

Estudio de la velocidad de reptación de Depósitos Coluviales mediante el Análisis Dimensional, en la cuenca del Río Negro, Morona Santiago - Ecuador.

Study of the creeping speed of Colluvial Deposits through Dimensional Analysis, in the Río Negro basin, Morona Santiago - Ecuador

Patricio Ochoa Cañizares¹

¹ Colegio de Ingenieros Civiles del Azuay CICA, Azuay-Ecuador.

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 20-07-2021

Fecha de aceptación: 05-04-2022

RESUMEN:

Esta investigación tiene el propósito de exponer la deducción de una ley para predecir la velocidad de reptación de laderas conformadas por coluviones, cuya estabilidad se ha visto reducida por la elevada saturación del suelo relacionada con la profundidad del nivel freático y erosión hídrica, partiendo de dos variables predictivas: la precipitación media y el caudal medio fluvial que causa socavación lateral en la base. La metodología consistió en tomas semanales a quincenales de coordenadas topográficas de puntos en el terreno llamados mojones, a partir de las cuales se calcularon el desplazamiento y la velocidad. El modelo geológico ha sido construido a partir de estudios de geofísica y ensayos de suelos. Para elaborar el modelo matemático se ha utilizado el Teorema Pi II de Buckingham, relacionando la velocidad observada y las características del suelo con las variables predictivas mediante la combinación de parámetros adimensionales. El poder predictivo del modelo matemático obtenido está en el rango 34% – 64 %, que estadísticamente representa un ajuste moderado en relación a los datos tomados en campo. El principal hallazgo ha sido el establecer la proporcionalidad inversa entre la velocidad de reptación y la permeabilidad del coluvión. Su aplicación más importante es identificar umbrales de precipitación y caudal que producen aumentos en la velocidad de laderas de coluviones, a partir de modelos de evaluación de riesgo.

Palabras clave:

Buckingham, Coluvión, Permeabilidad, Reptación, Velocidad.

ABSTRACT:

This research has the purpose of exposing the deduction of a law to predict the creep speed of slopes formed by colluviums, whose stability has been reduced by the high soil saturation related to the depth of the water table and water erosion, based on two predictive variables: mean precipitation and mean river flow that causes lateral scour at the base. The methodology consisted of weekly to fortnightly shots of topographical coordinates of points on the ground called milestones, from which displacement and speed were calculated. The geological model has been done built from geophysical studies and soil tests. To develop the mathematical model, Buckingham's Pi II Theorem has been used, relating the observed speed and the characteristics of the ground with the predictive variables through the combination of dimensionless parameters. The predictive power of the mathematical model obtained is in the range 34%-64%, which statistically represents a moderate adjustment in relation to the data taken in the field. The main finding has been to establish the inverse proportionality between creep speed and colluvium permeability. Its most important application is to identify precipitation and flow thresholds that produce increases in the velocity of colluvium slopes, based on risk assessment models.

Keywords:

Buckingham, Colluvium, Permeability, Crawling, Velocity.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Naturaleza del problema investigado.

Los movimientos en masa investigados son del tipo reptación, y se localizan en la cuenca del río Negro, entre las poblaciones de San Bartolo y La Dolorosa, en la provincia de Morona Santiago, Ecuador.

El área de estudio está conformada por depósitos coluviales que consisten en acumulaciones de materiales de diverso tamaño, caracterizados por rocas metamórficas (mayormente pizarras y filitas grafiticas), englobados en una matriz (suelo areno-limoso), que se distribuye irregularmente en las vertientes del territorio montañoso, habiéndose formado por alteración y desintegración insitu, de las rocas ubicadas en las laderas superiores adyacentes y por la acción de la gravedad. Las laderas están afectadas por *procesos gravitacionales*, que consisten en el movimiento pendiente abajo de suelo, roca y regolito, agravados por el agua: lluvias y caudales erosivos. El agua afecta a la estabilidad de laderas de tres formas básicas: (1) aumento del peso por saturación de las laderas durante los temporales de lluvia; (2) infiltración hasta la profundidad de las superficies de movimiento y (3) la erosión por el agua de la base o pie [1].

La infiltración se produce a través de los sistemas de grietas de tracción existentes que evidencian la descompresión del basamento rocoso. Esto provoca el incremento de la presión de poros y del campo de las *fuerzas de filtración*, cuya magnitud depende de la *permeabilidad* de la matriz del coluvión. La socavación lateral que produce el río Negro, en la base de la ladera, disminuye su capacidad de sostenimiento.



Foto 1. Zona de estudio en la cuenca del Río Negro. (Esc: 1: 40000). Fuente: HIDROSANBARTOLO, 2017.

Los procesos mencionados contribuyen a la ocurrencia de los movimientos en masa de tipo reptación, a nivel superficial y sub superficial pendiente abajo, de manera lenta. Si el suelo se satura de agua, se fomenta aún más la reptación. La saturación reduce la resistencia interna de los materiales, los cuales son puestos fácilmente en movimiento por la fuerza de la gravedad [2].

El desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones y con la erosión fluvial [3].

Existen varios modelos que establecen umbrales de intensidad y duración de la lluvia para el desencadenamiento de movimientos en masa en diferentes lugares. El principal inconveniente para su aplicación como medida preventiva es que no son extrapolables a otras zonas [3].

Por lo señalado, es de interés deducir una ley matemática que permita predecir la velocidad de reptación que se presentaría bajo la acción de determinadas condiciones hidrometeorológicas propias de una región (precipitación media y caudal medio de ríos) aplicable a coluviones.

Existen seis zonas que experimentan reptación, las cuales se designaron mediante el abscisado de la tubería de conducción de la central HIDROSANBARTOLO, cuyo trazado se desarrolla en este sector (Tabla 1).

Tabla 1. Zonas investigadas

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

La escala de velocidades propuesta por Cruden y Varnes [4] describe 7 tipos de movimientos en masa, como se muestra en la Fig. 1

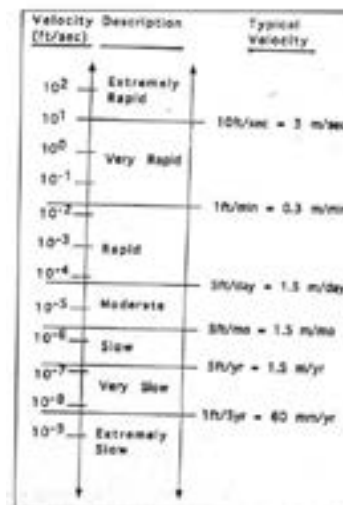


Figura 1: Escala de velocidades. (Tomado de Cruden y Varnes, 1996 [4]).

La descripción del daño probable en función de la velocidad se expone en la Fig. 2:

VELOCITY CLASS AND PROBABLE DESTRUCTIVE	
7	Catastrophe of major violence
6	Some lives lost
5	Escape evacuation possible, structures destroyed
4	Some structures can be temporarily maintained
3	Remedial construction can be undertaken
2	Some permanent structures undamaged
1	Imperceptible without instruments

Figura 2: Tipo de daño probable por clase de velocidad. (Tomado de Cruden y Varnes. 1996 [4]).

El tipo de movimiento se describe mediante umbrales de velocidad; por ejemplo, el movimiento “muy lento” se produce cuando la velocidad es mayor a 60 mm/año (0.016 cm/d) y menor a 1.50 m/año (0.411 cm/d).

Cruden y Varnes consideran que la velocidad de movimiento puede ser el mejor parámetro para describir el potencial de daño de los movimientos en masa; sin embargo, es muy difícil de predecir e incluso medir. El modelo que se propone en este estudio permitirá superar estas dificultades, y se espera contribuir al avance en posteriores investigaciones de esta importante área de la geología.

1.2 Marco Geológico Regional

En la Fig. A1 del apartado Anexo, se muestran las unidades geológicas que componen las laderas.

La región se ubica en el frente Sub andino, que está afectada por fallas inversas, que han causado fracturamientos y cizallamientos en el basamento rocoso. La Fig. A2 en el apartado Anexo muestra la presencia de grandes extensiones agrietadas y escarpadas, por donde el agua infiltra en la masa del suelo.

Existen rasgos morfológicos indicativos de que esta región ha sido afectada por movimientos en masa de tipo reptación, de diversa magnitud y edad (Fotos 2 y 3).



Foto 2: Grieta de tracción en la Zona 1. FUENTE: HIDROSANBATOLO, 2017.



Foto 3: Grieta de tracción. Zona 4. Fuente: HIDROSANBARTOLO, 2017.

La ley reptación por determinar, es una ecuación que expresa la dependencia entre la velocidad que adopta una masa de coluviones, con un conjunto de ocho variables, de las cuales se eligen como fundamentales la precipitación media y el caudal medio del río Negro.

A las variables fundamentales se las conoce como predictivas, y a la variable dependiente velocidad, se la conoce como predecible

La información de las características hidrometeorológicas de la zona de los años 2016 a 2019, así como de los estudios geofísicos y geotécnicos, fue proporcionada por HIDROSANBATOLO, que aprovecha el caudal del río Negro en esta zona, para la generación de energía eléctrica.

2. METODOLOGÍA.

La base matemática de esta investigación es el Análisis Dimensional, basado en el teorema Π “pi” de Buckingham, cuyo marco conceptual puede consultarse en la obra de J. C. Gibbings [5]. Su aplicación se expone a continuación:

La variable predecible considerada es la velocidad media de reptación *V*, que adopta una masa de coluviones en un período de tiempo.

Cada variable y sus dimensiones se detallan como sigue:

- V*: Velocidad de reptación $[V]=LT^{-1}$
- P*: Precipitación media. $[P]=LT^0$,
- Q*: Caudal medio fluvial. $[Q]=L^3T^{-1}$
- g*: Aceleración de la gravedad. $[g]=LT^{-2}$
- A*: Área de reptación. $[A]=L^2T^0$
- h_s*: Altura de la masa afectada por la presión de poros $[h_s]=LT^0$
- k*: Coeficiente de permeabilidad del suelo $[k]=LT^{-1}$
- j*: Pendiente media natural de la ladera $[j]=L^0T^0$
- tanφ*: Tangente del ángulo de fricción interna de suelo $[tanφ]=L^0T^0$.

Para denotar las dimensiones de una variable, se ha utilizado el corchete.

El simbolismo para las dimensiones básicas que intervienen en el problema, es el adoptado por el Sistema Internacional de Unidades [5], que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Unidades y símbolos de dimensiones

Cantidad	Unidad	Símbolo de dimensión
Longitud	metro, m	L
Tiempo	segundo, s	T

Las dimensiones de las cantidades físicas que intervienen en el problema se expresan a partir de las básicas (Tabla 3).

Tabla 3: Dimensiones de cantidades físicas.

Cantidad	Dimensión	Símbolo
Velocidad	Longitud / tiempo	LT ⁻¹
Aceleración	Velocidad / tiempo	LT ⁻²
Área	Longitud ²	L ²
Volumen	Longitud ³	L ³

Cuando las dimensiones están elevadas al exponente cero, significa que la variable es adimensional o que carece de esa dimensión. Por ejemplo, la precipitación tiene dimensión de longitud (L), y carece de la dimensión tiempo T, por lo que $[P]=LT^0$. Esta notación será de utilidad en la deducción de los parámetros adimensionales.

