masa rocosa. Esto causa que la humedad se mantenga en profundidades considerables, aumentando la expansión de la masa, con la consecuente disminución del ángulo de las superficies de movimiento.

1.5 Heterogeneidad de las masas

Se realizaron interpretaciones de capas por tomografía sísmica en seis de las zonas investigadas (figura A3 del apartado ANEXOS). Del análisis global de los gráficos, se aprecia que existen zonas de mayor velocidad sísmica dentro de materiales menos competentes. Esto ocasiona que se den continuas interacciones con masas más resistentes, que producen acumulaciones de material. Como consecuencia, se presentan movimientos de elevación debido a la disminución de la energía cinética, que se transforma en energía potencial [3].

Por lo general, las laderas adoptan pendientes naturales cercanas al equilibrio, y ante el cambio de condiciones climáticas, su morfología se modifica, buscando un nuevo equilibrio [7]. En este contexto, los movimientos de ladera pueden entenderse como un reajuste de la pendiente del terreno, para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones [7].

1.6 La huella de las superficies de movimiento

Se observaron huellas de las superficies de los movimientos en masa en varias zonas inestables:



Figura 4. Huella de movimiento de ladera en talud. Zona No 6.



Figura 5. Huella de movimiento de ladera en talud. Zona No 5.

En algunas zonas, se observaron huellas de los planos a poca profundidad, en el talud (figuras 3 y 4). Otras huellas fueron observadas luego de practicar excavaciones, a profundidades entre 4 y 7 metros.



Figura 6. Huella de movimiento de ladera a 5 metros de profundidad. Zona 5.



Figura 7. Huella de movimiento de ladera a 4 metros de profundidad. Zona 1.

La pendiente de los planos de reptación viene dada por la tangente del ángulo β . Mientras mayor sea β , mayor será su tangente.

La importancia para estimar las pendientes de reptación, radica en establecer métodos para estimar espesores de las masas reptantes. Conocida su superficie, permitirá estimar el volumen y peso de la masa que se moviliza bajo la influencia de los agentes hidrometeorológicos, y las acciones que ejercerá el terreno sobre estructuras ubicadas ladera abajo. En otro aspecto, facilitará el proyecto de estructuras como pantallas filtrantes y subdrenes, que abarquen uno o más planos de movimiento, para conseguir drenar el agua y dar un soporte a las masas. Se podrán estimar las fuerzas actuantes en los procesos de reptación.

El resultado más importante del modelo desarrollado fue establecer que a mayores precipitaciones y caudales, las pendientes de reptación designadas por $\tan\beta$ son menores, y a causa de esto, se darán velocidades de reptación mayores, por lo que existe una relación inversa entre la velocidad y la pendiente de los planos de reptación.

Los movimientos en masa se dan por procesos de deterioro como: agrietamientos por tensión, deformación por concentración de esfuerzos y fatiga, expansión y contracción, que se presentan previo al deslizamiento o falla catastrófica [3].

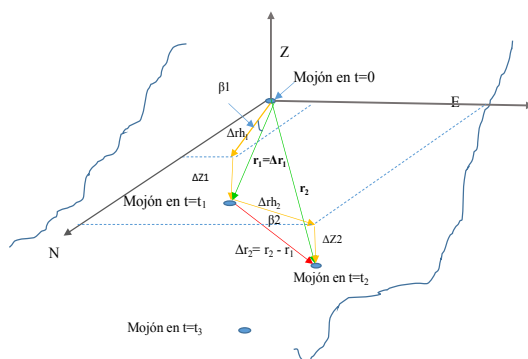


Figura 8: Análisis vectorial del movimiento de un mojón.

1.7 Objetivo y alcance

Deducir una ley que exprese la pendiente del plano de reptación en función de dos variables fundamentales: precipitación y caudales fluviales medios.

El modelo obtenido será aplicable a laderas de coluviones en cuencas hidrográficas, que experimenten movimientos en masa del tipo reptación o “creep”, con base en la clasificación establecida por Hutchinson (figura 1), y bajo la influencia de las precipitaciones y caudales de corrientes fluviales que socavan la base.

2. METODOLOGÍA

Se realizaron tomas de coordenadas topográficas sobre 77 mojones instalados en las laderas inestables de la cuenca. Los BM's de partida se localizaron en puntos fijos (afloramientos de roca). Los mojones se fabricaron con hormigón, en moldes cilíndricos de altura 30 cm y diámetro 15 cm. Las figuras A5 a la A9 del apartado Anexos, presentan el plano de ubicación de los mojones y ubicación de grietas. Las tomas de coordenadas topográficas se realizaron en varias fechas, desde agosto 2016 hasta noviembre 2019. Se eligieron sitios de baja pendiente y alejados de los bordes de quebradas, de manera que las lecturas de coordenadas no se vean afectadas por derrumbes locales o perturbaciones ajenas a los procesos de reptación. La figura 9 muestra el esquema del movimiento de un mojón y los vectores posición y desplazamiento en dos fechas sucesivas t_1 y t_2 del mismo:

Si (E_1, N_1, Z_1) y (E_2, N_2, Z_2) representan las coordenadas en metros para las fechas t_1 y t_2 :

La magnitud de la posición del mojón en cm viene dada por

$$|\Delta r| = 100\sqrt{(E_2 - E_1)^2 + (N_2 - N_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (1)$$

La magnitud de la componente de este vector en el plano horizontal (E, N) viene dada por:

$$|\Delta r|_h = 100\sqrt{(E_2 - E_1)^2 + (N_2 - N_1)^2} \quad (2)$$

El cociente entre el desplazamiento vertical $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ que experimenta el mojón y el desplazamiento dado por (2), es igual a la tangente del ángulo β , que forma la componente horizontal con el vector desplazamiento Δr :

$$\tan\beta_i = \frac{\Delta Z}{|\Delta r|_h} \quad (3)$$

Como ejemplo explicativo, en las tablas 2 y 3 se presenta el cálculo de la tangente de β para los mojones 2 y 3 de la zona inestable No 3, en el periodo 2 agosto a 11 octubre 2016:

Tabla 2. Tangente de β . Mojón 2. Zona 3.

Fecha	t (d)	$ \Delta r _h$ (cm)	ΔZ (cm)	$\tan\beta_2$
2016-08-02	0	0.00	0.00	-
2016-08-10	8	9.848	-0.600	-0.0609
2016-08-15	13	3.601	1.900	0.5276
2016-08-29	27	13.771	-0.300	-0.0218
2016-09-16	45	8.868	1.100	0.1240
2016-09-29	58	11.895	1.300	0.1093
2016-10-11	70	10.310	1.800	0.1746

Tabla 3. Tangente de β . Mojón 3. Zona 3.

Fecha	t (d)	$ \Delta r _h$ (cm)	ΔZ (cm)	$\tan\beta_3$
2016-08-02	0	0.00	0.00	-
2016-08-10	8	0.900	-0.700	-0.7778
2016-08-15	13	0.728	1.100	1.5110
2016-08-29	27	1.237	-1.400	-1.1318
2016-09-16	45	2.807	-1.100	-0.3919
2016-09-29	58	3.178	-0.200	-0.0629
2016-10-11	70	0.728	0.400	0.5494

El valor observado de la tangente de beta entre dos fechas de medición $\tan\beta_o$, se define como la media aritmética de las tangentes calculadas para cada mojón, en una zona específica:

$$\tan\beta_o = \frac{\sum_{i=1}^l (\tan\beta_i)}{l} \quad (4)$$

En donde l = número de mojones (del inglés landmarks). El valor dado por (4), representa la pendiente promedio del plano según el cual la masa rept. Mediante la aplicación de (4), para la zona 3, $\tan\beta_o = 0.47$, en el período 10 a 15 de agosto 2016.

Con base en registros diarios pluviométricos, proporcionados por la central HIDROSANBARTOLO, se calculó la precipitación media entre cada fecha de medición, como el área bajo la curva precipitación frente al tiempo en el período, dividida para el respectivo intervalo de tiempo. Por ejemplo, para el período 10 a 15 de agosto 2016, de la gráfica figura 10, el área bajo la curva es 57 mm. d, $\Delta t = 5$ d, de donde la precipitación media en ese período es igual a $57 / 5 = 11.4$ mm.

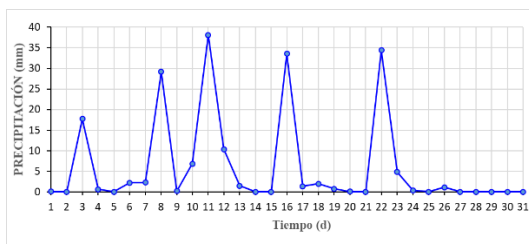


Figura 9. Registro de precipitación. Agosto 2016.

De manera similar, se calculó el caudal medio en los períodos de control de mojoneros. Por ejemplo, en el período ya señalado, el área bajo la curva caudal frente al tiempo (figura 11) es 1077.84 d. m³/s, luego el caudal medio fue igual a $1077.84 / 5 = 215.57$ m³/s.

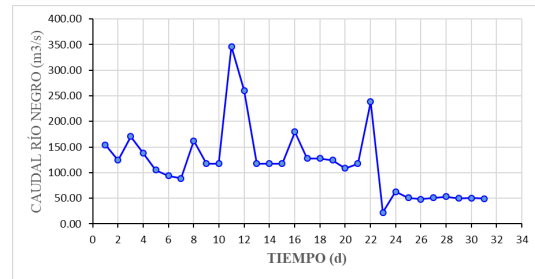


Figura 10. Registro diario de caudales del río Negro. Agosto 2016.

Se establece entonces, que entre el 10 al 15 de agosto 2016, el plano de reptación en la zona 3 tuvo la pendiente media de 0.47, para una precipitación media de 11.4 mm y un caudal medio del río Negro, de 215.57 m³/s.

