

Investigación de los efectos hidrometeorológicos sobre los movimientos de masas en laderas de depósitos coluviales

Investigation of the Hydrometeorological Effects on Mass Movements on Slopes of Colluvial Deposits

Mario Patricio Ochoa Cañizares^{1*}

Resumen

Esta investigación tiene el propósito de exponer la deducción de una ley para predecir la velocidad de reptación de laderas conformadas por coluviones, afectadas por un elevado nivel freático y erosión hídrica, partiendo de dos variables predictivas: la precipitación y el caudal medios fluviales que causa socavación lateral en la base. La metodología consistió en la toma semanal a quincenal 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 fue determinado a partir de estudios de geofísica y ensayos de suelos. Para elaborar el modelo matemático se utilizó 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 modelo matemático obtenido ha dado resultados muy cercanos frente a valores observados de velocidad. Su aplicación más importante es identificar umbrales de precipitación y caudal que producirían un aumento en la actividad en 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 aims to expose the deduction of a law to predict the creeping speed of slopes formed by colluvions, and affected by a high-water table and water erosion, based on two predictive variables: the average rainfall and the average fluvial flow that causes lateral undercut at the base. The methodology consisted of taking weekly to fortnightly topographical coordinates of points on the ground called milestones, from which displacement and speed were calculated. The geological model was determined from geophysical studies and soil tests. To develop the mathematical model, Buckingham's Pi II Theorem was used, relating the observed speed and the characteristics of the soil with to the predictive variables through the combination of dimensionless parameters. The mathematical model obtained has given very close results compared to observed speed values. Its most important application is to identify precipitation and flow thresholds that would produce an increase in activity on colluvium slopes, based on risk assessment models.

Keywords: Buckingham, colluvion, permeability, crawling, velocity.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Naturaleza del problema investigado

Los movimientos en masa investigados 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 son materiales de diverso tamaño transportados por gravedad y la acción del agua. Su origen es local, producto de la alteración *in situ* de las rocas y posterior transporte como derrubios de ladera o depósitos de solifluxión (González de Vallejo, 2004). Frecuentemente, están asociados a masas inestables. Los depósitos investigados están caracterizados por rocas metamórficas (mayormente pizarras y filitas gráficas), englobados en una matriz (suelo

areno-limoso), que se distribuye irregularmente en las vertientes del territorio montañoso, habiéndose formado por alteración y desintegración *in situ*, de las rocas ubicadas en las laderas superiores adyacentes y por la acción de la gravedad. Presentan inestabilidad con grietas y fracturación en la superficie.

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 de una ladera (Keller y Blodgett, 2007).

La infiltración en la masa del suelo proviene del agua de vertientes en la ladera y del agua de lluvia, y se produce a través de los sistemas de grietas de tracción existentes que evidencian la descompresión del basamento rocoso, provocando el incremento de la presión de poros y del campo de las *fuerzas de filtración*, cuya magnitud

* Email: ingeochoa@hotmail.com

¹ Ingeniero civil. HIDROSANBARTOLO.



Figura 1. Zona de estudio en la cuenca del río Negro.

depende de la *permeabilidad* de la matriz del coluvión. Cuando los poros del sedimento se llenan de agua, se destruye la cohesión entre las partículas, permitiendo que se deslicen unas sobre otras con relativa facilidad. La saturación reduce la resistencia interna de los materiales, los cuales son puestos fácilmente en movimiento por la fuerza de la gravedad (Tarbuck y Lutgens, 2005). La socavación lateral que producen los cuerpos de agua de ríos, que fluyen en el pie de las laderas, disminuye su capacidad de sostenimiento.

Los procesos gravitacionales en la zona son movimientos *en masa* de tipo *reptación*, que es un movimiento superficial muy lento, prácticamente imperceptible, que afecta a suelos y materiales alterados, provocando deformaciones continuas que se manifiestan al cabo del tiempo en la inclinación o falta de alineación de árboles, vallas, muros, postes, etc. en las laderas. Es una de las formas más lentas de procesos gravitacionales (González de Vallejo, 2004). Cruden y Varnes (1996) la definen como movimientos graduales de rocas, escombros o suelo, a nivel superficial y subsuperficial pendiente abajo, sobre una o varias superficies de rotura. Esta definición se apega más a la naturaleza de los movimientos de coluviales estudiados, ya que, por su heterogeneidad, las superficies de rotura suelen alcanzar diversas profundidades. Otros autores (Highland y Bobrowsky, 2008) la definen como corrientes de tierra lenta (arrastre), causadas por una tensión cortante intensa, pero insuficiente para causar una falla.

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 (González de Vallejo, 2004).

La descripción del tipo de movimientos se realizó con base en la escala propuesta por Cruden y Varnes (1996) (figura 2), y es aplicable a movimientos de reptación, excluyendo hundimientos, colapsos o avalanchas que suelen producirse de modo violento.

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 (1996) consideran que la velocidad de movimiento puede ser el mejor parámetro para describir el potencial de daño de un deslizamiento. Sin embargo,