Como variables fundamentales se adoptaron *P* y *Q*, que contienen las dimensiones L y T, pues engloban de mejor manera las características cinemáticas, geométricas, geotécnicas e hidrológicas del problema. A estas variables se las conoce como predictivas. Como establece el Teorema de Buckingham, se verificó que el determinante de los exponentes de sus dimensiones es diferente de cero [5]. Así, en la variable *P*: los exponentes son 1 y 0, y en la variable *Q* son 3 y -1, luego:

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 3 & -1 \end{pmatrix} = -1 \neq 0$$

Cálculo del número de parámetros:

Número de variables = 9

Número de dimensiones fundamentales = 2

Número de parámetros adimensionales

= 9 - 2 = 7.

Las variables restantes se combinan con el producto de potencias de las variables predictivas, para formar los parámetros adimensionales pi, cuyas expresiones se obtienen como sigue:

Velocidad de reptación *V*:

$$\Pi_1 = P^x Q^y V$$

$$L^0T^0 = L^xL^{3y}T^{-y}LT^{-1} \therefore$$

$$x + 3y + 1 = 0, -y - 1 = 0$$

$$x = 2, y = -1$$

$$\Pi_1 = \frac{V P^2}{Q}$$

Aceleración de la gravedad *g*:

$$\Pi_2 = (P)^x (Q)^y g$$

$$L^0T^0 = L^xL^{3y}T^{-y}LT^{-2} \quad \therefore$$

$$x + 3y + 1 = 0, -y - 2 = 0$$

$$x = 5, y = -2$$

$$\Pi 2 = \frac{g P^5}{Q^2}$$

Área de zona en reptación, en planta A:

$$\Pi 3 = P^x Q^y A$$

$$L^0T^0 = L^xL^{3y}T^{-y}L^2 \quad \therefore$$

$$x + 3y + 2 = 0, -y = 0$$

$$x = -2, y = 0$$

$$\Pi 3 = \frac{A}{P^2}$$

Espesor de la masa afectada por la presión de poros h_s :

$$\Pi 4 = P^x Q^y h_s$$

$$L^0T^0 = L^xL^{3y}T^{-y}L \quad \therefore \quad x + 3y + 1 = 0, -y = 0$$

$$x = -1, y = 0$$

$$\Pi 4 = \frac{h_s}{P}$$

Permeabilidad de la matriz k :

$$\Pi 5 = P^x Q^y k$$

$$L^0T^0 = L^xL^{3y}T^{-y}LT^{-1} \quad \therefore$$

$$x + 3y + 1 = 0, -y - 1 = 0$$

$$x = 2, y = -1$$

$$\Pi 5 = \frac{k P^2}{Q}$$

Las variables j y $\tan\phi$ son adimensionales, por lo que las ecuaciones de sus parámetros toman la misma expresión:

$$\Pi 6 = j$$

$$\Pi 7 = \tan\phi$$

El teorema de Buckingham establece que existe alguna función f_1 tal que:

$$f_1(\Pi 1, \Pi 2, \Pi 3, \Pi 4, \Pi 5, \Pi 6, \Pi 7) = 0 \quad (1)$$

$$f_1\left(\frac{V P^2}{Q}, \frac{g P^5}{Q^2}, \frac{A}{P^2}, \frac{h_s}{P}, \frac{k P^2}{Q}, j, \tan\phi\right) = 0 \quad (2)$$

Es posible mediante el producto de parámetros Π , combinar estos constituyendo nuevos parámetros, ya que son adimensionales. Combinando los parámetros $\Pi 1$, $\Pi 3$ y $\Pi 5$, formaremos el parámetro $\Pi 8$ que será igual a:

$$\Pi 8 = \frac{V k A P^2}{Q^2} \quad (3)$$

Combinando los parámetros $\Pi 2$, $\Pi 4$ y $\Pi 6$ y el inverso del parámetro $\Pi 7$, formamos el parámetro $\Pi 9$ que es igual a:

$$\Pi 9 = \frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan\phi} \quad (4)$$

Con estos parámetros, establecemos la función f_2 tal que:

$$f_2(\Pi 8, \Pi 9) = f_2\left(\frac{V k A P^2}{Q^2}, \frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan\phi}\right) = 0 \quad (5)$$

Finalmente, despejamos el parámetro $\Pi 8$ que contiene la variable predecible V , que será igual a una función f_3 del parámetro $\Pi 9$:

$$\frac{V k A P^2}{Q^2} = f_3\left(\frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan\phi}\right) \quad (6)$$

La función f_3 es desconocida, y se determinó calculando $\Pi 8$ y $\Pi 9$ con los datos de campo para cada una de las variables.

2.1 Escarpes. Implantación de mojonos en el terreno.

Los escarpes se graficaron en un mapa topográfico, para determinar el área de cada zona de reptación, representada por la variable A . En campo se procedió a la colocación de 77 mojonos cilíndricos de hormigón, de diámetro 15 cm y altura 30 cm.

Para que los datos obtenidos reflejen mejor el resultado de la investigación, se colocaron los mojonos en el terreno, siguiendo los siguientes criterios: 1) Regiones en media ladera de baja pendiente, para evitar que derrumbes locales influyan en la toma de coordenadas. 2) Regiones alejadas del río en el pie del talud y de la corona del deslizamiento. 3) Sitios alejados de bordes de quebradas. 4) Se colocaron a profundidad de 30 cm, para evitar que su movimiento sea causado por perturbaciones extrañas a la reptación. Los mapas topográficos, Figs. A3 y A4 del apartado Anexo muestran el escarpe principal para cada zona y los mojonos instalados.

2.2 Monitoreos topográficos. Cálculo del desplazamiento y de la velocidad.

Una vez implantados los mojones, se realizó la toma de sus coordenadas iniciales en base al sistema WGS84, ZONA 17S.

El valor para la variable *V* se determinó mediante toma de coordenadas con estación total de los mojones. Los hitos geodésicos del polígono de referencia han sido fijados en sitios de afloramientos de roca, en donde es muy poco probable que existan movimientos, y así evitar que el error de medición sea excesivo.

Si el vector posición del mojón *i* en la fecha 1 es *r*₁ y en la fecha 2 es *r*₂, el vector desplazamiento Δr del mojón *i* entre estas dos fechas es

$$\Delta r = r_2 - r_1$$

Si se conocen las coordenadas topográficas para estas fechas (*E*₁, *N*₁, *Z*₁) y (*E*₂, *N*₂, *Z*₂), la magnitud del desplazamiento en centímetros se calculó mediante:

$$|\Delta r| = 100 \sqrt{(E_2 - E_1)^2 + (N_2 - N_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (7)$$

Si Δt es el tiempo en días que transcurrió entre las fechas 1 y 2, la magnitud de la velocidad del mojón *i* en cm/d se calculó como:

$$V_i = \frac{|\Delta r|}{\Delta t} \quad (8)$$

A modo de ejemplo explicativo, en las Tablas 4 y 5 se expone el cálculo del desplazamiento y la velocidad para los mojones 5 y 7 del de la Zona 1, en el período junio - julio 2018.

Las coordenadas se tomaron con el Datum WGS84.

Tabla 4: Desplazamientos y velocidades. Mojón 5. Zona 1

Fecha	Δt (d)	$ \Delta r $ (cm)	<i>V</i> 5 (cm/d)
2018-06-01	0	0,00	
2018-06-06	5	4,96	0,992
2018-06-11	5	4,21	0,842
2018-06-19	8	7,99	0,999
2018-06-27	8	7,47	0,934
2018-07-06	9	6,36	0,707
2018-07-10	4	3,16	0,790
2018-07-16	6	3,32	0,553
2018-07-30	14	10,21	0,729

Tabla 5: Desplazamientos y velocidades. Mojón 7. Zona 1

Fecha	Δt (d)	$ \Delta r $ (cm)	<i>V</i> 7 (cm/d)
2018-06-01	0	0,000	
2018-06-06	5	3.326	0,665
2018-06-11	5	1.756	0,352
2018-06-19	8	5.221	0,653
2018-06-27	8	3.826	0,478
2018-07-06	9	4.174	0,464
2018-07-10	4	1.703	0,426
2018-07-16	6	2.846	0,474
2018-07-30	14	4.174	0,298

La velocidad promedio observada *V*₀ entre dos fechas, se calculó como la media aritmética de las velocidades individuales de los mojones.

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^l V_i}{l} \quad (9)$$

siendo *l* = número de mojones (del inglés *landmarks*). El valor *V*₀ es la medida para la variable predictiva *V* del modelo.

2.3 Modelo geológico del área de estudio.

El modelo geológico se construyó a partir de estudios de sísmica de refracción.

Se realizaron 4 líneas sísmicas por cada zona: una principal en sentido de la pendiente de la ladera y 3 en sentido transversal. La Fig. A5 del apartado Anexo muestra la ubicación de las líneas sísmicas para cuatro de estas zonas investigadas.

La interpretación de los perfiles sísmicos se muestra en la Fig. A6, en el apartado Anexo.

Los materiales se caracterizan de acuerdo a la velocidad de onda de corte *V*_s, de la siguiente manera (Fuente. HIDROSANBARTOLO, 2019):

-Capa con *V*_s = 300 – 500 m/s, podría tratarse de suelos blandos y materiales de acarreo entremezclados con fragmentos rocosos.

-Capa con *V*_s = 600m/s, podría tratarse de suelos muy duros o materiales coluviales pobremente consolidados. Rocas metamórficas altamente alteradas.

-El estrato con *V*_s = 1 200m/s, litológicamente podría tratarse de rocas metamórficas blandas, alteradas y fracturadas, con permeabilidad secundaria importante debido a las fracturas.

-Para *V*_s = 2 000 a 2 500 m/s , litológicamente podría tratarse de rocas metamórficas blandas, de muy alteradas a medianamente alteradas y fracturadas, lo que le confiere una permeabilidad

secundaria. Este sería probablemente el piso sobre el que deslizarían las capas superiores en un evento desestabilizador.

-La capa con velocidad $V_s = 3\ 000\ m/s$, denota rocas con mejores características geo mecánicas, de baja compresibilidad. La capacidad de carga al igual que la resistencia al corte son medias a altas; permeabilidad primaria muy baja.

Por tal motivo, se considera que esta capa no está afectada por la presión de poros.

La interpretación de los perfiles sísmicos con los datos geológicos, permite la construcción de un modelo en dos dimensiones el cual, proporciona información útil para estimar la altura de la masa afectada por la presión de poros, representada por la variable h_s : Dado que la capa con velocidad de onda 2000 a 2500 m/s se conforma de roca fracturada, posee permeabilidad secundaria, y estará afectada por la presión de poros. Como la capa con $V_s = 3000\ m/s$ corresponde a roca impermeable, el espesor h_s se determina a partir del nivel superior de la roca impermeable, hasta el límite superior dado por la posición del nivel freático.

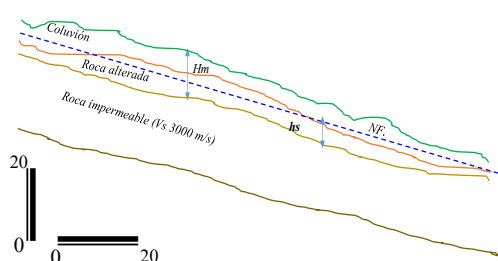


Figura 3: Esquema para el cálculo de h_s : Escala: indicadas. Fuente: HIDROSANBARTOLO, 2017.