2.1 Fundamento matemático para la ley

Por la hipótesis establecida, existe una proporcionalidad inversa entre la tangente de β y la velocidad de reptación V , que matemáticamente se puede expresar por:

$$\tan\beta \propto \frac{1}{V} \quad (5)$$

A su vez, la velocidad V es proporcional al caudal medio del río Negro Q y a la precipitación media P [1]:

$$V \propto PQ \quad (6)$$

Combinando (5) y (6), la ley a determinar se puede expresar como la relación inversa entre la pendiente y alguna potencia b del producto PQ :

$$\tan\beta \propto \frac{1}{(PQ)^b} \quad (7)$$

La potencia b se emplea para generalizar la ley, a causa de rupturas repentinas por la interacción entre masas móviles. Necesariamente no debe ser igual a la unidad. El análisis de los datos permitirá establecer su valor.

2.2 Características topográficas y geotécnicas.

El mapa de pendientes de la figura A4 del apartado ANEXOS, expone la variabilidad del relieve de las laderas de la cuenca, con cambios bruscos en pequeñas extensiones. A partir de los mapas topográficos (figuras A5 a A8), se determinó la pendiente y el área en planta de cada zona investigada (tabla 4). Se realizaron ensayos triaxiales no drenados para determinar parámetros de corte del suelo (tabla 5).

Tabla 4. Pendiente y área de zonas inestables.

Zona No.	Pendiente <i>j</i> (m/m)	Área A (m ²)
1: 2+300 – 2+430	0.238	326 387
2: 3+114 – 3+300	0.203	257 200
3: 3+650 – 3+753	0.261	228 500
4: 3+900 – 4+093	0.235	302 500
5: 4+400 – 4+731	0.156	518 100
6: 4+790 – 4+900	0.184	395 600
7: 4+900 – 5+493.	0.197	350 400

El área, corresponde a la región delimitada por los escarpes, representados con línea de color verde (mapas topográficos figuras A5 a A8).

Las características topográficas serán de utilidad para establecer criterios de validez, en la aplicación de la ley a ser obtenida, para laderas de coluviones, ya que se establecerá la ley para regiones que presenten determinadas pendientes y extensiones.

La pendiente de cada zona se calculó ponderando entre la longitud de las trayectorias ortogonales a las grietas de tracción, que definen el sentido de descompresión de las masas. Por ejemplo, para la zona 2: Se pueden establecer dos direcciones de movimientos (figura A8): La primera de longitud 648.96 metros entre las elevaciones 865 y 760 msnm, con pendiente $j_1 = 105 / 648.96 = 0.162$. La segunda, de longitud 630.74 metros entre las elevaciones 760 a 606 msnm con pendiente $j_2 = 154 / 630.74 = 0.244$. La pendiente media ponderada en la longitud total es:

$$j = \frac{0.162 \times 648.93 + 0.244 \times 630.74}{1279.70} = 0.203$$

Los parámetros de resistencia al corte se muestran en la tabla 5 (ensayos triaxiales no drenados):

Tabla 5. Parámetros de resistencia al corte de la matriz del coluvión.

Zona No	Cohesión C (kN/m ²)	ϕ°
1	33.00	12.02
2	27.00	3.05
3	75.00	19.60
4	60.00	16.37
5	90.99	4.13
6	60.00	16.37
7	33.00	12.02

La permeabilidad se determinó in situ, mediante el método Lefranc [8]. Su valor es de utilidad para caracterizar los procesos de reptación, que obedecen, entre otros factores, a condiciones de humedad suficientes para modificar el contenido de agua en el terreno [7], que generan procesos de expansión y contracción del suelo, modificando la pendiente de los movimientos [9]. Los ensayos de permeabilidad se efectuaron en cuatro puntos de cada zona inestable.

Tabla 6. Permeabilidad de la matriz del coluvión.

Zona No	<i>k</i> (m/s)
1	1.01 x10 ⁻³
2	6.30 x10 ⁻⁴
3	2.44 x10 ⁻⁴
4	7.00 x10 ⁻⁴
5	8.0 x10 ⁻⁴
6	3.30 x10 ⁻⁴
7	9.00 x10 ⁻⁴

3. RESULTADOS

Los valores observados de la tangente de beta se designaron por $\tan\beta_0$, y se presentan para cada zona inestable en las figuras A10 a A13. Se registraron estos valores para cada zona junto con los datos de precipitación media que se designaron por *P* en mm y caudales medios del río Negro designados por *Q* en m³/s, en los respectivos periodos. Se calculó el producto *PQ*, el cual se registró en la columna a la derecha. La figura 11 presenta la atenuación de $\tan\beta_0$ cuando al producto *PQ* aumenta, lo que concuerda con la hipótesis planteada:

$$\tan\beta \propto 1/(PQ)^b$$

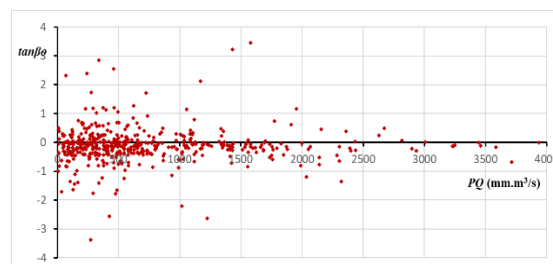


Figura 11. Tangente de β_0 frente al producto *PQ*

La nube de puntos obtenida resultó muy dispersa, debido a la heterogeneidad de las masas de suelo (interacciones continuas de masas blandas inmersas en masas competentes). Para obtener una función de ajuste de tipo potencial, se calcularon los promedios de $\tan\beta_0$ en intervalos de 50 unidades del producto *PQ*, y se realizó la gráfica de los valores absolutos de $\tan\beta_0$ frente al producto *PQ*:

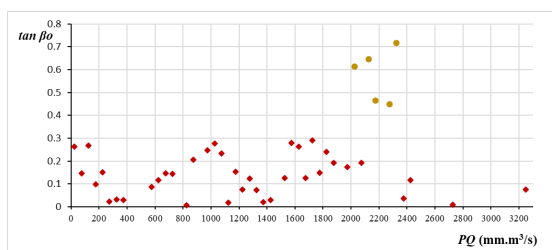


Figura 12. Valores absolutos de $\tan\beta$ frente al producto PQ

En el análisis presentado de los datos, los puntos color marrón, se consideraron atípicos, pues se corresponden al promedio entre períodos de intervención de maquinaria para la ejecución de obras en las laderas, lo que causó perturbaciones en los mojones. Un dato atípico no se debe eliminar, a menos que se tenga seguridad de que se trata de un error [10]. En este caso, se observaron estos datos atípicos, que se identificaron por estar muy separados de la nube de puntos, que constituye el cuerpo principal de datos [10].

Se observa que para $0 < PQ < 1600$, se dan aumentos y disminuciones de $\tan\beta$: *Las disminuciones corresponden a aceleración de las masas, y los aumentos, a disminución de la velocidad por acumulación de energía, debida a la interacción con masas más competentes, mientras que para $PQ > 1600$, se da una atenuación continua de $\tan\beta$.*

El modelo matemático se plantea estableciendo una ley para cada uno de los intervalos antes descritos, como sigue:

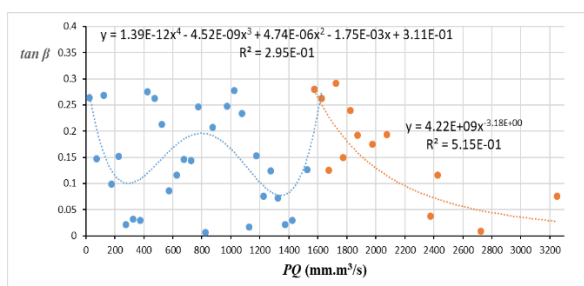


Figura 13. Funciones de ajuste para el modelo

Si $0 < PQ < 1600$:

$$\tan\beta = 1.39x10^{-12}(PQ)^4 - 5.52x10^{-9}(PQ)^3 + 4.74x10^{-6}(PQ)^2 - 1.75x10^{-3}(PQ) + 0.311 \quad (8)$$

$$R^2=0.296$$

Si $PQ > 1600$:

$$\tan\beta = \frac{4.22x10^9}{(PQ)^{3.18}} \quad (9)$$

$$R^2=0.515$$

La ley expresada por (8) refleja las interacciones con bloques y masas competentes en el proceso de avance del coluvial. Las figuras A2 y A3 permiten entender que el

proceso es debido la heterogeneidad de la masa. La figura A2 indica espesores del coluvión de hasta 20 metros, en donde se producen estos cambios de pendiente.

En (9), el coeficiente $4.22x10^9$ tiene dimensiones $mm^3 \cdot s^{-3.18} m^{9.54} s^{-3.18}$, pues $\tan\beta$ es adimensional. La expresión establece la proporcionalidad inversa entre pendiente y las variables P y Q , a partir de $PQ=1600$.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Los procesos gravitacionales de movimientos en masa en coluviales, se producen sobre superficies cuya pendiente depende de la precipitación y del caudal fluvial de ríos que socavan la base.

Para $PQ > 1600$, la hipótesis planteada: $\tan\beta \propto 1/PQ$, se verificó para el producto PQ elevado a la potencia 3.18, y factor de proporcionalidad igual a 4.22×10^9 .

Las leyes obtenidas son aplicables en laderas conformadas por coluviones, con matriz limo arcillosa, cuyo ángulo de fricción interna sea menor a 37° , la extensión sea mayor a $228\,500\,m^2$ y menor a $518\,100\,m^2$ (Tabla 4), con una permeabilidad promedio de $6.6 \times 10^{-4} m/s$ (Tabla 6).

El modelo propuesto por (4) y (5), demuestra que las superficies de movimientos en masa pueden llegar a adoptar pendientes muy bajas cuando $PQ > 1600$, valor a partir del cual se da el mayor riesgo de que se produzcan flujos o avalanchas, debido a la disminución, de las componentes verticales de las fuerzas movilizadoras de las masas, y a la disminución de la fricción a causa de la humedad.