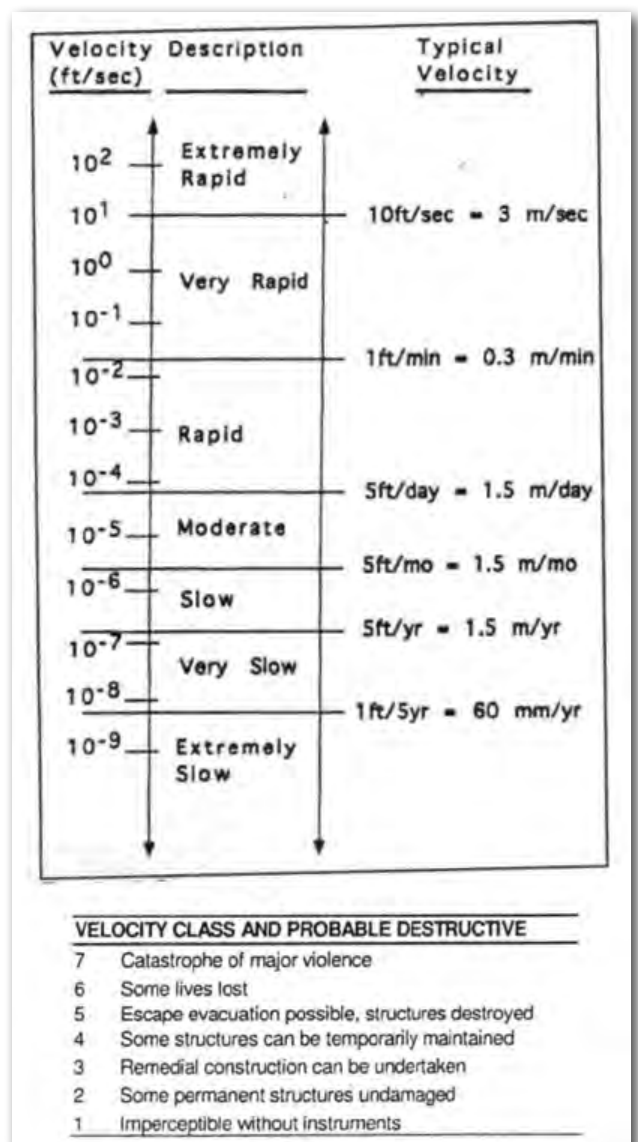


Figura 2. Escala tomada de Cruden y Varnes (1996) aplicable a procesos de reptación.

es muy difícil de predecir e incluso de medir. El modelo propuesto permitirá superar estas dificultades, y se espera contribuir al avance en posteriores investigaciones de esta importante área de la geología aplicada.

Los movimientos son de tipo traslacional, ya que los movimientos rotacionales se dan mayormente en laderas conformadas por suelos homogéneos (González de Vallejo, 2004).

Varios autores (Ferrer y Ayala, 1997) han establecido 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 (González de Vallejo, 2004).

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 y caudal medios del río) aplicable a coluviones. En estos materiales, la hidrogeología puede ser muy compleja por su heterogeneidad y, como consecuencia, estos muestran una respuesta errática ante los efectos de las lluvias (Suárez, 2009); por lo que el análisis estadístico de la información reveló una correlación moderada entre valores de velocidad observados y calculados.

La ley de reptación 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 a la precipitación y el caudal medios del río Negro. Estas 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, y de los estudios geofísicos y geotécnicos, fue proporcionada por HIDROSANBATOLO, que aprovecha las aguas del río Negro en esta zona, para la generación de energía eléctrica.

El período de la investigación comprendió desde el 2 de agosto de 2016 hasta el 19 de noviembre de 2019. Se investigaron seis zonas inestables, las cuales se designaron mediante el posicionamiento de la tubería de conducción de la central HIDROSANBARTOLO, cuyo trazado se desarrolla en este sector (tabla 1).

Tabla 1. Posicionamiento (abscisas) de las zonas inestables investigadas

| Zona | 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 |

1.2. Marco geológico regional

En la figura 3 se muestran las unidades geológicas que componen las laderas. La roca de la formación Napo deformada (K_{ND}) subyace a los depósitos coluviales (Q_c).

La región se ubica en el frente Subandino, que está afectada por fallas inversas, que han causado fracturaciones y

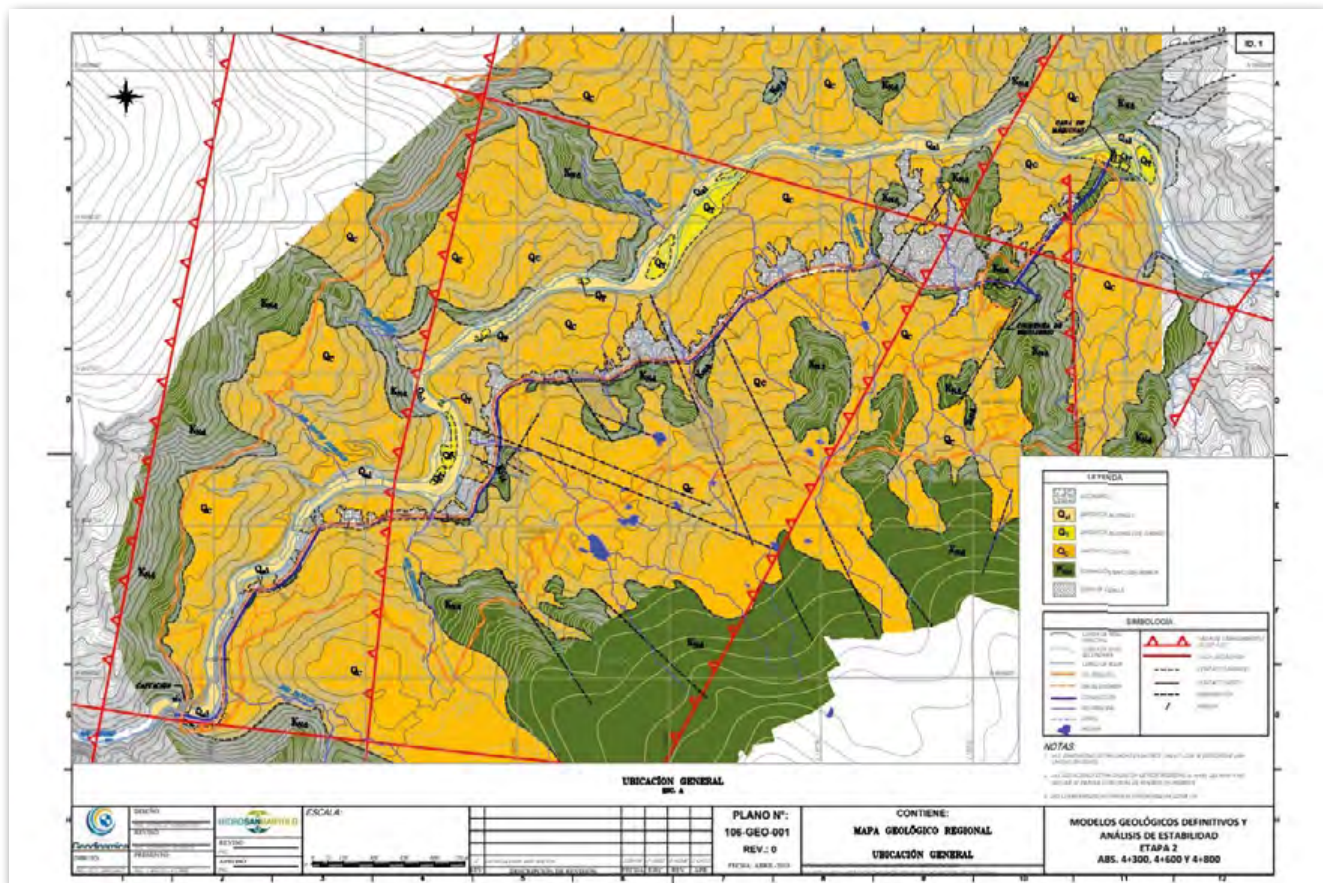


Figura 3. Marco geológico regional (Fuente: HIDROSANBARTOLO).