En la Fig. 3: Si Hm es el espesor total promedio de la masa deslizante, y NF la profundidad del nivel freático,

$$h_s = Hm - NF. \tag{10}$$

La profundidad del nivel freático se investigó practicando cuatro calicatas en cada zona inestable. Para cada zona, en la Tabla 6 se reporta el promedio de las profundidades observadas.

Tabla 6: Profundidades estimadas del nivel freático.

Zona No.	Profundidad del nivel freático NF (m).
1	3.50
2	4.00
3	6.00
4	6.00
5	5.23
6	6.45

En la Tabla 7 se presentan los espesores promedios Hm y el cálculo de h_s para cada zona.

Tabla 7: Espesor de masa afectada por la presión de poros.

Zona No.	Hm (m)	N.F. (m)	$h_s = Hm - N.F.$ (m)
1	18.80	3.50	15.30
2	19.85	4.00	15.85
3	8.00	6.00	2.00
4	19.95	6.00	13.95
5	20.33	5.23	15.10
6	22.55	6.45	16.10

El principal resultado obtenido, ha sido lograr establecer un modelo predictivo de la velocidad de deslizamientos, partiendo de las condiciones de precipitación media máxima y caudal medio máximo del río Negro, y establecer umbrales de riesgo.

El período de la investigación comprendió desde 2016-08-02 hasta 2019-11-19.

Para cada zona, los parámetros de resistencia al corte de la matriz del coluvión, se determinaron mediante ensayos de corte triaxiales no drenados.

Tabla 8: Resultados de ensayos de corte triaxiales no drenados. (Fuente: HIDROSANBARTOLO).

Zona No.	C (kN/m ²)	ϕ (°)
1	27,12	3,05
2	75,00	19,60
3	60,00	16,37
4	90,99	4,13
5	60,00	16,37
6	61,35	20,50

La permeabilidad del coluvión se determinó insitu en cuatro puntos de cada ladera en estudio, mediante el método de ensayo Lefranc [6].

Tabla 9: Coeficientes de permeabilidad. (Fuente: HIDROSANBARTOLO).

Zona No.	k (cm/s)
1	0,0630
2	0,0244
3	0,0700
4	0,0800
5	0,0330
6	0,0901

La Tabla 10 muestra el área para cada zona con reptación. Las regiones delimitadas por los escarpes contienen hondonadas y pantanos que constituyen zonas de potencial infiltración.

Tabla 10: Área de los deslizamientos

Zona No.	Abcisas	Área A (m ²)
1	3+114 – 3+300	257 200
2	3+650 – 3+753	228 500
3	3+900 – 4+093	302 500
4	4+400 – 4+731	518 100
5	4+790 – 4+900	395 600
6	4+900 – 5+493.	350 400

La pendiente de cada ladera se calculó como la media ponderada entre la longitud de los rumbos ortogonales a las grietas de tracción.

Para la zona 1 por ejemplo, se pueden establecer dos direcciones de movimientos (Fig. A3): 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 605 msnm con pendiente $j_2 = 155 / 630.74 = 0.256$. La pendiente media ponderada en la longitud total es:

$$j = \frac{0.162 \times 648.93 + 0.256 \times 630.74}{1279.67} = 0.208$$

Tabla 11: Pendiente de los deslizamientos

Zona No.	Abcisas	Pendiente j
1	3+114 – 3+300	0,203
2	3+650 – 3+753	0,261
3	3+900 – 4+093	0,235
4	4+400 – 4+731	0,156
5	4+790 – 4+900	0,184
6	4+900 – 5+493.	0,197

La precipitación media se calculó a partir de los registros diarios de lluvias de un pluviómetro ubicado en la cuenca del río Negro a 2.2 kilómetros de la zona 1.

En cada intervalo de tiempo de medición de la velocidad, el área bajo la curva de precipitación, dividida para el intervalo de tiempo representa la precipitación media. Por ejemplo, entre el 11 y 19 de junio 2018 el área bajo la gráfica es igual a 108.40 mm x d (Fig. 4), que dividida para 8 días da 13.55 mm.

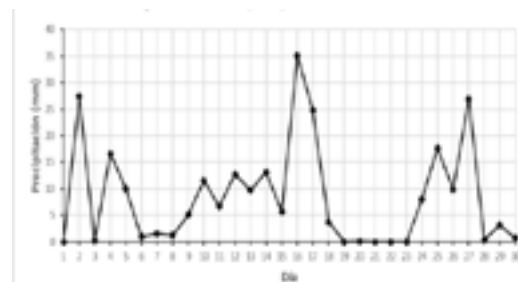


Figura 4: Registro diario de precipitación. Junio 2018.

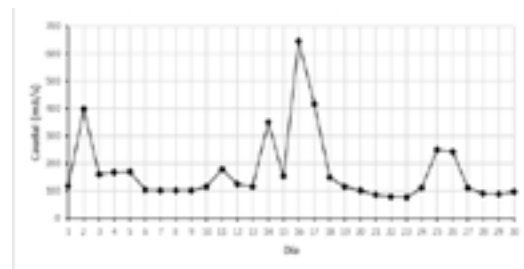


Figura 5: Registro diario de caudales. Junio 2018.

De manera similar, el caudal medio en este período de tiempo es igual al área bajo la curva de caudales, 2103.52 (m³ / s) x d, dividida para 8 días, que da 262.94 m³ / s (Fig. 5).

3. RESULTADOS.

Con los parámetros obtenidos, se realizaron gráficos de dispersión para obtener la mejor función de ajuste f_3 .

En las Figs. A7 a A9 del apartado Anexo, se muestran los cuadros de cálculo de los parámetros adimensionales Π para cada zona.

En la Fig. A10 del apartado Anexo se muestra el ajuste entre parámetros adimensionales Π .

Sustituyendo (3) y (4) en Y y X respectivamente, se determinaron las siguientes expresiones:

Zona 1

$$V = \frac{5,3}{kA} P^{0,300} Q^{0,850} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0,575} \quad (10)$$

Zona 2:

$$V = \frac{4,92}{kA} P^{0,044} Q^{0,978} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0,511} \quad (11)$$

Zona 3:

$$V = \frac{8,57}{kA} P^{0,228} Q^{0,886} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0,557} \quad (12)$$

Zona 4:

$$V = \frac{14,99}{kA} P^{0,032} Q^{0,984} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0,508} \quad (13)$$

Zona 5:

$$V = \frac{11,68}{kA} P^{0,024} Q^{0,988} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0,506} \quad (14)$$

Zona 6:

$$V = \frac{8,67}{kA} P^{0,016} Q^{0,992} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0,504} \quad (15)$$

Las ecuaciones halladas pueden expresarse mediante la fórmula general:

$$V = \frac{m}{kA} P^p Q^q \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^n \quad (16)$$

,con $P \geq 0,54mm$; $n > 0,500$. $k \wedge A > 0$.

El coeficiente m puede definirse como un factor de influencia del área de reptación, ya que se correlaciona muy bien con esta variable, como muestra la Fig. 6.

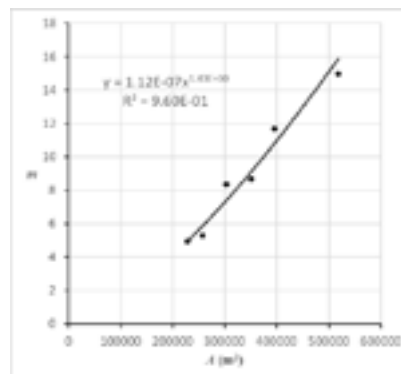


Figura 6: Correlación entre el coeficiente m y el área A .

$$m = (1.12 \times 10^{-7}) A^{1.43} \quad (17)$$

-Para definir los exponentes, se calculó la media aritmética de los valores obtenidos en (10) a (15): $p = 0,108$; $q = 0,946$; $n = 0,527$. (18)

-Reemplazando (17) y (18) en (16), se obtuvo la Ley General de reptación de coluviones:

$$V = \frac{1.12 \times 10^{-7} (A)^{0.43}}{k} P^{0.108} Q^{0.946} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0.527} \quad (19)$$

3.1 Relación entre la velocidad del modelo V y la velocidad observada V_o .

- Se determinaron coeficientes de correlación lineal r entre velocidades del modelo y las observadas, de 0.55 a 0.85. (Fig. A11 del apartado Anexo).

- Para el fenómeno estudiado, en base a los coeficientes de correlación obtenidos, la fuerza de asociación entre velocidades observadas y del modelo, estadísticamente se clasifica entre moderada a alta [7].

3.2 Descripción de los movimientos en masa.

Cruden & Varnes (1996) [4], clasifican el movimiento como Muy lento, Lento, Moderado, Rápido, Muy rápido y extremadamente rápido, para 6 valores típicos de la velocidad (Figs. 1 y 2).

En un período de siete días durante la investigación se obtuvieron: P máxima = 28,15 mm, Q máximo = 259,21 m³/s

Aplicando (19) se determinaron los siguientes tipos de movimientos en masa:

Tabla 12: Descripción de movimientos para condiciones hidrometeorológicas críticas (7 días)

Zona No:	V (cm/d)	Descripción
1	2,132	Lento
2	2,197	Lento
3	0,902	Lento
4	1,670	Lento
5	1,883	Lento
6	0,599	Lento

Desplazamiento máximo = 15,38 cm. Zona 2

3.4 Umbrales de precipitación y caudal para movimiento “Moderado”.

Aplicando (19), para $P=18\text{mm}$ y $Q=600\text{ m}^3/\text{s}$, se desencadenará el movimiento moderado en las laderas 1, 2 y 5, ($V > 5.0\text{ cm/d}$).

Tabla 13: Velocidades de reptación para los umbrales de precipitación y caudal de movimiento moderado ($5 < V < 150\text{ cm/d}$).

Zona No:	V (cm/d)	Descripción
1	6,29	Moderado
2	6,51	Moderado
5	5,47	Moderado

4. CONCLUSIONES.

- La ley de reptación encontrada es aplicable a movimientos en masa constituidos por rocas metamórficas (pizarras y esquistos grafiticos), con elevado nivel freático y erosión fluvial, en laderas de cuencas hidrográficas, con poder predictivo moderado.

- Constantes del modelo: proporcionalidad directa con la potencia 0.108 de la precipitación y la potencia 0.945 del caudal fluvial, lo que revela una mayor influencia de la socavación lateral en la velocidad de reptación. El término $((g h_s j) / (\tan\phi))^{0.527}$ expresa la similitud cinemática.

- Otra constante es la potencia 0.43 del área interior de los escarpes. Físicamente, esto puede interpretarse en el sentido de que existen regiones protegidas por vegetación, en donde la infiltración se reduce por la interceptación.

- Proporcionalidad inversa con la permeabilidad k : en suelos con permeabilidad muy pobre el agua no drena con facilidad, siendo mayor la resistencia al flujo, y se generan mayores fuerzas de filtración, causando que las laderas aceleren su movimiento. La Zona 2, que tiene la permeabilidad más baja, experimenta las mayores velocidades.

- Las condiciones climáticas e hidrológicas de esta región, desencadenarán movimientos

“lentos” a “moderados”, siendo poco probable que se desencadenen movimientos “rápidos”. La zona más vulnerable ante la ocurrencia de lluvias y caudales es la No2, la cual tiene la máxima pendiente, factor agravante para el movimiento.