El poder predictivo de las leyes expresadas mediante (8) y (9) es del 30 % y 51 % respectivamente, que representan un ajuste moderado. El poder de predicción se ve afectado por la heterogeneidad de las masas (figura A3).

El producto $PQ = 1600$, representa un umbral, que define el inicio de un aumento paulatino en la velocidad, debido a la disminución continua de $\tan\beta$. *Las masas fluyen sobre planos cada vez más horizontales: disminuyen las componentes normales N , y la fuerza de fricción entre las capas de contacto.*

Según (8), para $PQ=0$, la pendiente de reptación es igual a 0.311, que representa una inclinación independiente de las variables hidrometeorológicas. Se puede interpretar como la inclinación generalizada del relieve debido a los procesos gravitacionales de la región. En efecto, de la tabla 4: las laderas de la cuenca tienen pendientes naturales que van de 0.158 a 0.238.

En suelos, la tangente del ángulo de fricción interna representa el coeficiente de fricción entre las partículas sólidas. La zona 2 se conforma de matriz con el menor ángulo de fricción interna $\phi=3.05^\circ$, siendo $\tan\phi=0.0532$. En la región, durante el período de estudio, se registró: $(PQ)_{max}=4000$. De (9): $\tan\beta=0.015$. El modelo constituye un medio para verificar como se ve disminuida la fricción bajo la acción de lluvias y caudales fluviales.

La acumulación de masas se produce por una disminución de la energía cinética, con aumento de la energía potencial, que se traduce en una sobre elevación del relieve del suelo. Esto se da para valores de PQ menores a 1600. Las masas, al tender a recuperar su pendiente natural, experimentan nuevamente reptación.

4.2 RECOMENDACIONES

Es recomendable mantener un buen sistema de drenaje superficial y subdrenaje de las aguas subterráneas. Canalizar las aguas superficiales, y realizar cobertura con geosintéticos, especialmente en los sitios donde las grietas de tracción interceptan los cursos de agua natural, que son zonas de mayor infiltración. Esto permitirá disminuir la infiltración y evitar la disminución de la fricción interna a causa de la humedad.

El aumento de la fricción se puede conseguir con la construcción de pantallas filtrantes con rocas, en varios niveles de las laderas, con revestimiento de geotextil en el talud. La fricción entre la superficie de los taludes y las rocas, de las pantallas, provocará una mayor orientación de los planos hacia abajo, logrando disminuir el riesgo de flujo o avalanchas. También actuarían como filtro permitiendo evacuar el agua de los taludes.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Ochoa Patricio (2002). Estudio de la Velocidad de reptación de Depósitos Coluviales mediante el Análisis Dimensional, en la cuenca del Río Negro, Morona Santiago - Ecuador. GEOLATITUD.
- [2] Montero Juan, Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [3] Suárez Jaime, Deslizamientos. Análisis geotécnico. (1era ed.). Universidad de Santander 2009.
- [4] H. Rivera Mantilla, Geología general. (2da ed.). Lima. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2005.
- [5] GEODINÁMICA. Estudio geológico - geotécnico y diagnóstico de los procesos de inestabilidad a lo largo de la conducción. Proyecto hidroeléctrico HIDROSANBARTOLO. Quito, 2017.

[6] United States Department of Agriculture, Slope Stability Reference. Guide for National Forests in the United States (volumen II.). Washington, 1994.

[7] de Vallejo L. I. Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson. Prentice Hall, 2004.

[8]. Juan Manuel López Marinas (2002). Geología aplicada a la Ingeniería Civil. (2da ed.). Madrid. DOSSAT 2000, pág. 161 – 162.

[9] Tarbuck y Lutgens, Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. (8ava ed.). Madrid: Pearson. Prentice Hall, 2005.

[10] Navidi, W, Estadística para Ingenieros y Científicos, México: Mc Graw Hill, 2006.

ANEXOS

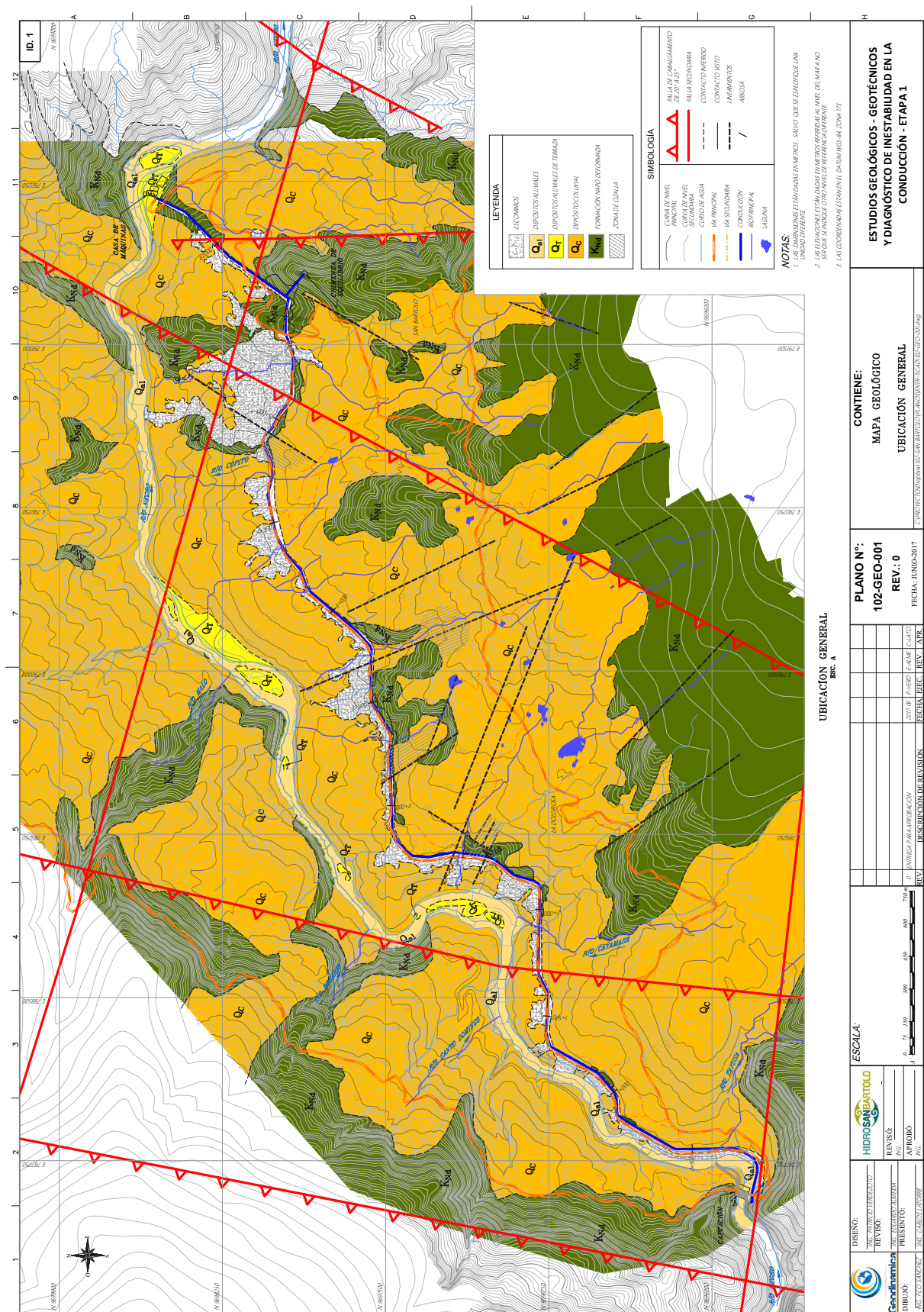


Figura A1. Marco geológico regional (FUENTE: HIDROSANBATOLO). (Tomada de referencia [1]).