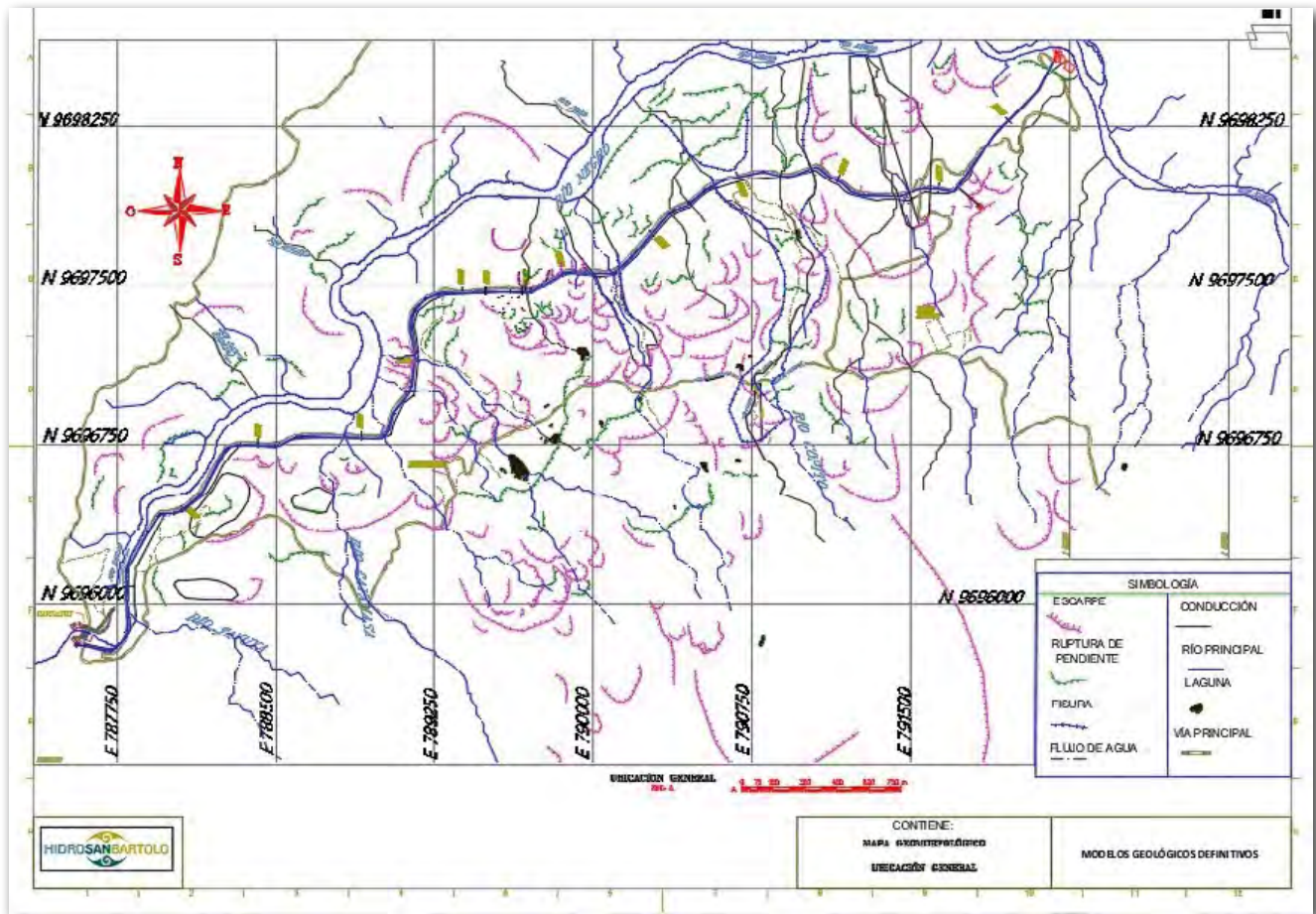


Figura 4. Plano topográfico de grietas, escarpes y zonas inestables.

cizallamientos en el basamento rocoso. La figura 4 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 (figuras 5 y 6).



Figura 5. Grieta de tracción hallada en la corona de la zona 1.



Figura 6. Grieta de tracción hallada en media ladera de la zona 4.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Explicación del método. Fundamento matemático

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 Gibbings (2011). 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.

El simbolismo para las dimensiones básicas (L para longitud y T para tiempo) corresponde al adoptado por el Sistema Internacional de Unidades (Gibbings, 2011).

Las dimensiones de las cantidades físicas que intervienen en el problema se expresan a partir de las básicas (tabla 2).

Tabla 2. Dimensiones de cantidades físicas (Gibbings, 2011)

| Cantidad | Dimensión | Símbolo |
|-------------|-----------------------|-----------|
| Velocidad | Longitud / tiempo | LT^{-1} |
| Aceleración | Velocidad / tiempo | LT^{-2} |
| Área | Longitud ² | L^2 |
| Volumen | Longitud ³ | L^3 |

2.2. Elección de variables

Las variables se eligen de manera que sean las más convenientes experimentalmente (Gibbings, 2011). Cada

variable y sus dimensiones se detallan como sigue (para denotar las dimensiones de una variable se utilizó el corchete []):

| | |
|---|--------------------------------------|
| V: Velocidad de reptación | [V]=LT ⁻¹ |
| P: Precipitación media | [P]=LT ⁰ |
| Q: Caudal medio fluvial | [Q]=L ³ T ⁻¹ |
| g: Aceleración de la gravedad | [g]=LT ⁻² |
| A: Área del deslizamiento | [A]=L ² T 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 ⁰ T ⁰ |
| tanφ: Tangente del ángulo de rozamiento interno de suelo | [tanφ]=L ⁰ T ⁰ |

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]=LT⁰. Esta notación será de utilidad en la deducción de los parámetros adimensionales.