- Si se desencadenan movimientos moderados muy frecuentes, las condiciones de saturación y niveles freáticos alcanzarían valores críticos, siendo probable el paso a movimientos rápidos, por la cedencia de los materiales de las laderas, mayormente conformadas por roca alterada.

- Se producirán desplazamientos promedios de las masas, desde 6,29 hasta 15,38 centímetros. No es recomendable edificar en esta región, dado que estos desplazamientos causarían daños en las estructuras. Aunque, según la escala de Cruden y Varnes los daños serán reparables, las estructuras necesitarán mantenimiento frecuente, afectando la economía de los propietarios.

- El control del drenaje, subdrenaje y revestimientos con escolleras en el pie de las laderas constituyen la mejor solución para disminuir los movimientos en masa. Las obras indicadas se ejecutaron con recursos de HIDROSANBARTOLO dando resultados favorables: Disminución de la velocidad en un 70% y reducción de la socavación del río.

Bibliografía:

Libros.

[1] Edward A. Keller y Robert H. Blodgett, Riesgos naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Madrid: Pearson. Prentice Hall, 2007.

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

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

Artículos.

[4] David M. Cruden and David J. Varnes. “Landslides types and processes”, Transportation Research Board, 1996.

Libros

[5] J. C. Gibbings, Dimensional Analysis. London: Springer, 2011.

[6] J. L. Marinas, Geología aplicada a la Ingeniería Civil. (2da ed.), Madrid: DOSSAT, 2000, pp. 161 – 162.

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

ANEXO.

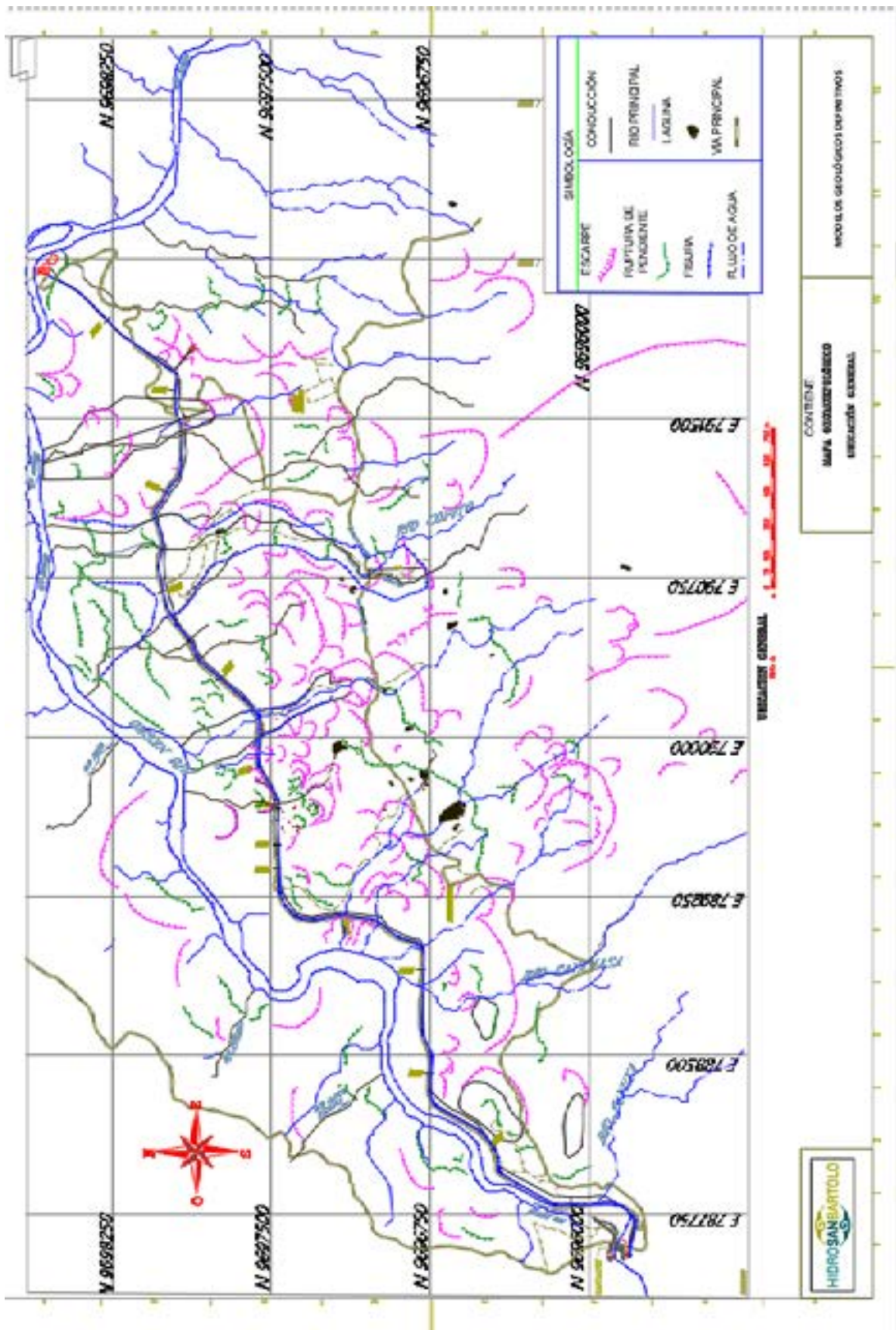


Figura A2. Marco topográfico de grietas y zonas inestables. (FUENTE: HIDROSANBATOLO).

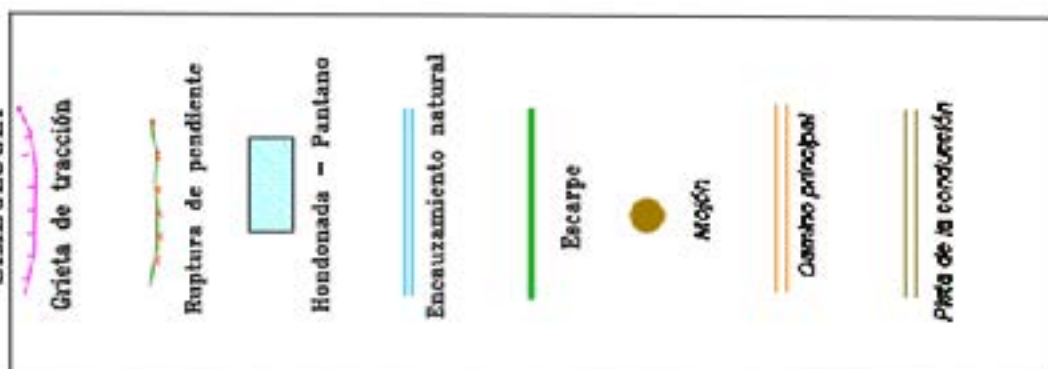
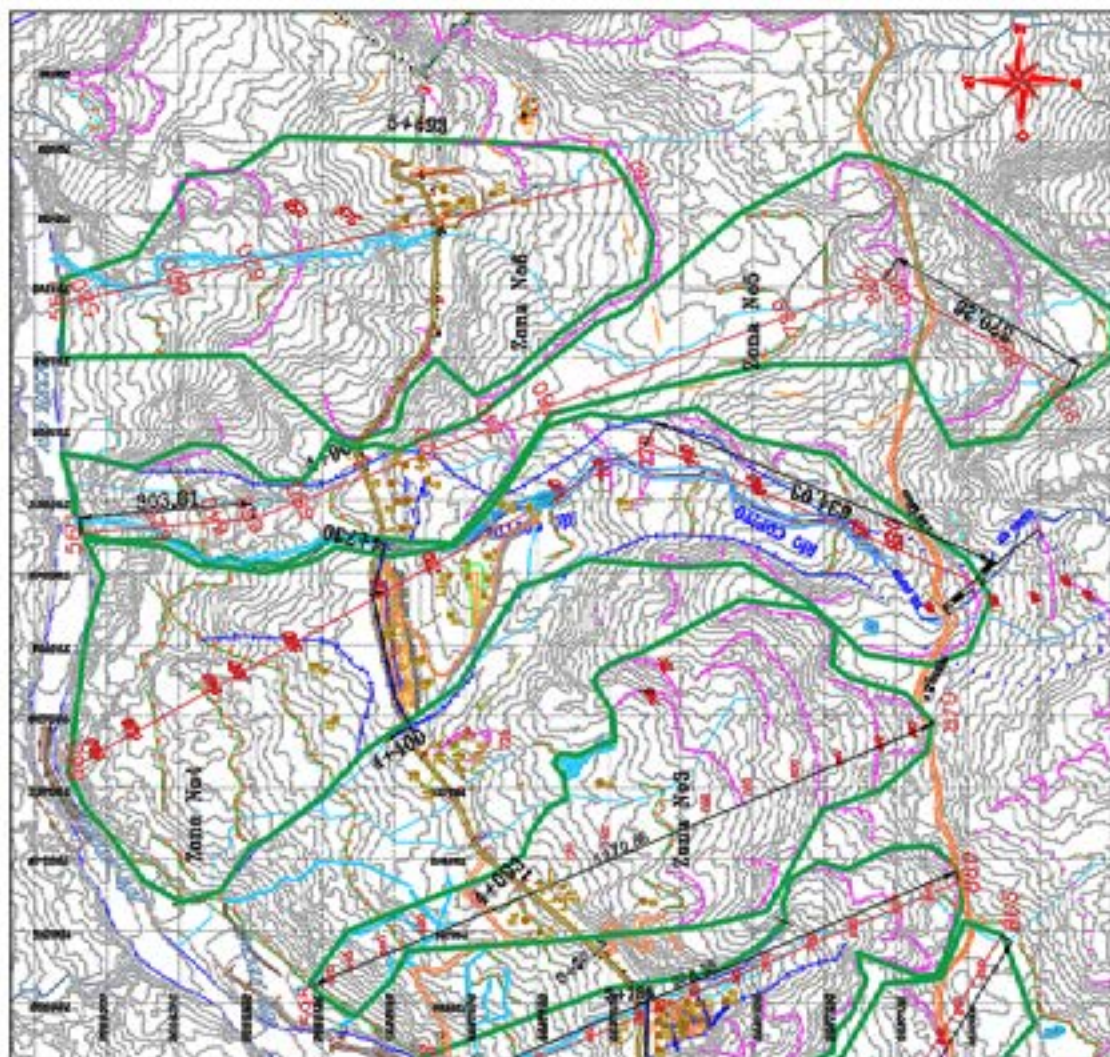


Figura A4: Mapa topográfico de escarpes y ubicación de mojones: Zonas inestables 3, 4, 5 y 6.