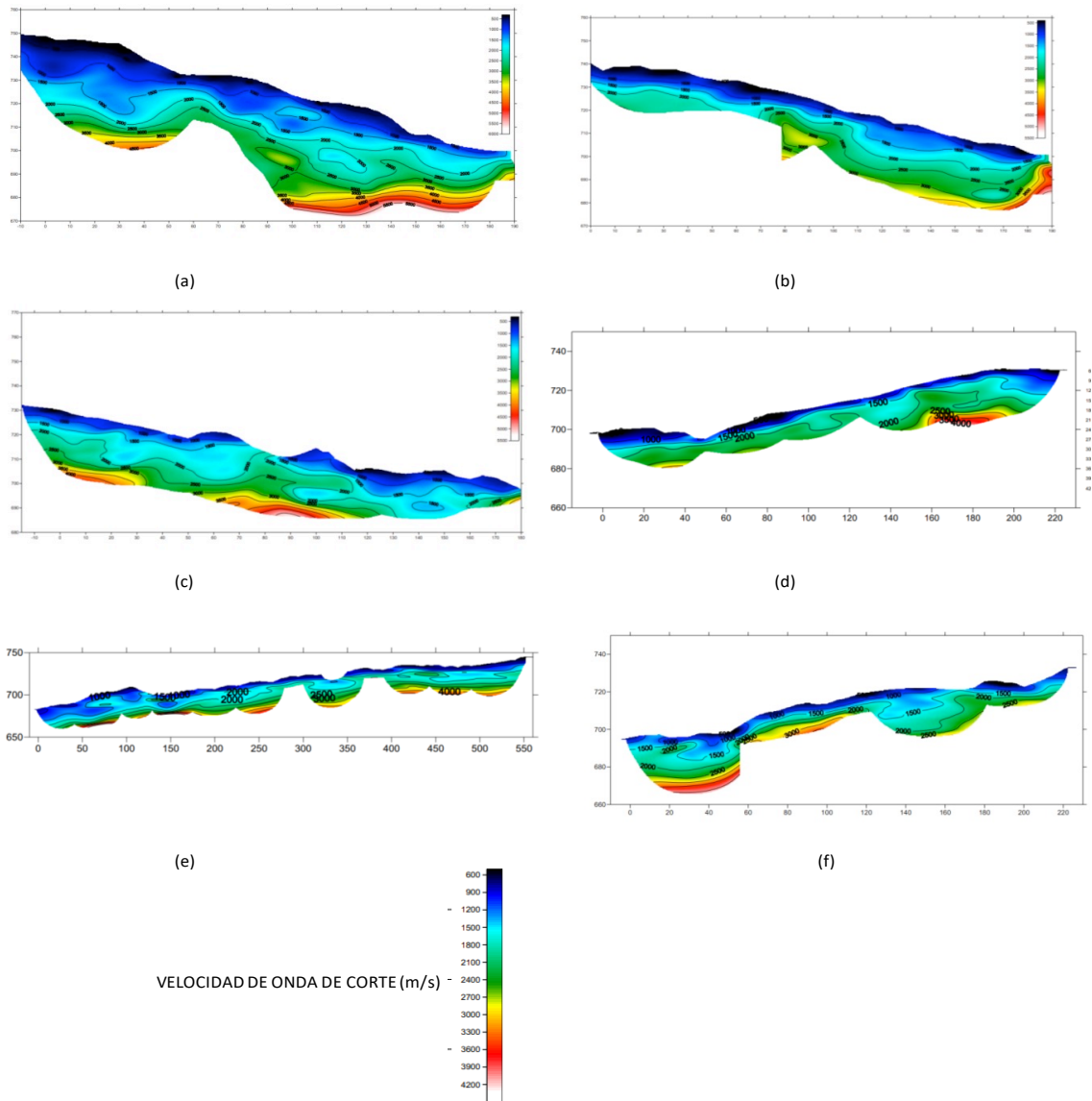


Figura A3. Interpretación de capas por tomografía sísmica: (a) Zona 1. (b) Zona 2. (c) Zona 3. (d) Zona 4. (e) Zona 5. (f) Zona 6. (FUENTE: HIDROSANBARTOLO).

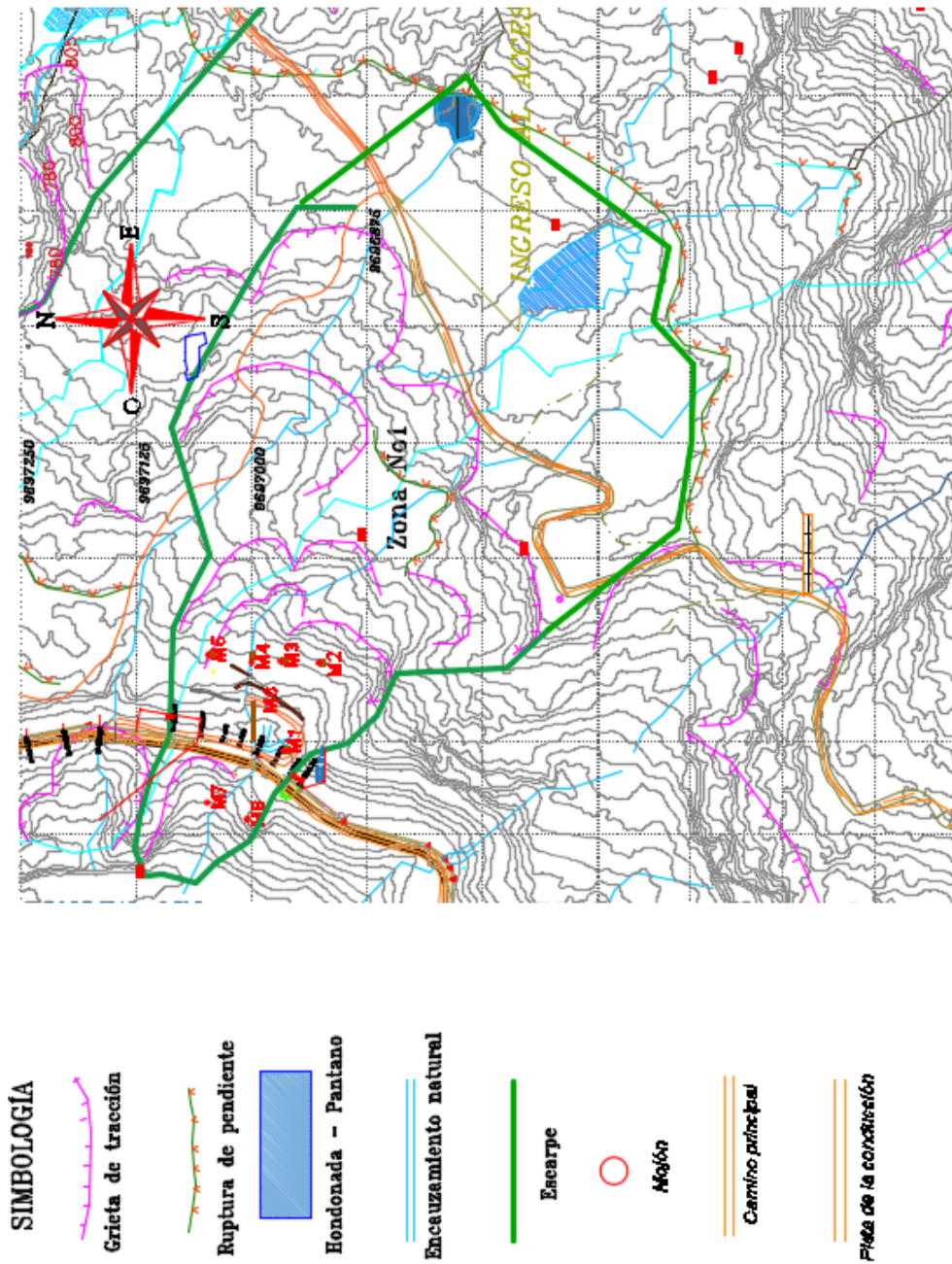


Figura A5. Mapa topográfico de escarpes, grietas y ubicación de mojones: Zona inestable 1.

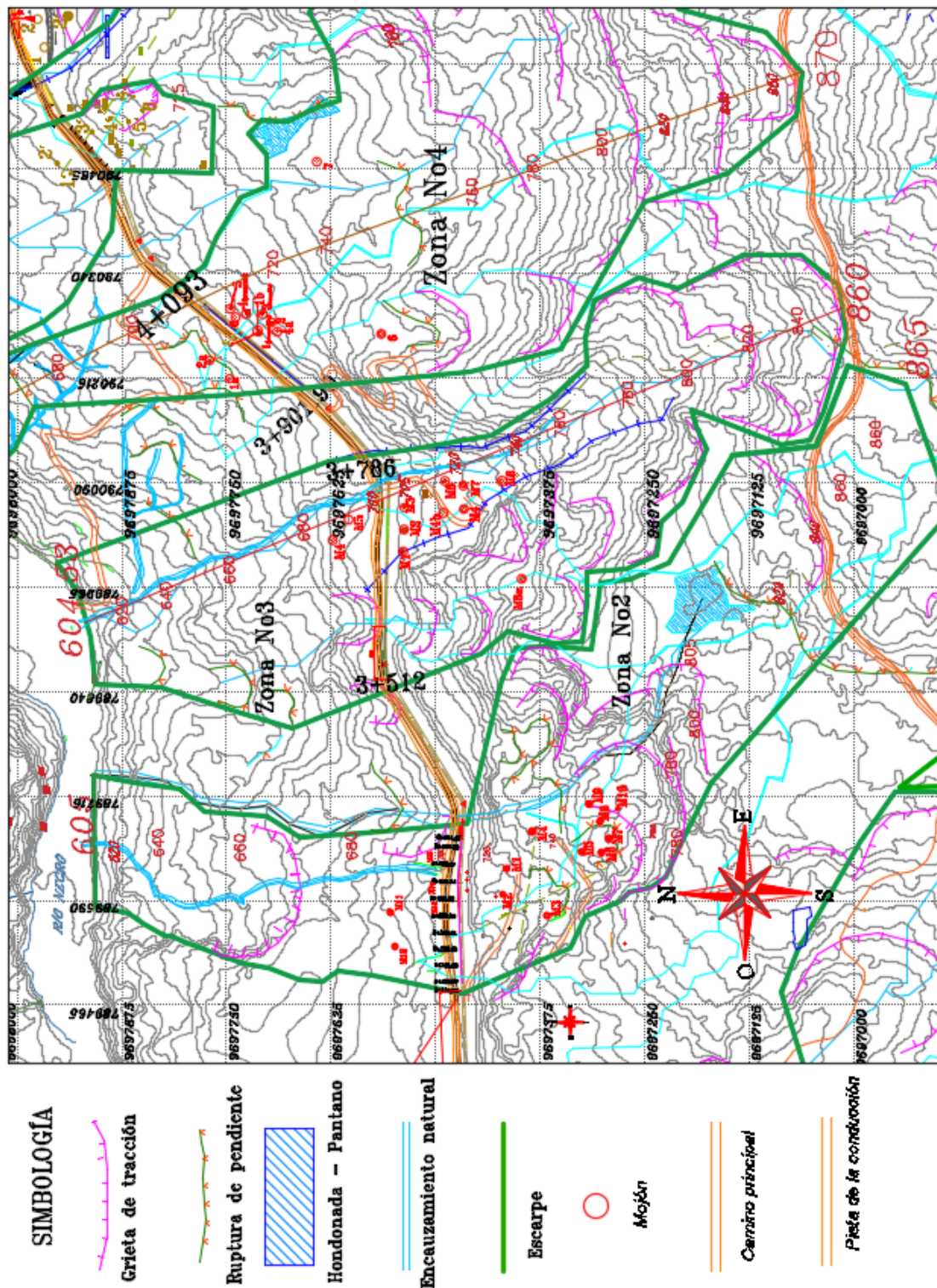


Figura A6. Mapa topográfico de escarpes, grietas y ubicación de mojones: Zonas inestables 2, 3 y 4.