Se adoptaron como variables fundamentales 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, y para las mismas, se verificó que el determinante de los exponentes de sus dimensiones es diferente de cero. 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 adimensionales Π:

| | |
|-------------------------------------|--------------|
| 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 Π, cuyas expresiones se obtienen como sigue:

Velocidad de reptación V:

$$\begin{aligned} \Pi 1 &= P^x Q^y V \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L T^{-1} \\ x + 3y + 1 &= 0, -y - 1 = 0 \\ x &= 2, y = -1 \end{aligned}$$

$$\Pi 1 = \frac{V P^2}{Q}$$

Aceleración de la gravedad g:

$$\begin{aligned} \Pi 2 &= (P)^x (Q)^y g \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L T^{-2} \\ x + 3y + 1 &= 0, -y - 2 = 0 \\ x &= 5, y = -2 \end{aligned}$$

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

Área del deslizamiento en planta A:

$$\begin{aligned} \Pi 3 &= P^x Q^y A \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L^2 \quad \therefore \\ x + 3y + 2 &= 0, -y = 0 \\ x &= -2, y = 0 \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} \Pi 4 &= P^x Q^y h_s \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L \quad \therefore \quad x + 3y + 1 = 0, -y = 0 \\ x &= -1, y = 0 \end{aligned}$$

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

Coeficiente de permeabilidad k:

$$\begin{aligned} \Pi 5 &= P^x Q^y k \\ L^0 T^0 &= L^x L^{3y} T^{-y} L T^{-1} \quad \therefore \\ x + 3y + 1 &= 0, -y - 1 = 0 \\ x &= 2, y = -1 \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} \Pi 6 &= j \\ \Pi 7 &= \tan \emptyset \end{aligned}$$

El teorema de Buckingham establece que existe alguna función f₁ tal que:

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

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

dado que se considera que estas variables explican en sí mismas el fenómeno (Gibbinngs, 2011).

Es posible mediante el producto de los parámetros Π combinar estos constituyendo nuevos parámetros, ya que son adimensionales.

Combinando los parámetros Π1, Π3 y Π5, se forma el parámetro Π8 que será igual a:

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

Combinando los parámetros Π2, Π4 y Π6 y el inverso del parámetro Π7, formamos el parámetro Π9 que es igual a:

$$\Pi 9 = \frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan \emptyset} \quad [4]$$

Se puede formar la función f₂ tal que:

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

Finalmente, si se asumen ciertas condiciones de regularidad y diferenciabilidad sobre la función anterior, podrá usarse el teorema de la función implícita, para expresar el parámetro Π8 que contiene la variable predecible V, mediante una función f₃ del parámetro Π9:

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

La función f_3 es desconocida, y se determinó calculando Π_8 y Π_9 con los datos de campo para cada una de las variables.

2.3. Escarpes. Implantación de mojones en el terreno

Los escarpes se representaron en un mapa topográfico, para determinar el área de cada zona inestable, representada por la variable A . En campo se procedió a la colocación manual de 77 mojones cilíndricos de hormigón de

resistencia 180 kg/cm² a 28 días, de 15 cm de diámetro y 30 de altura.

Para que los datos obtenidos reflejen mejor el resultado de la investigación, se colocaron los mojones 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; y (4), se colocaron a profundidad de 30 cm para evitar que su movimiento sea causado por perturbaciones extrañas a la reptación. Las figuras 7 y 8 muestran el escarpe principal para cada zona, los mojones instalados y rasgos morfológicos.