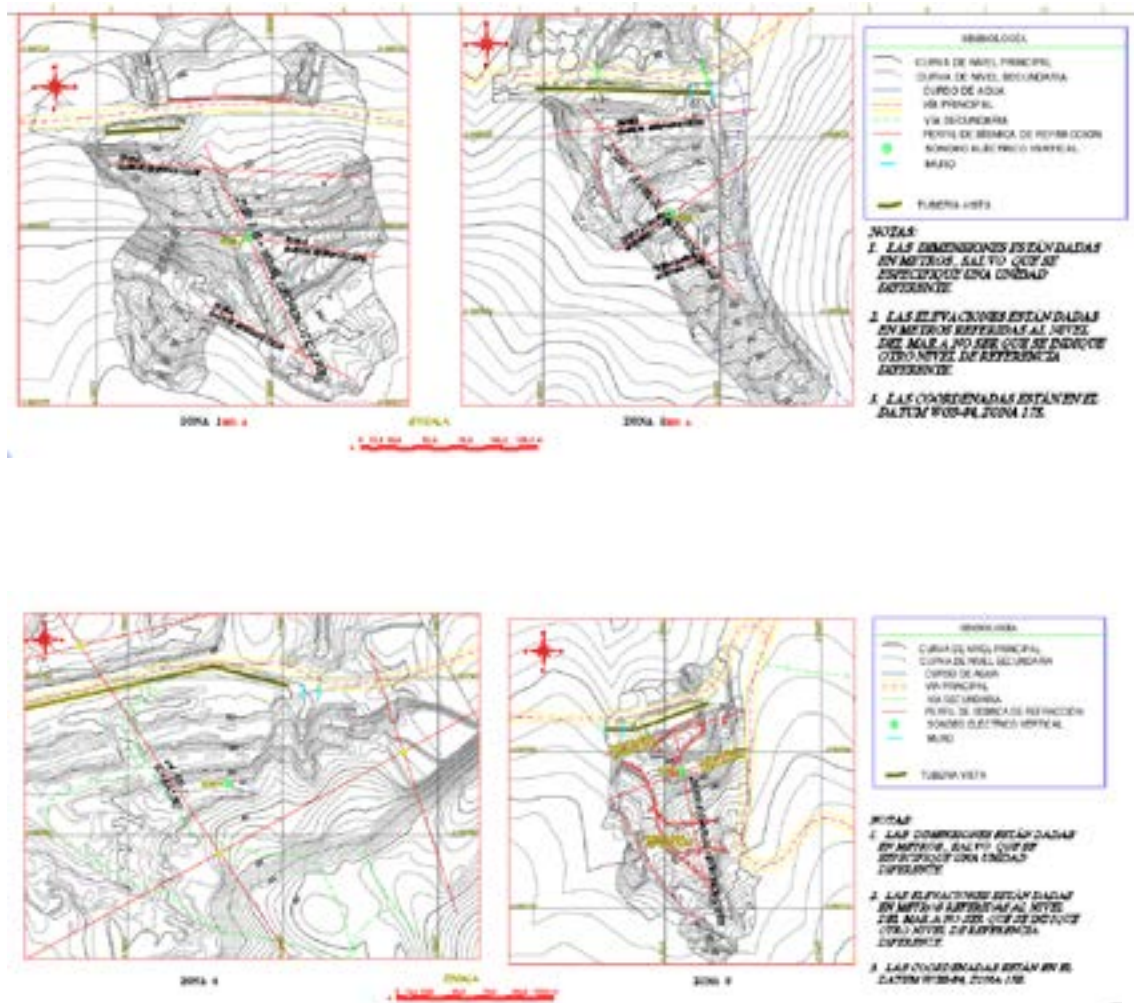


Figura A5: Líneas sísmicas levantadas en zonas inestables.

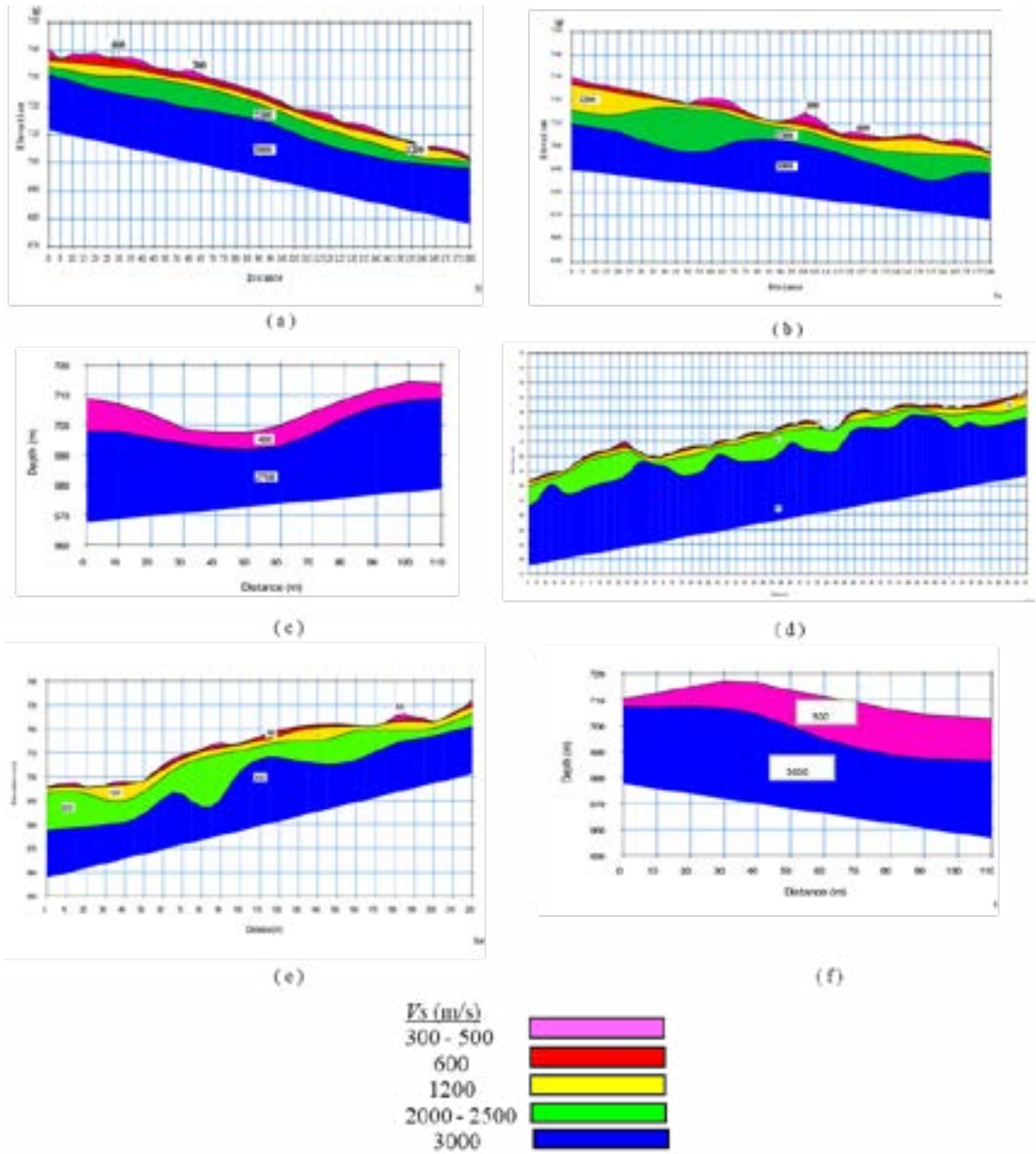


Figura A6. Perfiles sísmicos de cada zona: (a) Zona 1. (b) Zona 2. (c) Zona 3. (d) Zona 4. (e) Zona 5. (f) Zona 6.

FECHA	Vo (cm/día)	P (mm)	Q (m ³ / s)	$X = \frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A P^2}{Q^2}$
8/10/2016	1.354	6.96	190.00	37.195	29.436
8/15/2016	1.885	10.70	190.00	207.460	96.813
8/29/2016	0.932	5.61	71.20	111.859	93.778
9/16/2016	0.921	7.70	65.47	468.392	206.262
9/29/2016	0.820	7.71	86.11	273.228	106.667
11/1/2016	1.611	3.77	50.01	46.352	148.525
11/14/2016	1.971	9.73	65.16	1209.528	712.553
11/30/2016	1.685	11.58	47.82	4507.209	1602.926
3/14/2017	6.298	3.28	51.92		
3/31/2017	3.181	8.68	46.06	1528.752	1829.220
4/19/2017	2.521	13.84	80.86	3211.845	1196.944
5/2/2017					
7/31/2017	1.639	6.73	103.92	108.675	111.356
8/15/2017	1.639	2.23	50.31	5.624	52.328
9/6/2017	0.843	4.31	34.59	164.544	211.787
9/26/2017	1.152	6.70	62.10	299.448	217.510
10/11/2017	0.790	5.91	45.47	337.642	216.261
10/15/2017	1.242	6.16	35.50	654.737	606.344
10/31/2017	1.931	14.38	128.59	1481.632	391.622
11/6/2017	2.267	4.14	14.92	756.683	2831.774
11/14/2017	1.244	14.74	33.03	24780.261	4015.268
11/27/2017	1.755	4.55	59.39	69.307	166.690
3/19/2018	1.689	3.46	56.66	25.618	102.187
4/3/2018	1.000	14.08	51.90	8339.566	1191.446
4/18/2018	1.219	8.73	56.86	1027.848	465.500
4/24/2018	0.693	5.77	79.83	99.307	58.581
6/1/2018	0.822	16.60	209.56	989.434	83.601
6/6/2018	0.822	13.23	172.66	588.034	78.221
6/11/2018	0.678	6.43	84.24	137.823	64.014
6/19/2018	0.760	13.79	234.14	377.179	42.715
6/27/2018	0.713	10.03	103.67	539.115	108.104
7/6/2018	0.621	1.22	57.67	0.377	4.480
7/10/2018	0.598	5.84	55.43	216.279	107.550
7/16/2018	0.531	8.41	115.43	214.683	45.617
7/30/2018	0.595	10.76	161.29	295.298	42.925
8/13/2018	0.509	9.02	89.35	474.785	84.056
8/20/2018	1.228	10.86	127.75	487.200	143.723
8/28/2018	0.821	13.11	221.13	345.954	46.794
9/3/2018	0.694	10.93	78.25	1335.531	219.521
9/11/2018	1.175	6.14	179.71	25.140	22.199
9/17/2018	0.932	5.07	18.85	1061.452	1090.984
9/25/2018	0.428	3.51	18.04	267.713	263.116
10/1/2018	0.491	3.89	8.93	1647.719	1512.953
10/17/2018	0.229	7.52	45.34	889.587	102.009
10/26/2018	0.314	1.36	7.79	32.373	155.163
11/6/2018	0.281	7.39	42.31	951.303	138.919
11/20/2018	0.416	12.22	67.07	2834.345	223.710
11/28/2018	0.707	7.53	43.22	985.327	347.957
12/4/2018	0.550	13.15	25.82	25671.994	2311.102
12/12/2018	0.590	8.26	48.22	1143.375	280.247
12/19/2018	0.597	4.67	57.09	83.597	64.712
1/3/2019	0.450	5.10	62.58	98.590	48.314
1/17/2019	0.563	5.34	30.93	484.828	271.372
2/6/2019	0.462	14.00	100.29	2182.199	145.606
2/13/2019	0.957	10.69	117.76	537.992	127.727
2/19/2019	0.588	7.78	67.32	463.374	127.465
2/25/2019	1.352	9.65	57.95	1477.863	607.499
3/12/2019	0.409	7.75	48.85	863.573	166.865
3/19/2019	0.489	15.14	64.17	7292.647	441.069
3/26/2019	0.698	5.41	74.95	87.073	58.904
4/2/2019	0.611	10.12	94.23	676.351	114.145
4/16/2019	0.338	9.01	38.53	2544.413	300.145
5/1/2019	0.361	12.50	66.18	3193.057	208.998
5/21/2019	0.462	11.21	125.89	570.183	59.341
5/28/2019	0.302	5.52	67.08	118.204	33.124
6/11/2019	0.702	13.58	122.33	1298.540	139.992
6/19/2019	0.978	12.00	140.23	603.360	115.994
6/26/2019	0.963	6.94	190.32	36.555	20.712
7/2/2019	0.826	8.18	125.55	162.809	56.886
7/9/2019	0.517	6.14	111.55	65.175	25.340
7/17/2019	0.479	7.37	99.90	169.036	42.256
7/23/2019	1.043	18.06	190.72	1672.949	151.553
8/1/2019	0.553	4.31	103.58	18.330	15.481
8/7/2019	0.523	12.55	139.57	728.663	68.480
8/13/2019	0.413	2.12	49.40	4.707	12.291
9/2/2019	0.348	9.38	116.46	325.886	36.537
9/12/2019	0.534	6.94	78.51	67.568	17.727
9/20/2019	0.327	5.38	76.45	82.093	26.237
10/4/2019	0.201	6.68	34.99	927.615	118.390
10/9/2019	0.342	14.35	56.24	7670.842	361.262
10/22/2019	0.225	10.29	67.06	1425.515	85.847
11/7/2019	0.354	11.33	70.09	1917.988	149.967