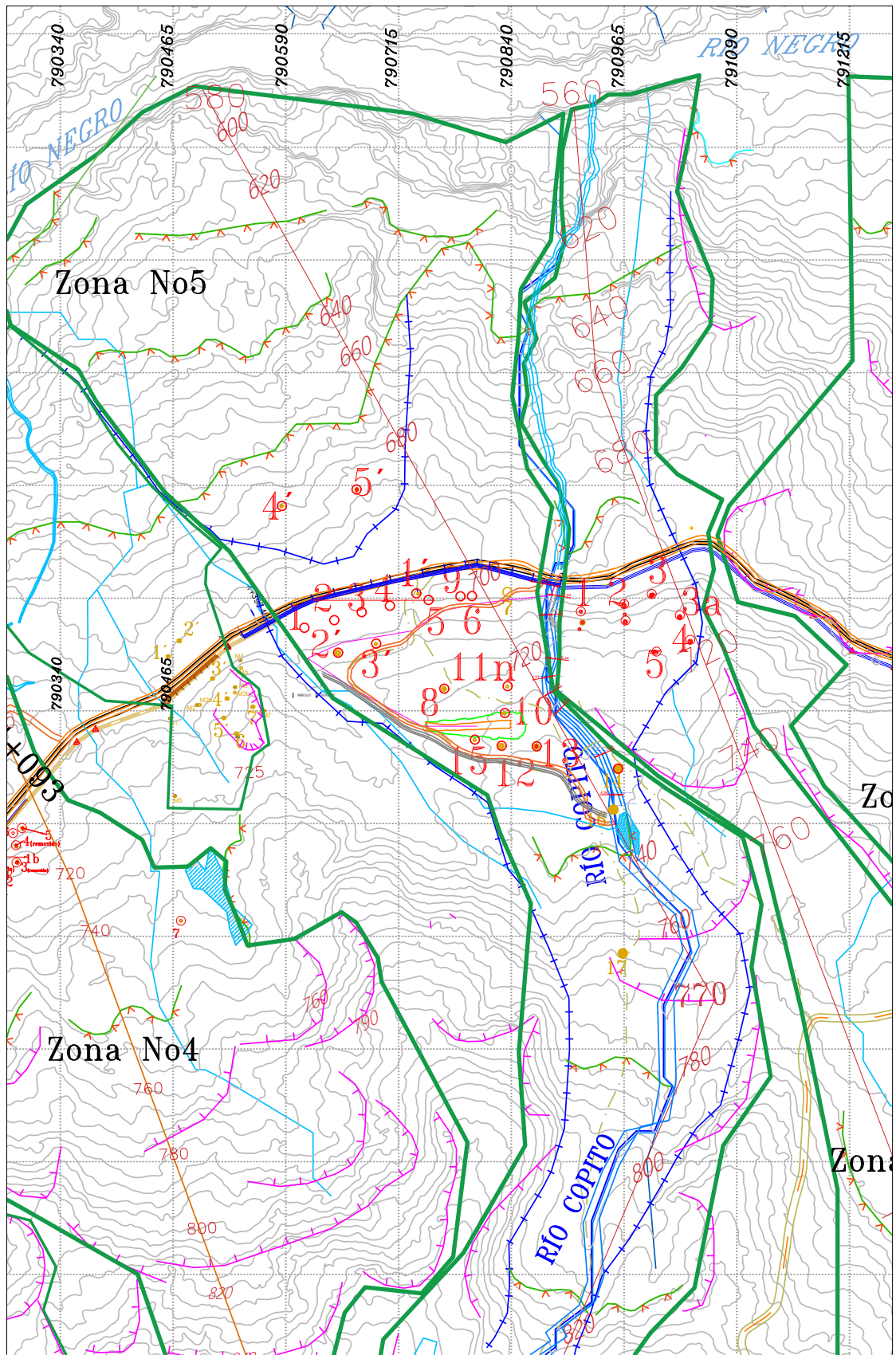


Figura A7. Mapa topográfico de escarpes, grietas y ubicación de mojones: Zona inestable 5.

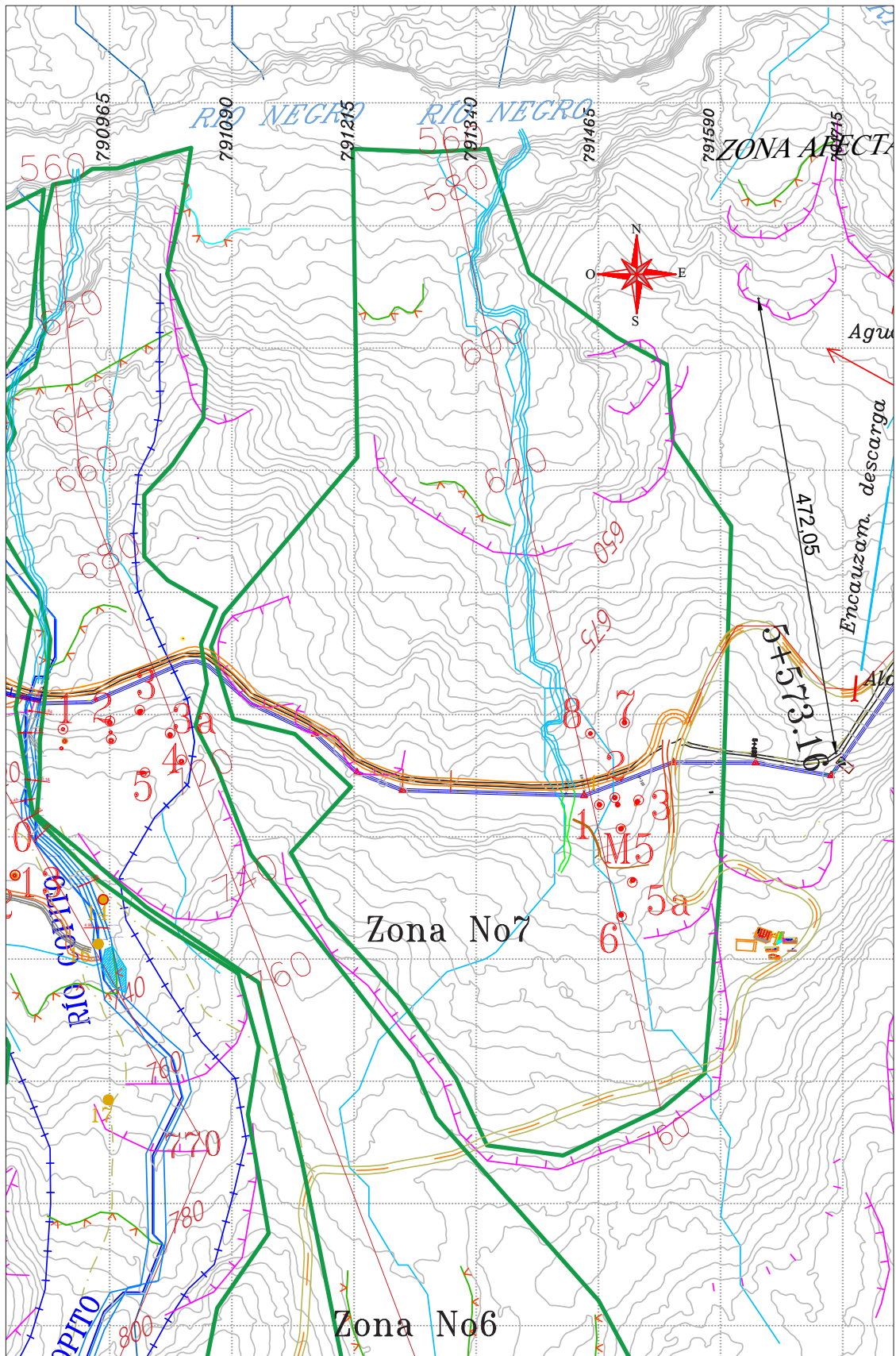


Figura A8. Mapa topográfico de escarpes, grietas y ubicación de mojonera: Zonas inestables 6 y 7.