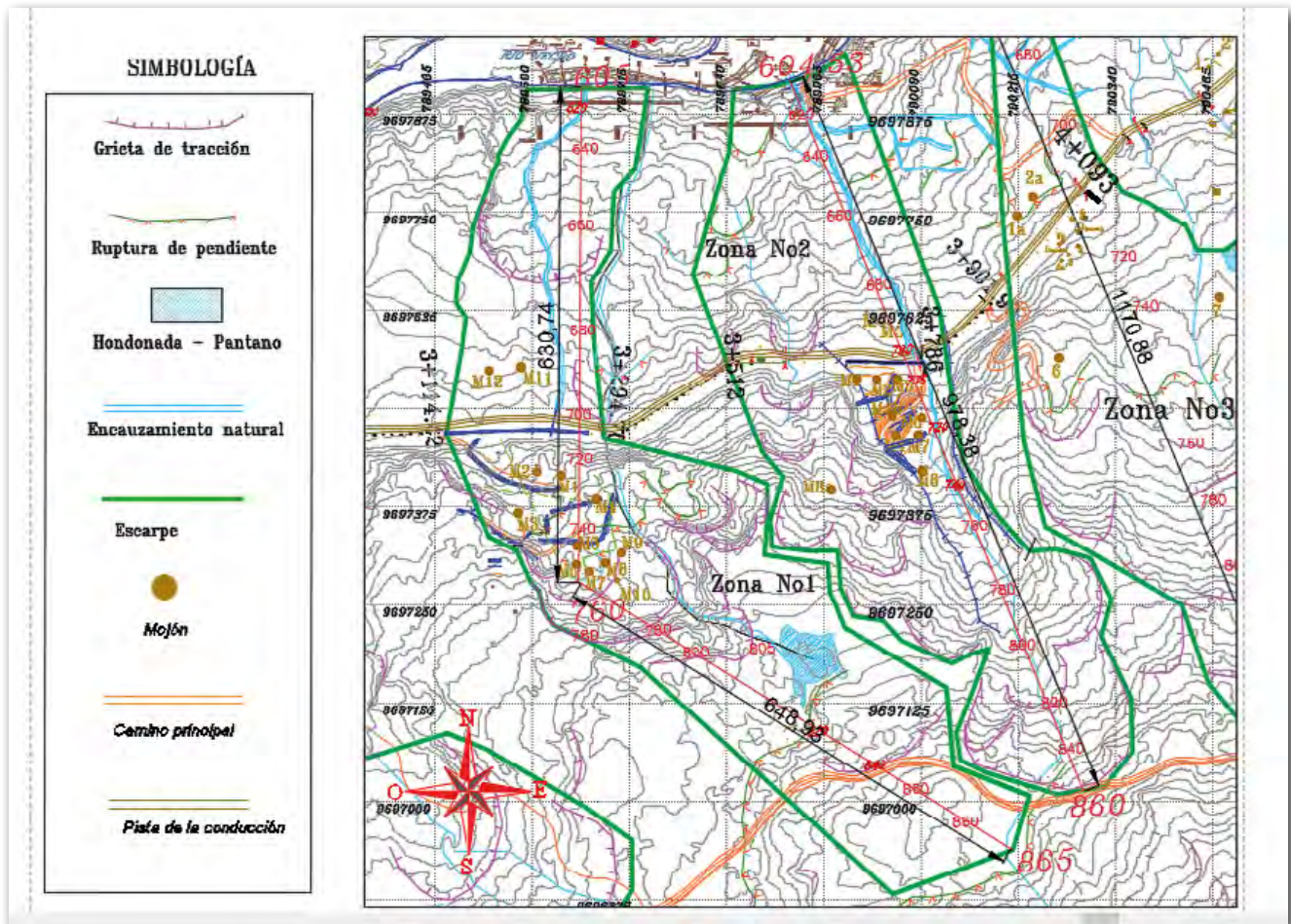


Figura 7. Escarpes y ubicación de mojones. Zonas 1 y 2.

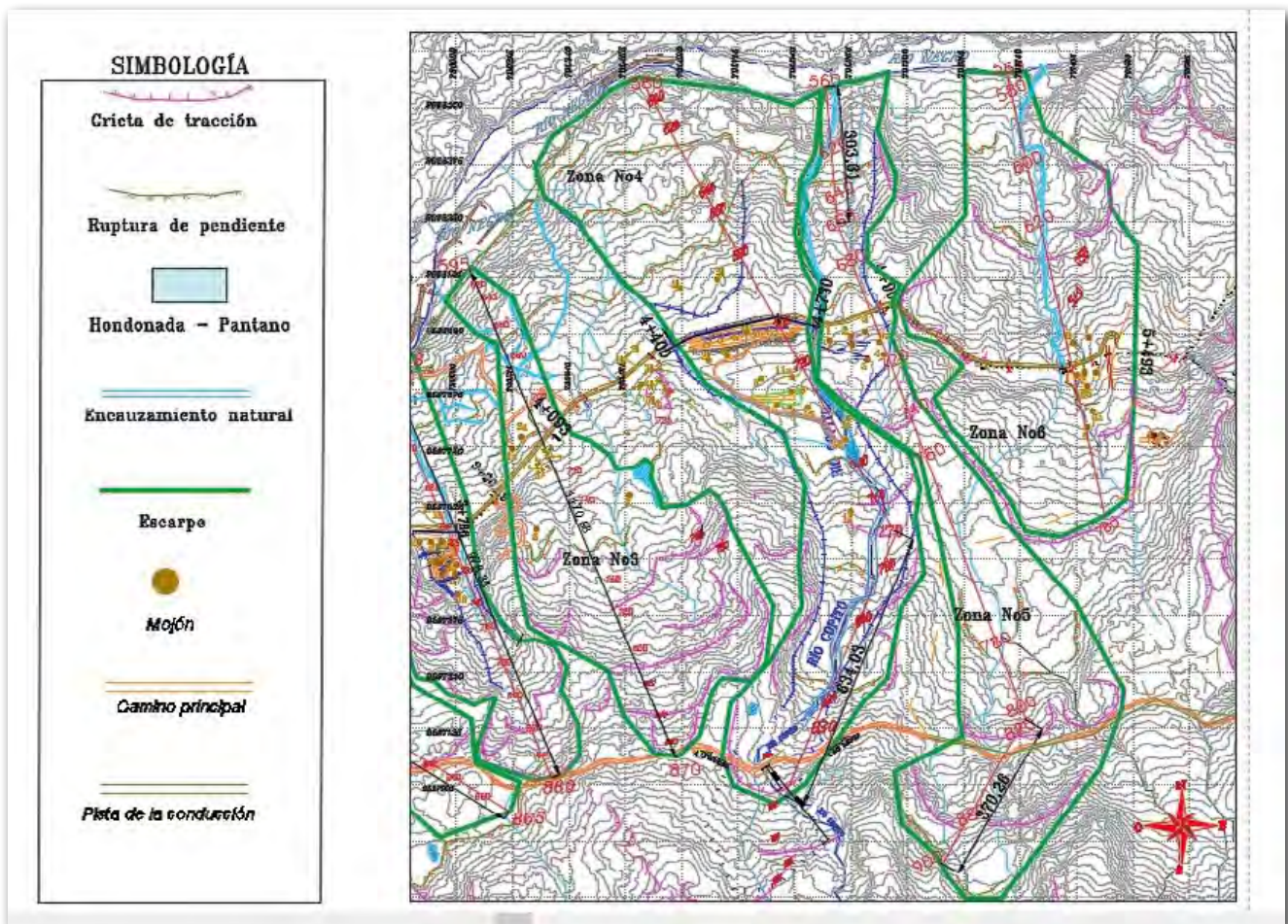


Figura 8. Escarpes y ubicación de mojones. Zonas 3 a 6.

2.4. 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 y se ubicaron en los mapas topográficos.

El valor para la variable V se determinó mediante toma semanal a quincenal de coordenadas con estación total de los 77 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 ($E1, N1, Z1$) y ($E2, N2, Z2$), la magnitud del desplazamiento en cm se calculó como:

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

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:

$$V_i = \frac{|\Delta r|}{\Delta t} \quad [8]$$

La velocidad promedio observada V_0 entre dos fechas para un deslizamiento, se calculó como la media aritmética de las velocidades individuales de los mojones.

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^l V_i}{l} \quad [9]$$

Con l = Número de mojones (del inglés *landmarks*)

La velocidad promedio observada V_0 , representa la medida de la variable V . Esta velocidad es causada por una precipitación media P y un caudal fluvial medio Q en el período de tiempo correspondiente a V_0 .

A modo de ejemplo explicativo, en las tablas 3 y 4 se expone el cálculo del desplazamiento y la velocidad para los mojones 5 y 7 del deslizamiento en la zona 1, en el período junio-julio 2018.