(a)

FECHA	Vo (cm/día)	P (mm)	Q (m ³ / s)	$X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$
8/2/2016					
8/10/2016	0.930	9.78	190.00	28.875	13.731
8/15/2016	0.737	6.20	190.00	4.654	4.370
8/29/2016	0.747	5.61	72.00	21.792	25.298
9/16/2016	0.453	7.70	66.27	91.073	34.031
9/29/2016	0.773	7.71	84.91	55.982	35.551
10/11/2016	0.634	5.19	64.02	20.113	23.193
11/1/2016	0.525	2.97	39.28	5.715	16.677
11/14/2016	0.760	9.74	65.96	235.673	92.351
11/30/2016	0.771	11.58	48.62	868.615	244.052
12/13/2016	0.989	4.30	26.82	54.359	141.957
1/6/2017	0.456	4.54	38.73	32.358	34.992
1/16/2017	0.926	10.51	67.58	304.340	124.845
2/2/2017	0.764	6.76	55.65	76.960	62.934
2/13/2017	0.927	4.44	52.83	15.818	36.451
3/3/2017	0.072	9.84	47.58	472.961	17.239
3/14/2017	0.091	3.28	36.15	10.096	4.193
3/31/2017	0.911	9.66	46.98	449.368	214.707
4/19/2017	0.881	13.40	76.50	628.835	150.759
5/2/2017	1.421	15.75	90.89	849.082	237.883
5/15/2017	1.154	13.19	77.23	578.289	187.667
5/30/2017	1.032	7.07	61.65	74.796	75.624
6/14/2017	0.933	13.32	100.62	354.317	91.139
7/3/2017	0.996	6.49	74.97	36.031	41.639
7/14/2017	1.092	5.31	105.56	8.128	15.396
7/31/2017	0.924	14.05	187.18	126.895	29.044
8/1/2017	0.943		78.50		
8/15/2017	0.890	2.39	51.11	1.431	10.880
8/31/2017	0.439	5.19	39.66	52.604	41.926
9/26/2017	1.138	5.46	52.93	36.097	67.470
10/11/2017	1.187	5.91	46.27	64.967	107.952
10/30/2017	1.262	13.40	115.31	276.663	95.044
11/14/2017	0.975	9.53	25.97	1394.316	731.939
12/1/2017	1.400	5.51	57.58	31.596	71.385
12/5/2017	3.585	13.89	49.09	1759.898	1599.942
12/28/2017	1.482	6.58	27.20	289.250	483.760
1/8/2018	1.662	2.94	11.99	59.326	557.523
1/22/2018	0.891	17.86	86.21	1559.707	213.059
2/1/2018	2.201	4.48	52.10	16.842	90.546
2/15/2018	0.323	4.29	26.51	54.902	47.185
2/27/2018	2.354	5.80	53.26	45.609	155.841
3/7/2018	0.269	9.21	33.57	726.528	112.720
3/19/2018	1.534	3.46	57.46	4.963	31.061
4/3/2018	1.187	14.08	52.70	1611.350	472.128
4/18/2018	1.578	8.73	57.67	199.121	201.656
4/24/2018	0.696	5.77	80.63	19.393	19.865
6/1/2018					
6/6/2018	1.136	10.55	173.46	46.934	23.429
6/11/2018	0.862	6.43	85.04	26.943	27.469
6/19/2018	1.277	13.79	234.94	74.631	24.522
6/27/2018	1.035	10.03	104.47	105.764	53.227
7/2/2018	0.925	1.47	73.15	0.099	2.082
7/10/2018	0.643	3.37	57.01	4.518	12.512
7/16/2018	0.588	8.41	116.23	42.182	17.149
7/24/2018	0.817	16.74	206.67	209.763	29.887
7/30/2018	0.804	2.79	102.66	0.657	3.317
8/14/2018	0.693	8.42	93.69	65.278	31.194
8/20/2018	0.700	12.67	157.15	118.823	25.352
8/29/2018	0.773	11.66	138.86	109.114	30.376
9/3/2018	0.716	13.12	78.91	542.395	110.326
9/11/2018	0.762	6.14	110.77	13.183	13.042
9/17/2018	0.499	5.07	17.74	238.620	226.738
9/27/2018	0.428	3.88	21.50	55.870	77.638
10/1/2018	0.412	3.16	16.40	42.383	85.462
10/17/2018	0.261	7.52	42.43	202.390	45.676
10/26/2018	0.282	1.36	8.59	5.304	39.544
11/6/2018	0.323	7.39	43.11	182.550	52.817
11/14/2018	0.382	8.83	38.15	476.387	114.189
11/19/2018	0.658	18.77	103.99	1308.567	119.570
11/26/2018	0.513	9.26	48.50	355.867	104.189
12/3/2018	0.437	8.24	31.77	521.440	164.183
12/12/2018	0.403	9.92	48.39	470.869	94.432
12/19/2018	0.506	4.67	57.89	16.197	18.352
2/14/2019	4.047	14.78	125.58		
2/19/2019	1.387	6.98	55.88	86.650	120.622
3/11/2019	0.847	8.69	51.48	245.626	134.593
3/19/2019	0.269	13.28	74.48	638.251	47.704
3/27/2019	0.179	6.54	70.98	41.331	8.487
4/1/2019	0.211	9.71	112.00	80.779	8.827
4/16/2019	0.167	8.41	71.78	110.857	12.765
5/1/2019	0.236	12.50	66.98	621.014	45.805
5/14/2019	0.243	12.35	122.50	176.497	13.749
5/28/2019	0.258	7.31	105.04	29.513	6.958
6/11/2019	0.451	13.58	151.13	169.493	20.300
6/19/2019	0.565	12.00	141.14	118.656	22.753
6/26/2019	0.701	6.94	193.14	7.071	5.043
7/1/2019	0.856	9.80	137.64	55.505	

FECHA	V_0 (cm/día)	P (mm)	Q (m ³ /s)	$X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \phi}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$
6/1/2018	0.083	14.30	208.74	15.064	8.285
6/11/2018	0.083	7.41	126.47	2.959	6.060
6/27/2018	0.156	10.49	165.57	6.933	13.246
7/10/2018	0.045	1.55	49.93	0.036	0.923
7/24/2018	0.043	12.19	169.59	12.051	4.659
8/14/2018	0.080	6.75	89.88	4.034	9.603
8/29/2018	0.068	11.90	194.95	8.282	5.384
9/11/2018	0.139	8.71	137.13	4.804	11.857
9/27/2018	0.071	4.26	16.00	20.193	107.229
10/17/2018	0.017	7.00	34.76	31.191	14.461
11/5/2018	0.061	3.96	24.81	6.271	32.818
11/20/2018	0.069	10.43	62.78	47.129	40.070
12/3/2018	0.049	8.75	32.61	86.521	74.419
12/17/2018	0.033	6.38	49.40	10.657	11.740
1/17/2019	0.038	4.24	49.63	2.060	5.843
2/14/2019	0.038	13.40	106.74	44.418	12.695
3/11/2019	0.048	8.14	46.45	31.939	31.439
4/16/2019	0.016	8.11	73.86	12.447	3.963
5/14/2019	0.061	11.13	120.08	16.704	11.043
5/29/2019	0.011	10.23	115.70	12.842	1.778
6/13/2019	0.031	8.96	88.98	12.777	6.586
6/18/2019	0.103	16.00	187.89	29.138	15.796
6/25/2019	0.046	7.30	194.71	1.176	1.369
7/1/2019	0.216	8.08	134.00	3.726	16.631
7/8/2019	0.019	5.10	92.26	1.248	1.233
7/17/2019	0.062	5.86	106.52	1.631	3.963
7/22/2019	0.053	17.53	224.57	29.391	6.881
8/7/2019	0.072	6.86	112.59	2.742	5.699
8/12/2019	0.053	0.96	48.24	0.006	0.447
9/4/2019	0.049	7.89	115.07	4.594	4.898
9/11/2019	0.046	7.20	71.62	8.223	9.950
9/24/2019	0.099	4.49	78.46	1.036	6.880
10/3/2019	0.051	4.90	26.61	12.779	36.952
1/3/2020	0.135	10.26	66.50	39.331	68.114
2/27/2020	0.246	4.91	56.87	2.821	38.845
3/31/2020	0.124	6.00	42.88	11.063	51.519
6/16/2020	0.067	11.67	117.79	20.983	13.961
8/4/2020	0.078	8.67	93.75	10.091	14.174
8/25/2020	0.119	9.19	56.15	35.510	67.330
9/1/2020	0.152	1.39	7.69	0.991	105.435
9/15/2020	0.505	3.39	33.14	1.888	111.824
10/22/2020	0.360	8.88	57.58	29.438	181.165
11/5/2020	0.754	1.27	9.97	0.411	259.022
11/10/2020	0.124	2.69	5.00	32.875	759.993
11/17/2020	0.817	2.15	5.00	13.416	3197.965
11/24/2020	0.080	7.34	32.98	41.887	83.908
12/8/2020	0.238	9.80	34.47	121.847	408.192
12/15/2020	0.091	3.46	20.00	5.624	57.943
12/22/2020	0.614	6.26	49.61	9.794	207.014
12/30/2020	0.240	6.96	8.30	534.655	3573.526
1/5/2021	0.238	6.03	22.10	42.489	375.751
1/13/2021	0.542	6.50	40.57	17.023	294.876
1/19/2021	0.237	3.30	41.23	1.095	32.102
1/26/2021	0.363	13.60	93.44	61.501	162.803
2/3/2021	0.306	7.80	81.21	8.810	59.854
2/10/2021	0.518	7.09	55.13	13.050	181.289
2/24/2021	0.164	8.66	30.73	93.485	276.270
3/9/2021	0.275	11.64	96.94	30.662	84.049
3/23/2021	0.075	5.56	31.62	15.003	49.103
3/30/2021	0.093	20.94	91.30	362.042	103.431
4/6/2021	0.440	9.36	112.86	9.458	64.071
4/13/2021	0.193	3.36	58.68	0.581	13.389
4/21/2021	0.113	10.17	73.85	30.788	45.177
5/4/2021	0.165	19.31	84.23	307.602	184.056
5/17/2021	0.270	18.26	203.34	42.204	46.066