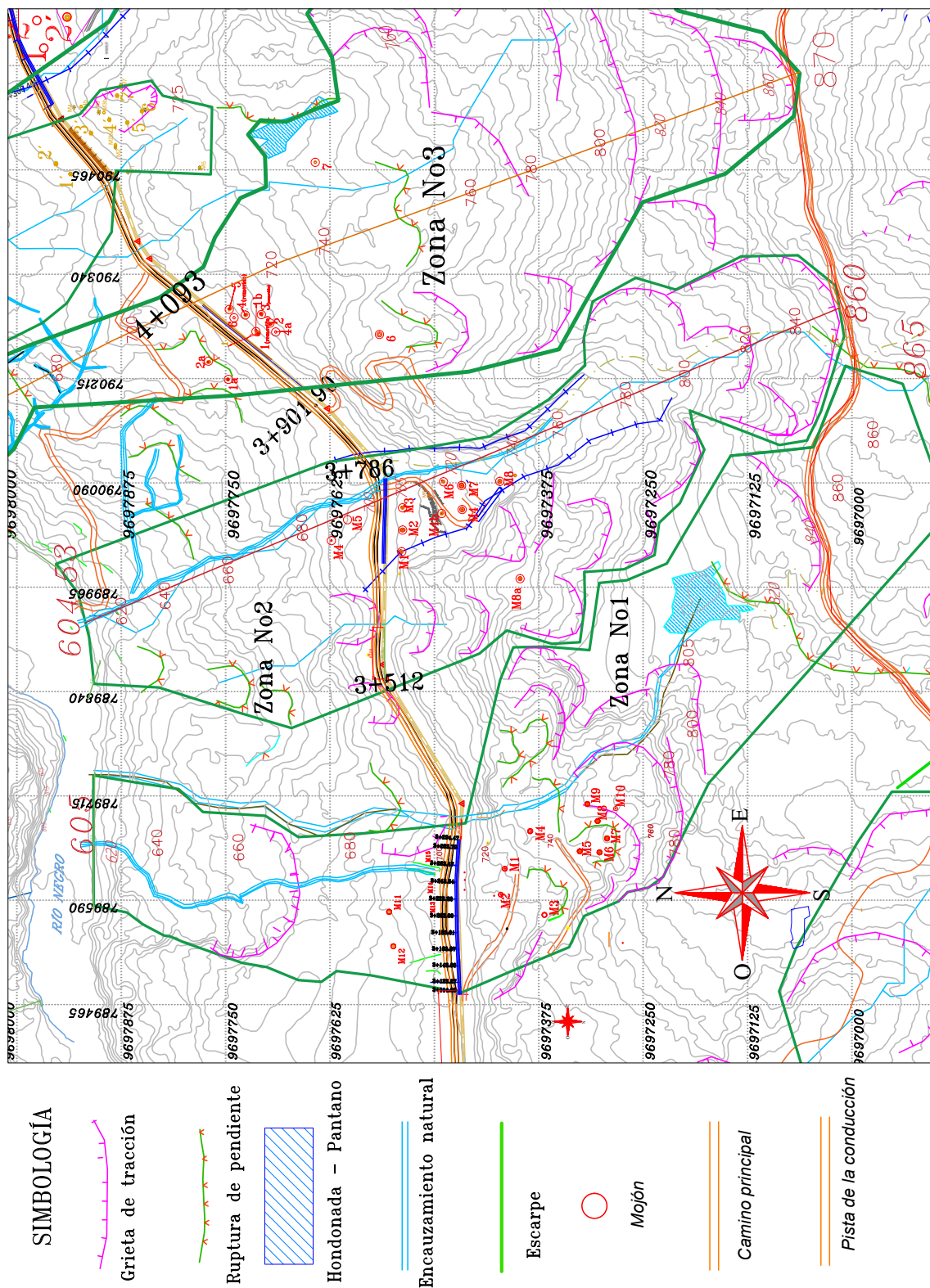


Figura A9: Mapa topográfico (referencia para cálculo de pendientes de ladera: Zonas inestables 2, 3, 4. (Tomada de referencia [1]).

FECHA	$\tan\beta$	P (mm)	Q (m ³ /s)	$\frac{P \cdot Q}{(mm \cdot m^3/s)}$
ZONA 1				
8/2/16	-1.14			
8/10/16	-1.14	6.57	142.30	934.91
8/15/16	0.46	10.01	215.57	2157.86
8/29/16	-0.04	5.61	97.34	546.08
9/16/16	-0.08	8.39	66.50	557.94
9/29/16	-0.81	6.75	86.02	580.64
10/12/16	0.25	5.55	65.33	362.58
11/1/16	-0.02	2.62	39.81	104.30
11/14/16	-0.01	9.74	67.73	659.69
11/30/16	-0.39	12.15	54.73	664.97
12/13/16	0.00	3.60	31.42	113.11
1/6/17	-0.42	5.11	41.24	210.74
1/16/17	0.56	9.24	61.44	567.71
2/2/17	-2.55	7.17	59.29	425.11
2/13/17	0.76	4.01	42.79	171.59
3/3/17	-1.66	9.98	48.80	487.02
3/14/17	-0.28	3.85	35.59	137.02
3/31/17	-0.13	9.59	45.85	439.70
4/19/17	0.30	13.85	78.15	1082.38
5/3/17	-0.45	14.18	83.57	1185.02
5/15/17	-0.19	13.84	75.68	1047.41
5/30/17	-0.18	6.84	60.30	412.45
6/14/17	-0.05	13.91	113.55	1579.48
7/3/17	0.01	6.60	77.24	509.78
7/14/17	-0.45	3.26	94.90	309.37
7/31/17	-0.03	11.21	178.58	2001.88
8/15/17	-0.18	1.88	49.27	92.63
9/6/17	-1.63	3.68	34.87	128.32
9/26/17	-0.19	6.05	64.57	390.65
10/12/17	-0.06	6.22	45.91	285.56
10/30/17	-0.10	11.95	117.95	1409.50
11/15/17	-0.10	9.09	27.41	249.16
12/1/17	-0.04	4.82	57.27	276.04
12/5/17	-0.01	17.88	66.95	1197.07
12/28/17	-0.18	6.05	26.01	157.36
1/8/18	-0.18	2.87	15.76	45.23
1/23/18	-0.66	12.81	87.25	1117.67
2/5/18	-0.06	2.74	35.41	97.02
2/16/18	-0.24	4.80	32.15	154.32
2/27/18	-0.22	6.26	54.68	342.30
3/7/18	0.02	7.13	49.14	350.37
3/19/18	0.04	3.19	39.55	126.16
4/4/18	-0.15	10.60	60.48	641.09
4/18/18	-0.12	8.89	55.38	492.33
4/25/18	-0.24	6.42	89.53	574.78
6/1/18	0.00			
6/6/18	-0.65	13.23	174.16	2304.16
6/11/18	-0.97	6.43	85.74	551.33
6/19/18	-0.09	13.79	235.64	3248.89
6/27/18	-0.11	10.03	105.17	1054.97
7/2/18	-0.03	0.86	59.73	51.37
7/10/18	-1.35	1.98	52.74	104.43
7/16/18	0.32	9.18	120.63	1107.38
7/25/18	-0.75	12.68	198.71	
7/30/18	0.24	3.45	105.57	364.22
8/13/18	0.36	9.05	93.90	849.80
8/20/18	-0.22	9.34	150.50	1405.67
8/28/18	0.06	12.64	222.73	2815.31
9/3/18	0.23	6.63	113.03	749.39
9/11/18	-0.15	9.19	171.89	1579.67
9/17/18	-0.45	6.80	17.84	121.31
9/25/18	-0.08	2.43	18.33	44.54
10/2/18	0.23	3.62	12.86	46.55
10/17/18	-0.24	8.18	45.96	375.95
10/25/18	-1.00	0.78	9.13	7.12
11/6/18	1.17	5.75	39.98	229.89
11/14/18	0.66	5.28	39.66	209.40
11/19/18	1.20	21.12	108.30	2287.30
11/28/18	-1.76	6.36	45.62	290.14
12/4/18	-0.81	12.94	25.98	336.18
12/12/18	-0.74	7.93	50.98	404.27
12/19/18	0.61	3.49	59.27	206.85
1/3/19	1.73	4.53	60.85	275.65
1/17/19	-1.44	3.75	37.38	140.18

FECHA	$\tan\beta$	P (mm)	Q (m ³ /s)	$\frac{P \cdot Q}{(mm \cdot m^3/s)}$
ZONA 2				
8/10/2016	-0.88	6.96	142.30	990.41
8/15/2016	-0.14	10.70	215.57	2305.74
8/29/2016	-1.24	5.61	97.34	546.15
9/16/2016	0.68	7.70	65.47	503.83
9/29/2016	-0.11	7.71	86.11	664.25
11/1/2016	0.03	3.77	50.01	188.67
11/14/2016	-0.09	9.73	65.16	634.19
11/30/2016	0.04	11.58	47.82	553.91
12/13/2016	-0.03			
3/3/2017	0.00			
3/14/2017	0.04	3.28	51.92	170.31
3/31/2017	-0.11	8.68	46.06	399.61
4/19/2017	0.80	13.84	80.86	1119.20
5/2/2017	-0.32			
7/31/2017	-0.42	6.73	103.92	699.37
8/15/2017	-0.42	2.23	50.31	112.36
9/6/2017	-0.45	4.31	34.59	148.97
9/26/2017	-0.43	6.70	62.10	416.23
10/11/2017	-0.39	5.91	45.47	268.73
10/15/2017	-0.42	6.16	35.50	218.78
10/31/2017	-0.43	14.38	128.59	1849.61
11/6/2017	-0.41	4.14	14.92	61.78
11/14/2017	-0.36	14.74	33.03	487.02
11/27/2017	-0.38	4.55	59.39	269.98
12/1/2017	-0.13	8.63	48.32	416.74
12/5/2017	-0.77	13.89	48.29	670.56
12/27/2017	-0.35	6.57	25.17	165.44
1/8/2018	-0.30	3.26	14.72	48.01
1/23/2018	-0.27	16.87	84.78	1430.17
2/1/2018	-0.19	4.63	48.56	225.00
2/16/2018	-0.33	4.14	25.56	105.72
2/28/2018	-0.19	5.75	50.84	292.10
3/7/2018	-0.15	10.34	44.95	464.61
3/19/2018	-0.20	3.46	56.66	196.19
4/3/2018	-0.40	14.08	51.90	730.64
4/18/2018	-0.15	8.73	56.86	496.43
4/24/2018	-0.69	5.77	79.83	460.32
6/1/2018	-0.45	16.60	209.56	
6/6/2018	-0.45	13.23	172.66	2284.32
6/11/2018	0.00	6.43	84.24	541.69
6/19/2018	-0.13	13.79	234.14	3228.21
6/27/2018	-0.10	10.03	103.67	1039.93
7/6/2018	-0.83	1.22	57.67	70.17
7/10/2018	-0.57	5.84	55.43	323.56
7/16/2018	0.29	8.41	115.43	970.53
7/30/2018	-0.52	10.76	161.29	1736.22
8/13/2018	-0.20	9.02	89.35	806.04
8/20/2018	-0.09	10.86	127.75	1386.98
8/28/2018	-0.21	13.11	221.13	2899.52
9/3/2018	-0.03	10.93	78.25	855.48
9/11/2018	-0.07	6.14	179.71	1102.99
9/17/2018	-0.31	5.07	18.85	95.50
9/25/2018	-0.32	3.51	18.04	63.36
10/1/2018	-0.63	3.89	8.93	34.73
10/17/2018	0.57	7.52	45.34	340.90
10/26/2018	0.49	1.36	7.79	10.60
11/6/2018	0.01	7.39	42.31	312.54
11/20/2018	-0.10	12.22	67.07	819.48
11/28/2018	-0.38	7.53	43.22	325.53
12/4/2018	-1.40	13.15	25.82	339.49
12/12/2018	-0.28	8.26	48.22	398.14
12/19/2018	0.22	4.67	57.09	266.71
1/3/2019	-0.07	5.10	62.58	318.95
1/17/2019	-0.19	5.34	30.93	165.03
2/6/2019	-0.12	14.00	100.29	1403.62
2/13/2019	-0.12	10.69	117.76	1258.35
2/19/2019	-0.73	7.78	67.32	523.97
2/25/2019	0.01	9.65	57.95	559.17
3/12/2019	-0.70	7.75	48.85	378.42
3/19/2019	0.07	15.14	64.17	971.28
3/26/2019	-0.34	5.41	74.95	405.27
4/2/2019	-0.15	10.12	94.23	953.71
4/16/2019	-0.41	9.01	38.53	347.36
5/1/2019	-0.02	12.50	66.18	827.47
5/21/2019	-0.25	11.21	125.89	1411.20
5/28/2019	-0.63	5.52	67.08	370.35
6/11/2019	-0.17	13.58	122.33	1660.62
6/19/2019	-0.25	12.00	140.23	1682.81
6/26/2019	0.03	6.94	190.32	1320.02
7/2/2019	-0.58	8.18	125.55	1027.38
7/9/2019	-0.35	6.14	111.55	684.44
7/17/2019	-0.35	7.37	99.90	736.16
7/23/2019	-0.01	18.06	190.72	3444.06
8/1/2019	-0.23	4.31	103.58	445.95
8/7/2019	-0.45	12.55	139.57	1751.65
8/13/2019	-0.37	2.12	49.40	104.56
9/2/2019	0.29	9.38	116.46	1091.84
9/12/2019	-0.38	6.94	78.51	544.45
9/20/2019	-0.28	5.38	76.45	411.41
10/4/2019	-0.24	6.68	34.99	233.59
10/9/2019	-0.19	14.35	56.24	807.07
10/22/2019	-0.30	10.29	67.06	689.99
11/7/2019	-0.10	11.33	70.09	794.02