Tabla 3. Desplazamientos y velocidades. Mojón 5. Zona 1

| Fecha | Δt (d) | $ \Delta r $ (cm) | V_s (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 4. Desplazamientos y velocidades. Mojóñ 7. Zona 1

| Fecha | Δt (d) | $ \Delta r $ (cm) | V_r (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 |

2.5. Modelo geológico del área de estudio

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

Se practicaron cuatro líneas sísmicas por cada zona: una principal en sentido de la pendiente de la ladera y tres

en sentido transversal. La figura 8 muestra la planta de la ubicación para cuatro de estas zonas investigadas.

Los perfiles sísmicos de la línea en sentido de la pendiente se muestran en la figura 9.

Los materiales se componen de suelos distribuidos en capas, determinadas a partir de estudios de sísmica de refracción, y se caracterizaron de acuerdo con la velocidad de onda de corte V_s , de la siguiente manera (U.S. Department of Interior, 2001, y López Marinas, 2002):

- Capa con $V_s = 300$ m/s, podría tratarse de suelos blandos y materiales de acarreo entremezclados con fragmentos rocosos. Derrubios. Rocas sueltas.
- Capa con $V_s = 600$ m/s, podría tratarse de suelos muy duros o materiales coluviales pobremente consolidados.
- El estrato con $V_s = 1.200$ m/s, litológicamente podría tratarse de rocas metamórficas parcialmente desgastadas, alteradas y fracturadas, con permeabilidad secundaria importante debido a las fracturas.

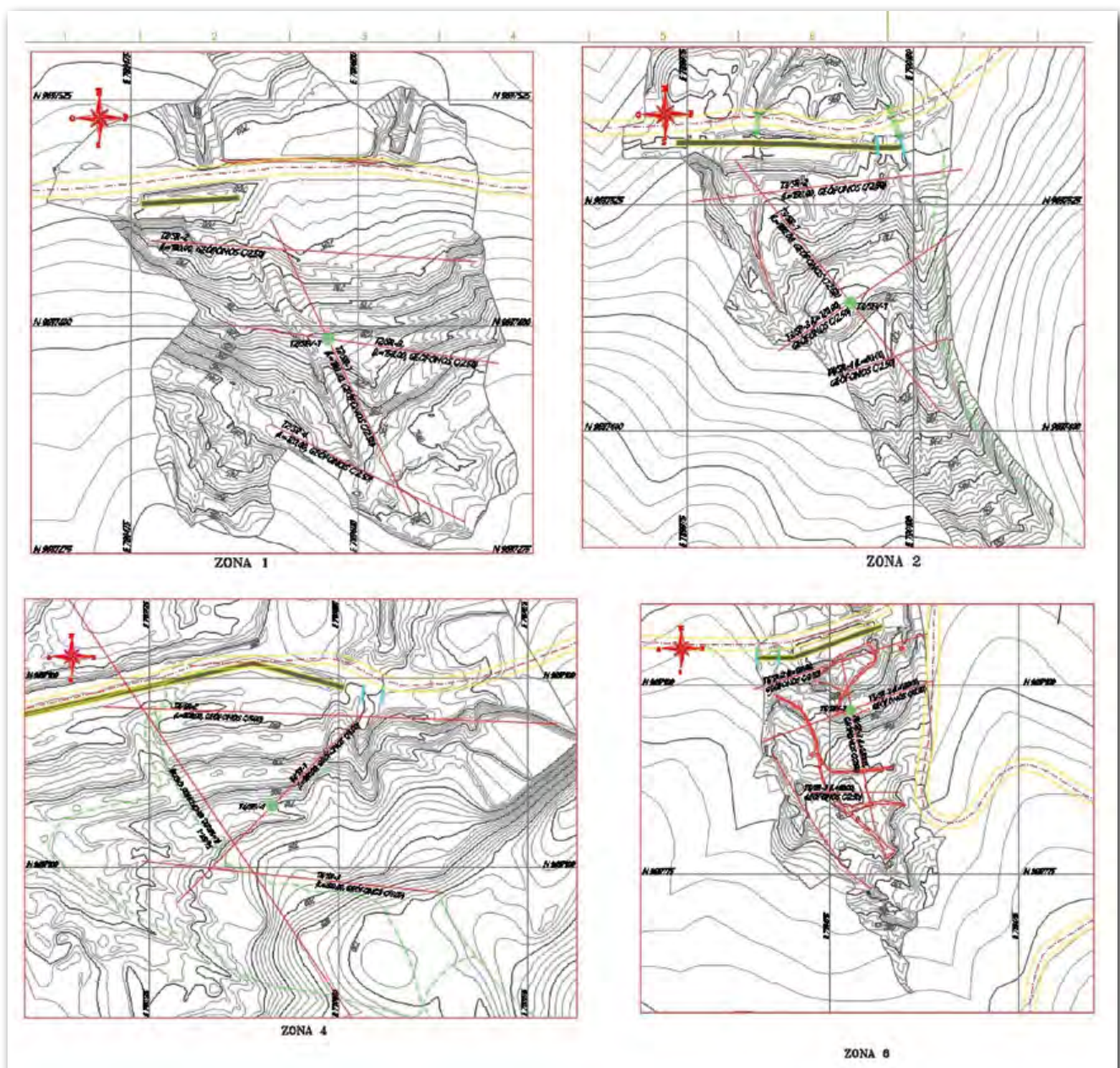


Figura 9. Líneas sísmicas practicadas en algunas zonas inestables.