FECHA	V_0 (cm/día)	P (mm)	Q (m ³ /s)	$X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \phi}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$
8/11/2016	0.295	8.69	193.20	45.124	24.778
8/15/2016	2.573	7.74	193.20	28.398	171.192
8/29/2016	0.716	5.61	46.03	138.075	440.761
9/15/2016	0.236	5.72	67.10	70.224	71.040
9/29/2016	0.175	9.01	86.51	260.082	78.797
10/11/2016	0.219	5.01	74.86	33.204	40.653
11/1/2016	0.082	2.79	44.46	9.054	13.420
11/14/2016	0.405	9.74	67.16	589.330	353.105
11/30/2016	0.186	11.58	49.82	2139.790	415.585
12/13/2016	0.229	3.85	37.12	47.095	102.261
1/6/2017	0.108	4.53	40.94	74.220	54.668
1/16/2017	0.328	10.51	68.78	761.827	317.386
2/1/2017	0.225	7.18	63.94	191.978	117.751
2/13/2017	0.340	4.07	47.29	36.246	104.470
3/3/2017	0.123	9.84	48.46	1179.228	209.607
3/14/2017	0.190	3.28	37.35	24.505	60.861
3/31/2017	0.149	9.66	48.06	1113.624	248.769
4/18/2017	0.151	14.01	83.52	1631.385	176.334
5/2/2017	0.148	14.63	83.60	1935.984	187.827
5/15/2017	0.490	13.20	78.43	1457.897	575.242
5/30/2017	0.132	7.57	62.85	245.537	79.088
6/14/2017	0.291	13.58	112.81	789.842	175.129
7/3/2017	0.212	6.49	76.17	90.318	63.727
7/14/2017	0.299	4.19	96.97	9.681	23.146
8/1/2017	0.218	13.27	177.66	290.376	50.503
8/15/2017	0.529	2.39	52.31	3.538	45.888
9/5/2017	0.505	4.32	36.59	76.836	291.665
9/26/2017	0.291	6.57	64.10	134.030	126.577
10/11/2017	0.826	5.91	47.47	159.921	530.968
10/30/2017	0.445	13.40	116.51	702.124	244.075
11/14/2017	0.494	9.53	27.17	3300.497	2516.911
11/30/2017	0.260	4.84	60.55	44.229	68.966
12/28/2017	0.446	7.97	30.99	1241.237	1222.135
1/22/2018	0.136	11.29	54.75	1603.007	239.308
2/15/2018	0.137	4.37	38.37	72.930	73.652
3/6/2018	0.203	6.31	45.96	221.683	158.458
4/2/2018	0.122	9.13	53.15	726.226	149.130
4/24/2018	0.108	10.12	64.75	739.097	109.073
7/3/2018	0.629	1.23	57.49	0.201	11.845
7/9/2018	0.299	2.62	43.49	7.321	44.941
7/24/2018	0.390	13.04	164.29	316.705	101.984
8/14/2018	0.230	7.84	127.78	68.344	35.941
8/20/2018	0.605	12.67	138.61	395.745	209.253
8/28/2018	0.514	13.11	223.13	175.382	73.545
9/3/2018	0.520	10.93	100.84	415.053	253.373
9/11/2018	0.707	6.14	105.89	37.378	98.384
9/25/2018	0.389	4.18	19.37	239.939	749.910
10/3/2018	0.245	4.22	10.10	916.689	1771.563
10/17/2018	0.205	7.85	48.23	482.171	224.754
10/25/2018	0.784	1.38	10.80	9.186	530.833
10/29/2018	0.860	8.29	34.79	1151.144	2023.798
11/5/2018	0.666	6.96	45.41	336.957	649.691
11/12/2018	0.741	6.79	30.66	666.352	1504.015
11/19/2018	1.050	16.79	94.04	2655.774	1388.097
11/26/2018	0.342	9.26	49.70	878.040	491.573
12/3/2018	0.762	8.24	32.97	1254.455	1973.399
12/11/2018	0.481	9.50	41.59	1390.537	1040.443
12/17/2018	0.550	4.48	64.76	28.453	109.316
1/3/2019	0.767	5.62	65.14	69.330	236.584
1/7/2019	1.083	10.24	47.12	1461.199	2118.589
1/16/2019	0.617	2.59	22.19	26.986	348.294
1/25/2019	0.591	8.66	99.46	167.571	185.421
1/31/2019	0.832	15.29	66.44	3658.879	1827.287
2/12/2019	0.727	13.39	132.49	541.176	307.673
2/19/2019	0.606	8.59	77.89	265.419	305.568
2/25/2019	0.879	9.65	59.95	712.767	944.393
3/1/2019	0.761	8.28	49.56	565.803	881.335
3/26/2019	1.036	9.60	76.27	431.834	680.547
4/15/2019	0.948	9.39	82.07	340.533	513.827
4/24/2019	1.066	15.78	71.69	3561.758	2141.092
5/1/2019	1.190	6.71	62.23	155.026	574.258
5/10/2019	1.000	11.93	120.56	411.294	405.824
5/14/2019	1.321	13.29	127.86	563.181	591.192
5/22/2019	1.139	8.02	129.34	72.997	181.454
5/29/2019	1.225	8.93	76.52	320.558	691.186
6/11/2019	1.132	12.75	125.27	497.389	486.240
6/18/2019	0.661	12.93	136.39	443.571	246.314
6/21/2019	0.899	11.32	259.21	72.095	70.983
6/25/2019	1.015	4.70	166.45	5.202	33.554
7/1/2019	0.995	8.38	130.02	86.300	171.540

(a).

(b).

Figura A8. Cálculo de parámetros adimensionales II: (a) Zona 3. (b) Zona 4.

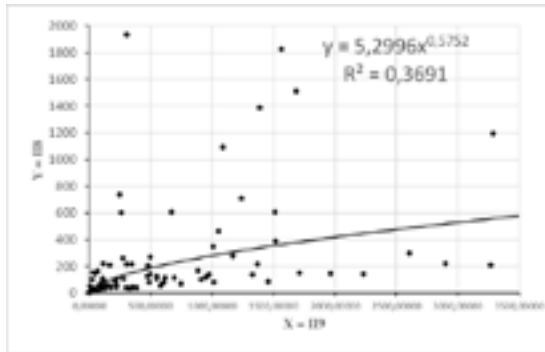
FECHA	Vo (cm/d)	P (mm)	Q (m³/s)	$X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$
11/1/2016					
11/14/2016	0.896	9.74	51.30	316.084	421.551
11/30/2016	0.853	11.58	43.92	863.579	774.866
12/13/2016	0.759	4.30	27.77	41.134	237.932
1/6/2017	0.416	4.54	37.15	28.518	81.169
1/16/2017	0.922	10.51	68.78	238.540	281.065
2/1/2017	0.723	7.18	61.15	65.730	130.129
2/13/2017	0.818	4.07	45.46	12.241	85.472
3/3/2017	0.782	9.84	48.46	369.235	420.959
3/14/2017	0.89	3.28	37.35	7.673	89.604
3/31/2017	1.005	9.66	48.18	346.959	527.485
4/18/2017	1.479	14.01	78.08	584.467	621.688
5/2/2017	0.114	14.63	83.60	606.188	45.577
8/31/2017	0.390	4.59	41.16	24.22979249	63.315
9/19/2017	0.194	6.32	59.94	41.06620027	28.156
10/11/2017	0.321	4.27	46.70	14.0970235	35.035
10/30/2017	0.260	12.07	116.88	143.6806749	36.197
11/14/2017	0.284	9.61	27.94	1010.39324	438.614
11/30/2017	0.235	4.93	60.18	15.0845721	20.589
12/28/2017	0.258	7.52	32.00	288.8158947	186.005
1/22/2018	0.202932	4.10	53.82	9.021894097	15.375
2/15/2018	0.1934315	13.13	107.42	238.1981001	37.727
3/6/2018	0.1618601	5.21	45.96	32.26044686	27.155
4/2/2018	0.1691388	7.02	53.15	79.49007641	38.513
4/24/2018	1.5921129	9.50	65.58	175.1367154	436.138
6/11/2018	0.8058859	6.83	126.81	12.51574279	30.522
6/27/2018	0.7887278	10.49	170.90	38.33939689	38.792
7/9/2018	0.6431851	1.59	50.49	0.231868513	8.327
7/24/2018	0.6060526	11.44	164.29	58.68273897	38.361
8/14/2018	0.6488272	6.17	94.07	15.14550142	36.439
8/28/2018	0.7174601	12.81	190.25	68.80340276	42.465
9/11/2018	0.6978315	8.45	138.23	24.67685778	34.045
9/25/2018	0.3568928	4.31	20.39	76.79577613	208.277
10/17/2018	0.4444015	6.73	34.71	157.4916704	218.134
11/5/2018	0.3921638	4.12	28.60	32.5754556	106.239
12/4/2018	1.3335451	9.46	51.59	278.2956369	585.400
12/17/2018	1.0528135	5.91	52.06	41.62362937	177.107
1/16/2019	0.7237033	4.08	53.41	8.981922266	55.123
2/12/2019	0.8606703	12.89	109.91	211.3425477	154.539
3/11/2019	0.7639129	8.40	59.18	131.4752749	200.932
4/2/2019	0.9607457	8.70	80.97	80.81247666	144.800
4/15/2019	0.9290251	8.64	72.54	97.93762143	172.056
5/1/2019	0.8465101	8.90	67.52	127.2755095	192.007
5/22/2019	0.702263	10.41	161.98	41.39260651	37.865
5/28/2019	0.7654436	10.88	80.15	201.7326878	184.142
6/13/2019	0.6649274	10.40	103.25	101.4926212	88.077
6/25/2019	0.6244915	12.30	194.51	55.95061563	32.602
7/1/2019	0.5352483	8.08	137.71	20.78643157	24.057
8/7/2019	1.4119162	7.72	126.30	20.59335256	68.869
8/30/2019	1.6396219	8.51	159.61	19.03998749	60.852
9/6/2019	1.7990576	3.89	48.32	9.069727501	152.216

(a)