Figura A10. Valores observados de $\tan\beta$ para zonas 1 y 2, precipitación y caudales del río Negro medios en cada período.

FECHA	tanβ	P (mm)	Q (m ³ /s)	P.Q (mm. m ³ /s)
ZONA 3:				
8/2/2016				
8/10/2016	-0.25	9.78	142.30	1391.52
8/15/2016	0.47	6.20	215.57	1335.67
8/29/2016	-0.35	5.61	97.34	546.15
9/16/2016	-0.01	7.70	66.27	509.99
9/29/2016	0.08	7.71	84.91	654.99
10/11/2016	0.14	5.19	64.02	332.02
11/1/2016	0.18	2.97	39.28	116.50
11/14/2016	-0.05	9.74	65.96	642.33
11/30/2016	0.18	11.58	48.62	563.18
12/13/2016	0.16	4.30	26.82	115.45
1/6/2017	0.18	4.54	38.73	175.93
1/16/2017	0.40	10.51	67.58	710.11
2/2/2017	0.08	6.76	55.65	376.26
2/13/2017	0.34	4.44	52.83	234.39
3/3/2017	0.00	9.84	47.58	468.39
3/14/2017	0.43	3.28	36.15	118.57
3/31/2017	0.01	9.66	46.98	453.69
4/19/2017	0.22	13.40	76.50	1025.42
5/2/2017	3.21	15.75	90.89	1431.57
5/15/2017	-0.38	13.19	77.23	1018.48
5/30/2017	0.36	7.07	61.65	435.66
6/14/2017	0.23	13.32	100.62	1340.08
7/3/2017	0.09	6.49	74.97	486.70
7/14/2017	0.19	5.31	105.56	560.42
7/31/2017	0.23	14.05	187.18	2630.41
8/1/2017	-0.21			
8/15/2017	-0.23	2.39	51.11	122.30
8/31/2017	-0.18	5.19	39.66	205.87
9/26/2017	0.01	5.46	52.93	288.89
10/11/2017	-0.01	5.91	46.27	273.44
10/30/2017	-0.02	13.40	115.31	1545.39
11/14/2017	-0.12	9.53	25.97	247.48
12/1/2017	-0.13	5.51	57.58	317.04
12/5/2017	-0.02	13.89	49.09	681.67
12/28/2017	0.10	6.58	27.20	179.06
1/8/2018	-1.71	2.94	11.99	35.26
1/22/2018	-0.07	17.86	86.21	1539.43
2/1/2018	-0.07	4.48	52.10	233.14
2/15/2018	-0.02	4.29	26.51	113.71
2/27/2018	0.01	5.80	53.26	309.13
3/7/2018	0.00	9.21	33.57	309.08
3/19/2018	0.07	3.46	57.46	198.96
4/3/2018	-0.02	14.08	52.70	741.91
4/18/2018	-0.07	8.73	57.67	503.42
4/24/2018	0.01	5.77	80.63	464.94
6/1/2018				
6/6/2018	-0.05	10.55	173.46	1830.02
6/11/2018	-0.19	6.43	85.04	546.83
6/19/2018	-0.13	13.79	234.94	3239.24
6/27/2018	-0.18	10.03	104.47	1047.95
7/2/2018	-0.30	1.47	73.15	107.52
7/10/2018	-0.17	3.37	57.01	192.04
7/16/2018	-0.23	8.41	116.23	977.26
7/24/2018	-0.11	16.74	206.67	3460.49
7/30/2018	-0.24	2.79	102.66	286.58
8/14/2018	0.18	8.42	93.69	788.85
8/20/2018	-0.81	12.67	157.15	1990.59
8/29/2018	-0.18	11.66	138.86	1618.46
9/3/2018	-0.09	13.12	78.91	1035.35
9/11/2018	-0.09	6.14	110.77	679.84
9/17/2018	-0.32	5.07	17.74	89.90
9/27/2018	-0.24	3.88	21.50	83.44
10/1/2018	-0.12	3.16	16.40	51.87
10/17/2018	-0.23	7.52	42.43	319.00
10/26/2018	-0.03	1.36	8.59	11.69
11/6/2018	1.02	7.39	43.11	318.45
11/14/2018	-0.45	8.83	38.15	336.92
11/19/2018	1.16	18.77	103.99	1951.82
11/26/2018	-0.30	9.26	48.50	448.98
12/3/2018	-0.58	8.24	31.77	261.86
12/12/2018	-0.52	9.92	48.39	479.83
12/19/2018	-0.05	4.67	57.89	270.44
1/3/2019	0.56	5.10	63.38	323.03
1/17/2019	-0.30	5.10	32.25	164.36
1/30/2019	-0.06	11.14	85.06	947.46
2/14/2019	-0.15	14.78	125.58	1856.08
2/19/2019	0.03	6.98	55.88	390.06
3/11/2019	-0.48	8.69	51.48	447.45
3/19/2019	-0.59	13.28	74.48	988.67
3/27/2019	-0.90	6.54	70.98	464.02
4/1/2019	0.42	9.71	112.00	1087.56
4/16/2019	-0.36	8.41	71.78	603.90
5/1/2019	0.30	12.50	66.98	837.47
5/14/2019	-0.25	12.35	122.50	1512.41
5/28/2019	-0.40	7.31	105.04	767.93
6/11/2019	-0.24	13.58	151.13	2051.58
6/19/2019	-0.01	12.00	141.14	1693.73
6/26/2019	-0.08	6.94	193.14	1339.57
7/1/2019	-0.19	9.80	137.64	1348.83
7/8/2019	-0.43	5.97	96.45	575.94
7/18/2019	-0.21	6.49	106.81	693.20
7/23/2019	-0.47	20.71	208.40	
8/1/2019	-0.25	4.31	104.38	449.39
8/7/2019	-0.60	12.55	140.14	1758.80
8/13/2019	0.26	2.12	50.20	106.25
9/2/2019	0.01	9.38	117.44	
9/11/2019	-0.15	6.51	81.60	530.88
9/20/2019	-0.75	5.98	83.50	499.63
10/3/2019	-0.03	6.31	59.68	376.70
10/9/2019	-0.47	13.86	62.41	864.85