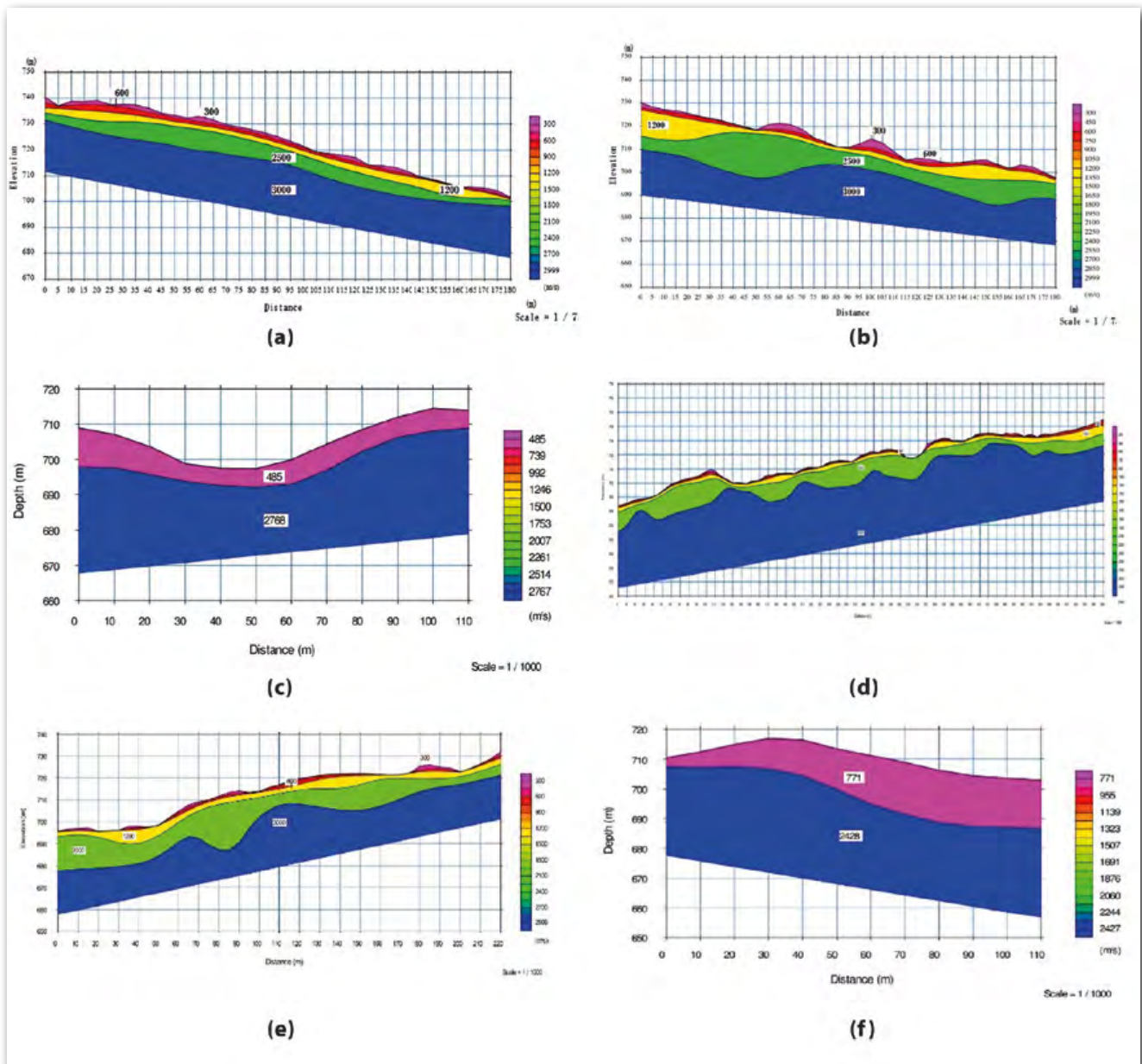


Figura 10. Perfiles sísmicos de cada zona: (a) zona 1; (b) zona 2; (c) zona 3; (d) zona 4; (e) zona 5; y (f), zona 6.

Esquistos gráficas. Rocas metamórficas descomprimidas.

- 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. Piso probable sobre el que deslizarían las capas superiores en un evento desestabilizador.
- La capa con velocidad $V_s = 3.000$ m/s, denota rocas metamórficas sanas. Mejores características geomecánicas, de baja compresibilidad. Alta capacidad de carga y de resistencia al corte; su permeabilidad primaria es muy baja. Por tal motivo, se considera que esta capa no está afectada por la presión de poros.

2.6. Geotecnia e Hidrología

Los deslizamientos investigados están afectados por la presión de poros, en un espesor h_s que comprende la altura desde el nivel de la capa con $V_s = 3.000$ m/s (roca

impermeable) hasta el respectivo nivel freático. El modelo geológico proporciona información útil para estimar h_s : Dado que la capa con velocidad de onda 2.000 a 2.500 m/s se conforma de roca fracturada, posee permeabilidad secundaria, y estará afectada por la presión de poros. Como la capa con $V_s = 3.000$ 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.

En la figura 10: si H_m es el espesor total promedio de la masa deslizando, y NF la profundidad del nivel freático,

$$h_s = H_m - NF \quad [10]$$

La profundidad del nivel freático para cada zona inestable se investigó mediante observaciones hechas en calicatas y sondeos eléctricos verticales (SEV). Los valores son estimados, debido a la heterogeneidad del suelo que constituye la matriz del coluvión, lo que implica la existencia de acuíferos confinados reflejando profundidades freáticas irregulares.

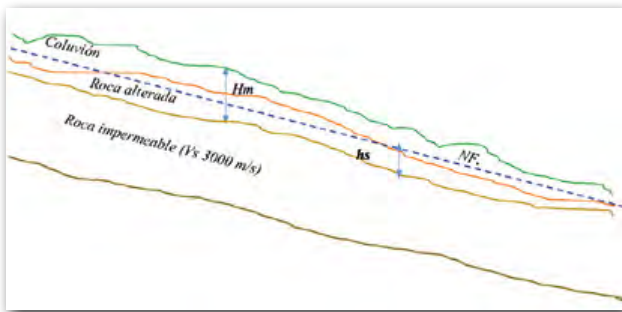


Figura 11. Esquema para el cálculo de h_s .



Figura 12. Calicata practicada en zona 1. Nivel freático a 3.50 m.

Para cada zona, en la tabla 5 se reporta el promedio de las profundidades observadas.

Tabla 5. Profundidades estimadas del nivel freático

| Zona | Profundidad del nivel freático (m) |
|------|------------------------------------|
| 1 | 3.50 |
| 2 | 4.00 |
| 3 | 6.00 |
| 4 | 6.00 |
| 5 | 5.23 |
| 6 | 6.45 |

En la tabla 6 se presentan los espesores promedios H_m y el cálculo de h_s para cada zona.

Tabla 6. Espesor de la masa afectada por la presión de poros

| Zona | H_m (m) | Prof. N.F. (m) | $h_s = H_m - \text{N.F.}$ (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 |

Los parámetros de resistencia al corte de la matriz del coluvión (cohesión C y ángulo de fricción interna ϕ), se determinaron mediante ensayos de corte triaxiales no drenados.