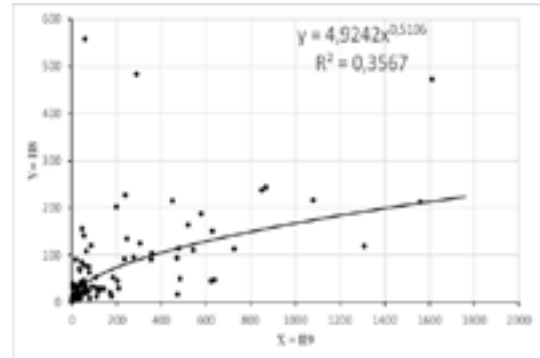
FECHA	Vo (cm/d)	P (mm)	Q (m³/s)	$X = \frac{(P)^4 g h_w j}{(Q)^2 \tan \theta}$	$Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$
8/11/2016	0.4191066	8.69	190.00	13.162	27.662
8/15/2016	0.5026788	7.75	190.00	8.296	26.341
8/29/2016	0.3461281	5.61	73.20	15.394	64.129
9/16/2016	0.2674617	7.70	67.47	64.153	109.759
9/29/2016	0.2834915	7.71	84.91	40.876	73.784
10/11/2016	0.2761585	5.19	65.22	14.150	55.054
11/1/2016	0.1768866	2.97	40.48	3.929	29.936
11/14/2016	0.2458872	9.74	67.16	165.984	163.050
11/30/2016	0.5436186	11.58	49.82	604.040	927.075
12/13/2016	0.3656328	4.30	28.02	36.365	271.963
1/6/2017	0.2686231	4.54	39.93	22.228	109.635
1/16/2017	0.1096205	10.51	68.78	214.530	80.694
2/1/2017	0.3061029	7.18	62.02	57.651	129.538
2/13/2017	0.1592349	4.07	47.47	10.104	36.860
3/3/2017	0.304785	9.84	48.78	328.554	391.488
3/14/2017	0.160412	3.28	37.35	6.906	39.013
3/31/2017	0.1954302	9.66	48.18	311.969	247.663
4/18/2017	0.362874	14.15	83.37	479.973	329.631
5/2/2017	0.4498892	14.63	83.60	544.841	434.194
5/15/2017	0.2358978	13.19	78.43	409.420	210.380
5/30/2017	0.2004326	7.07	62.85	52.548	79.909
6/14/2017	0.2243056	13.32	101.82	252.646	121.040
7/3/2017	0.1584382	6.49	76.17	25.486	36.298
7/14/2017	0.1897317	5.31	106.76	5.802	14.797
8/1/2017	0.1374575	13.27	180.77	79.038	23.368
8/15/2017	0.1480385	2.39	52.31	0.997	9.768
9/5/2017	0.0569716	4.32	36.59	21.730	25.089
9/19/2017	0.0896256	9.09	72.16	108.920	44.804
10/11/2017	0.047953	4.52	47.63	15.318	13.620
10/30/2017	0.1498076	13.40	116.51	197.868	62.522
11/14/2017	0.0888135	9.53	27.17	930.125	344.616
11/30/2017	0.0791	4.84	60.55	12.464	15.942
12/28/2017	0.1591083	7.97	31.60	335.923	318.970
1/22/2018	0.1833229	11.29	41.16	799.368	435.279
2/15/2018	0.1687212	4.37	38.37	20.553	68.903
3/6/2018	0.1055218	6.31	45.96	62.390	62.688
4/2/2018	0.1157328	9.13	53.15	204.660	107.667
4/24/2018	0.2025206	8.87	64.76	122.999	119.883
5/31/2018	0.4350566	16.69	214.83	139.818	82.771
6/11/2018	0.4350566	8.94	126.81	33.012	68.139
6/27/2018	0.2305095	11.91	170.90	57.327	35.299
7/9/2018	0.1287594	1.92	42.17	0.637	8.425
7/24/2018	0.1227135	13.04	164.29	89.252	24.391
8/14/2018	0.1345086	6.64	94.07	18.237	21.107
8/28/2018	0.1712379	12.92	188.33	65.422	25.422
9/11/2018	0.1465398	8.19	138.23	19.627	16.235
9/25/2018	0.0954364	4.18	20.39	61.066	126.460
10/17/2018	0.0334529	6.53	34.71	125.596	37.337
11/5/2018	0.1047753	4.89	28.60	58.283	96.674
11/20/2018	0.1465342	11.44	64.49	342.767	145.407
12/3/2018	0.2798169	8.92	37.25	379.727	506.046
12/17/2018	0.1616039	7.35	51.52	91.510	103.716
1/16/2019	0.086144	5.33	49.61	27.226	31.318
2/12/2019	0.1530977	12.90	105.31	207.847	72.449
3/12/2019	0.1137416	8.37	59.56	114.949	70.775
4/16/2019	0.0905539	9.51	79.28	108.526	41.133
5/23/2019	0.1270859	11.22	99.74	132.792	50.752
5/29/2019	0.1497021	9.90	80.93	122.090	70.654
6/13/2019	0.1634945	11.24	121.40	90.246	44.223
6/18/2019	0.3112014	17.52	152.44	337.469	129.630
6/25/2019	0.2749256	7.54	206.21	6.313	11.579
7/1/2019	0.3198855	8.38	130.02	24.321	41.941
7/9/2019	0.5736883	5.37	103.29	6.481	48.876
7/18/2019	0.2684026	7.08	103.97	19.385	39.290
7/23/2019	0.5385596	20.71	207.17	356.764	169.729
8/6/2019	0.2412635	8.15	123.43	24.062	33.142
8/13/2019	0.3092917	1.81	52.80	0.324	11.518
9/4/2019	0.2806088	9.12	111.89	45.961	58.772
9/11/2019	0.1342649	6.49	81.14	22.470	27.114
10/10/2019	0.0736442	7.56	55.25	89.005	43.468

(b)

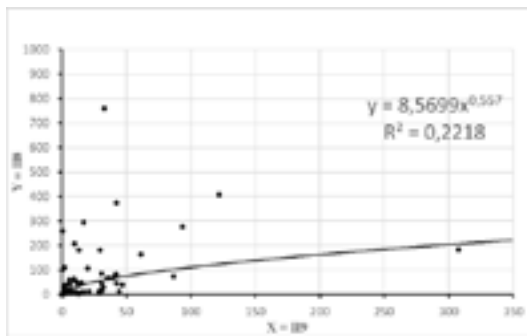
Figura A9. Cálculo de parámetros adimensionales II: (a) Zona 5. (b) Zona 6.



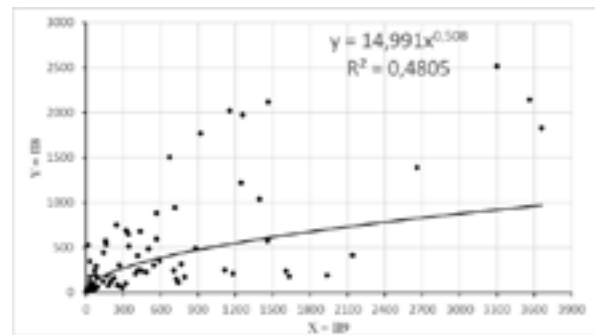
(a)



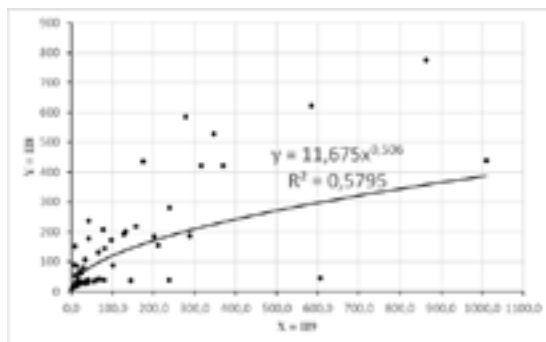
(b)



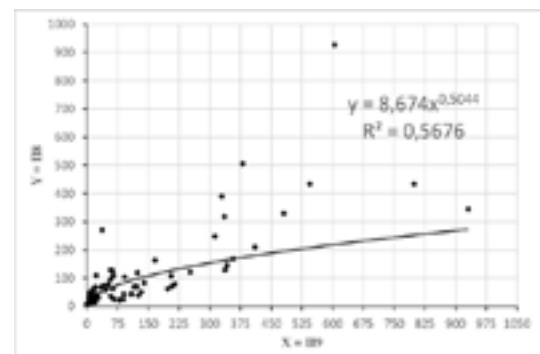
(c)



(d)



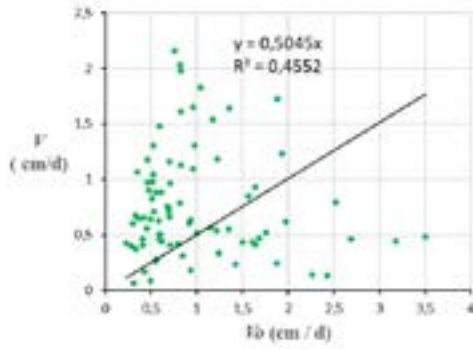
(e)



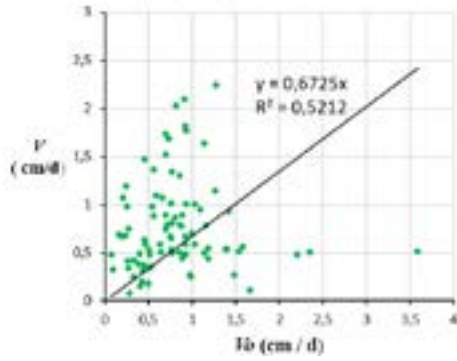
(f)

Figura A10: Función de ajuste entre parámetros IP8 y IP9: (a) Zona 1. (b) Zona 2. (c) Zona 3. (d) Zona 4. (e) Zona 5. (f) Zona 6.

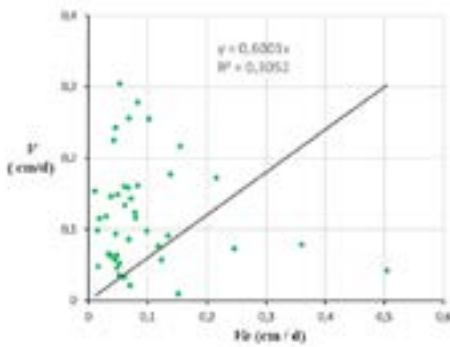
Ochoa. Estudio de la Velocidad de Reptación en Coluviales mediante el Análisis Dimensional.



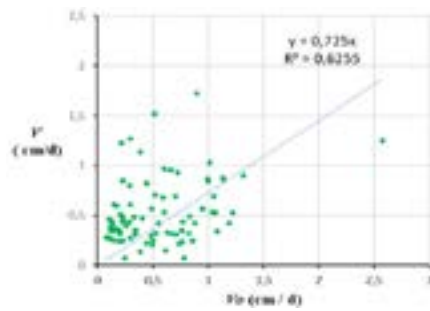
(a) $r = 0.67$. Asociación moderada



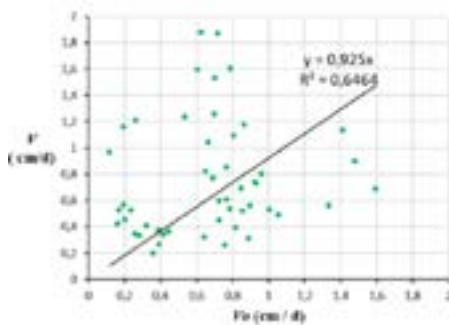
(b) $r = 0.72$. Asociación moderada



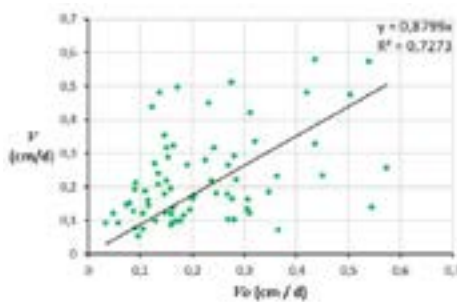
(c) $r = 0.55$ Asociación moderada



(d) $r = 0.79$ Asociación alta



(e) $r = 0.80$ Asociación alta



(f) $r = 0.85$ Asociación alta

Figura A11: Correlación entre velocidades observadas y del modelo: (a) Zona 1. (b) Zona 2. (c) Zona 3. (d) Zona 4. (e) Zona 5. (f) Zona 6.