FECHA	tanβ	P (mm)	Q (m ³ /s)	P.Q (mm. m ³ /s)
ZONA 4				
6/1/18	-0.162	14.3	208.74	
6/11/18	-0.162	7.41	126.47	937.14
6/27/18	-0.059	10.49	165.57	1736.83
7/10/18	-0.837	1.55	49.93	77.39
7/24/18	-0.150	12.19	169.59	2067.30
8/14/18	0.080	6.75	89.88	606.69
8/29/18	-1.350	11.90	194.95	2319.91
9/11/18	-0.078	8.71	137.13	1194.40
9/27/18	0.009	4.26	16.00	68.16
10/17/18	0.000	7.00	34.76	243.32
11/5/18	-0.668	3.96	24.81	98.25
11/20/18	-0.024	10.43	62.78	654.80
12/3/18	-0.381	8.75	32.61	285.34
12/17/18	-0.167	6.38	49.40	315.17
1/17/19	-0.261	4.24	49.63	210.43
2/14/19	-0.163	13.40	106.74	1430.32
3/11/19	-0.431	8.14	46.45	378.10
4/16/19	-0.231	8.11	73.86	599.00
5/14/19	-0.018	11.13	120.08	1336.49
5/29/19	-0.087	10.23	115.70	1183.61
6/13/19	-0.256	8.96	88.98	797.26
6/18/19	0.014	16.00	187.89	3006.24
6/25/19	-0.707	7.30	194.71	1421.38
7/1/19	0.097	8.08	134.00	1082.72
7/8/19		5.10	92.26	470.53
7/17/19	-0.378	5.86	106.52	624.21
7/22/19	0.000	17.53	224.57	3936.71
8/7/19	-0.019	6.86	112.59	772.37
8/12/19		0.96	48.24	46.31
9/4/19	-0.161	7.89	115.07	907.90
9/11/19	-0.641	7.20	71.62	515.66
9/24/19	0.222	4.49	78.46	352.29
10/3/19	-0.051	4.90	26.61	130.39
1/3/20	0.000	10.26	66.50	682.29
2/27/20	0.606	4.91	56.87	279.23
3/31/20	-0.480	6.00	42.88	257.28
6/16/20	-5.420	11.67	117.79	1374.61
8/4/20		8.67	93.75	812.81
8/25/20	-0.399	9.19	56.15	516.02
9/1/20	-0.356	1.39	7.69	10.69
9/15/20	-0.366	3.39	33.14	112.34
10/22/20	-0.315	8.88	57.58	511.31
11/5/20	0.388	1.27	9.97	12.66
11/10/20	0.120	2.69	5.00	13.45
11/17/20	-0.386	2.15	5.00	10.75
11/24/20	2.382	7.34	32.98	242.07
12/8/20	2.848	9.80	34.47	337.81
12/15/20	2.320	3.46	20.00	69.20
12/22/20	0.670	6.26	49.61	310.56
12/30/20	-0.010	6.96	8.3	57.77
1/5/21	-0.580	6.03	22.1	133.26
1/13/21	-0.511	6.5	40.57	263.71
1/19/21	-21.913	3.3	41.23	136.06
1/26/21	-21.913	13.6	93.44	1270.78
2/3/21	0.240	7.8	81.21	633.44
2/10/21	0.265	7.09	55.13	390.87
2/24/21	0.124	8.66	30.73	266.12
3/9/21	0.011	11.64	96.94	1128.38
3/23/21	0.000	5.56	31.62	175.81
3/30/21	0.623	20.94	91.3	1911.82
4/6/21	1.156	9.36	112.86	1056.37
4/13/21	0.684	3.36	58.68	197.16
4/21/21		10.17	73.85	751.05
5/4/21	-0.342	19.31	84.23	1626.48
5/17/21	-0.678	18.26	203.34	3712.99

Figura A11. Valores observados de tanβ para zonas 3 y 4. Precipitación y caudales del río Negro medios entre cada período.

FECHA	tanβ	P (mm)	Q (m ³ /s)	P.Q (mm. m ³ /s)
ZONA 5:				
8/11/2016	-0.070	8.69	142.30	1236.59
8/15/2016	-0.145	8.69	215.57	1873.30
8/29/2016	-0.081	5.61	97.34	546.08
9/15/2016	-0.240	5.72	67.10	383.81
9/29/2016	-0.862	9.01	86.51	779.96
10/11/2016	1.206	5.01	74.86	375.05
11/1/2016	-0.186	2.79	44.46	124.04
11/14/2016	0.267	9.74	67.16	654.14
11/30/2016	0.593	11.58	49.82	576.92
12/13/2016	-1.100	3.85	37.12	142.91
1/6/2017	-0.068	4.53	40.94	185.44
1/16/2017	1.715	10.51	68.78	722.86
2/1/2017	-5.417	7.18	63.94	459.11
2/13/2017	0.300	4.07	47.29	192.45
3/3/2017	0.065	9.84	48.46	476.82
3/14/2017	0.363	3.28	37.35	122.51
3/31/2017	1.203	9.66	48.06	464.23
4/18/2017	2.119	14.01	83.52	1170.06
5/2/2017	-2.634	14.63	83.60	1223.08
5/15/2017	0.202	13.2	78.43	1035.22
5/30/2017	-1.771	7.57	62.85	475.77
6/14/2017	-0.165	13.582	112.81	1532.12
7/3/2017	1.056	6.49	76.17	494.33
7/14/2017	-0.395	4.19	96.97	406.31
8/1/2017	0.378	13.272	177.66	2357.88
8/15/2017	-0.338	2.393	52.31	125.17
9/5/2017	0.014	4.320	36.59	158.07
9/26/2017	0.029	6.571	64.10	421.26
10/11/2017	-0.060	5.910	47.47	280.53
10/30/2017	-0.334	13.403	116.51	1561.48
11/14/2017	0.528	9.530	27.17	258.92
11/30/2017	0.005	4.841	60.55	293.11
12/28/2017	-0.055	7.970	30.99	246.96
1/22/2018	0.850	11.294	54.75	618.37
2/15/2018	-1.387	4.367	38.37	167.56
3/6/2018	1.188	6.310	45.96	290.00
4/2/2018	0.677	9.130	53.15	485.28
4/24/2018	-0.337	10.120	64.75	655.27
7/3/2018		1.225	57.49	70.42
7/9/2018		2.617	43.49	113.79
7/24/2018	-0.770	13.043	164.29	2142.94
8/14/2018	-0.615	7.840	127.78	1001.77
8/20/2018	-0.152	12.667	138.61	1755.71
8/28/2018		13.113	223.13	2925.74
9/3/2018	0.277	10.933	100.84	1102.50
9/11/2018	0.670	6.138	105.89	649.88
9/25/2018	-0.637	4.179	19.37	80.95
10/3/2018	0.297	4.219	10.10	42.62
10/17/2018	0.253	7.850	48.23	378.60
10/25/2018	-0.814	1.380	10.80	14.90
10/29/2018	0.311	8.288	34.79	288.32
11/5/2018	0.117	6.964	45.41	316.24
11/12/2018	-0.049	6.786	30.66	208.02
11/19/2018	3.452	16.793	94.04	1579.25
11/26/2018	2.547	9.257	49.70	460.09
12/3/2018	-3.367	8.243	32.97	271.76
12/11/2018	1.136	9.500	41.59	395.14
12/17/2018	0.049	4.483	64.76	290.34
1/3/2019	-1.227	5.618	65.14	365.91
1/7/2019	-0.449	10.238	47.12	482.39
1/16/2019	0.239	2.590	22.19	57.48
1/25/2019	0.487	8.656	99.46	860.91
1/31/2019	-2.197	15.292	66.44	1015.93
2/12/2019	0.744	13.392	132.49	1774.22
2/19/2019	0.517	8.593	77.89	669.30
2/25/2019	-0.696	9.650	59.95	578.47
3/11/2019	0.428	8.282	49.56	410.46
3/26/2019	-0.274	9.603	76.27	732.45
4/15/2019	-0.420	9.388	82.07	770.45
4/24/2019	-0.054	15.778	71.69	1131.04
5/1/2019	-0.374	6.714	62.23	417.80
5/10/2019	-0.027	11.928	120.56	1438.05
5/14/2019	0.053	13.288	127.86	1698.94
5/22/2019	0.059	8.019	129.34	1037.15
5/29/2019	-0.058	8.929	76.52	683.23
6/11/2019	-0.199	12.750	125.27	1597.18
6/18/2019	-0.247	12.929	136.39	1763.36
6/21/2019	-0.284	11.317	259.21	2933.43
6/25/2019	0.044	4.700	166.45	782.30
7/1/2019	0.019	8.383	130.02	1089.97

FECHA	tanβ	P (mm)	Q (m ³ /s)	P.Q (mm. m ³ /s)
ZONA 6				
8/1/2017				
8/15/2017	-0.050	28.15	50.97	1434.81
8/31/2017	-0.091	4.59	41.16	188.92
9/19/2017	-0.105	6.32	59.94	378.82
10/11/2017	-0.055	4.27	46.70	199.41
10/30/2017	-0.209	12.07	116.88	1410.74
11/14/2017	0.257	9.61	27.94	268.50
11/30/2017	0.141	4.93	60.18	296.69
12/28/2017	0.003	7.52	32.00	240.64
1/22/2018	0.483	4.10	53.82	220.66
2/15/2018	-0.490	13.13	107.42	1410.42
3/6/2018	0.476	5.21	45.96	239.44
4/2/2018	0.576	7.02	53.15	373.15
4/24/2018	1.273	9.50	65.58	623.03
5/31/2018				
6/11/2018	-0.623	6.83	126.81	866.08
6/27/2018	-0.196	10.49	170.90	1792.79
7/9/2018	-0.433	1.59	50.49	80.28
7/24/2018	-0.240	11.44	164.29	1879.52
8/14/2018	-0.304	6.17	94.07	580.41
8/28/2018	-0.268	12.81	190.25	2437.07
9/11/2018	-0.227	8.45	138.23	1168.02
9/25/2018	-0.154	4.31	20.39	87.86
10/17/2018	-0.233	6.73	34.71	233.58
11/5/2018	0.187	4.12	28.60	117.83
12/4/2018	-0.399	9.46	51.59	488.03
12/17/2018	-0.346	5.91	52.06	307.69
1/16/2019	-0.184	4.08	53.41	217.93
2/12/2019	-0.223	12.89	109.91	1416.74
3/11/2019	-0.325	8.40	59.18	497.10
4/2/2019	-0.305	8.70	80.97	704.44
4/15/2019	-0.257	8.64	72.54	626.75
5/1/2019	-0.174	8.90	67.52	600.93
5/22/2019	-0.289	10.41	161.98	1686.24
5/28/2019	-0.396	10.88	80.15	872.01
6/13/2019	-0.204	10.40	103.25	1073.76
6/25/2019	-0.207	12.30	194.51	2392.42
7/1/2019	-0.056	8.08	137.71	1112.68
8/7/2019	-0.235	7.72	126.30	975.02
8/30/2019	-0.111	8.51	159.61	1358.25
9/6/2019	-0.350	3.89	48.32	187.96

Figura A12. Valores observados de tanβ para zonas 5 y 6. Precipitación y caudales del río Negro medios entre cada período.