Tabla 7. Resultados de ensayos de corte triaxiales no drenados

| Zona | 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 in situ en cuatro puntos de cada ladera en estudio, mediante el método de ensayo Lefranc (López Marinas, 2002). La medida de la permeabilidad de un suelo expresa la facilidad con que los flujos subterráneos pueden circular en la masa (López Marinas, 2002). En suelos con permeabilidad muy pobre, el flujo subterráneo de agua presentará mayor resistencia, lo que incidirá en una mayor velocidad.

Tabla 8. Coeficientes de permeabilidad

| Zona | k (cm/s) |
|------|------------|
| 1 | 0.0630 |
| 2 | 0.0244 |
| 3 | 0.0700 |
| 4 | 0.0800 |
| 5 | 0.0330 |
| 6 | 0.0901 |

Para delimitar el área interior del escarpe para cada zona, se consideró el límite inferior como la orilla del río Negro. El límite superior o la "corona" del deslizamiento, lo constituyen las zonas altas ubicadas en las cercanías del camino que une las poblaciones de San Bartolo y La Dolorosa. La delimitación lateral del área se realiza con un trazo que esté acorde con el direccionamiento de las grietas y rupturas de pendiente, y que abarque hondonadas y pantanos, que son zonas de potencial infiltración. El área de cada deslizamiento se expone en la tabla 9.

Tabla 9. Área de los movimientos en masa

| Zona | Abscisas | 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 se calculó mediante la media ponderada en la longitud total de los rumbos o direcciones que sigue la descompresión de las masas, los cuales se estiman mediante la morfología de las grietas de tracción. Los valores se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Pendiente de los deslizamientos

| Zona | Abscisas | Pendiente j |
|------|---------------|---------------|
| 1 | 3+114 – 3+300 | 0.208 |
| 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 |

Para la zona 1 por ejemplo, se pueden observar en la figura 6 dos direcciones de movimientos: 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:

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

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. Se procedió de la siguiente manera: 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 (figura 13), que dividida para 8 días resulta 13.55 mm.

De manera similar, el caudal medio en este período de tiempo es igual al área bajo la curva de caudales, 2103.52 (m^3/s) x d, dividida para 8 días, que resulta 262.94 m^3/s (figura 14).

Al valor del caudal medio se restó el caudal de 30 m^3/s que capta la central HIDROSANBARTOLO para la generación de electricidad.

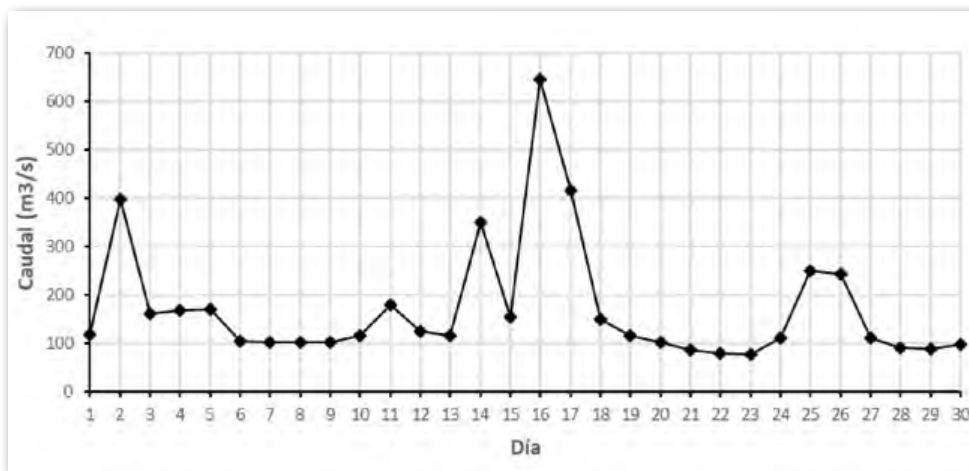
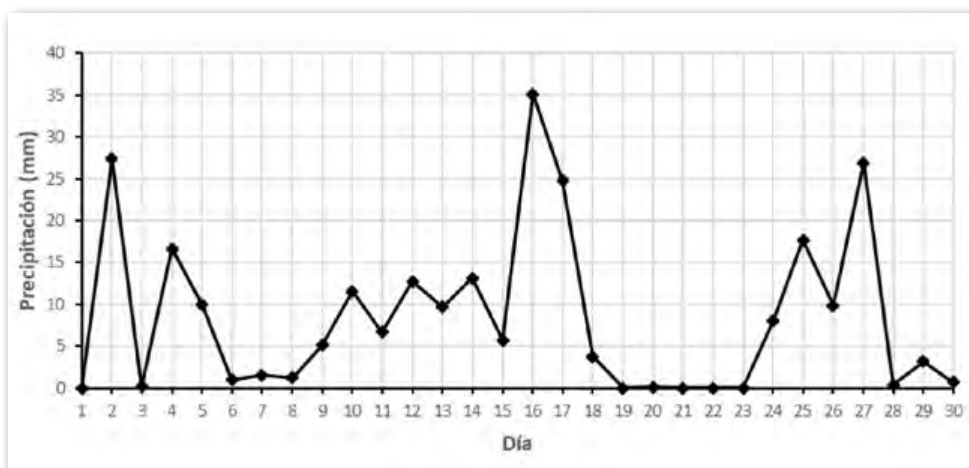
3. RESULTADOS

3.1. Cálculo de parámetros adimensionales Π

Relacionando los valores de velocidad observados V_0 de cada zona, con los valores de sus variables correspondientes y con las variables predictivas P y Q , se calcularon los parámetros Π_8 y Π_9 mediante [3] y [4]. Para la aceleración de la gravedad se ha tomado el valor estándar $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

En los anexos se presentan los cálculos de los parámetros adimensionales Π para cada zona inestable.

Con los valores obtenidos, se realizaron gráficos de dispersión entre estos parámetros, para determinar la función f_3 que tenga el mayor coeficiente de determinación R^2 (figura 15):

**Figura 13.** Registro diario de precipitación (junio 2018).**Figura 14.** Registro diario de caudales (junio 2018).

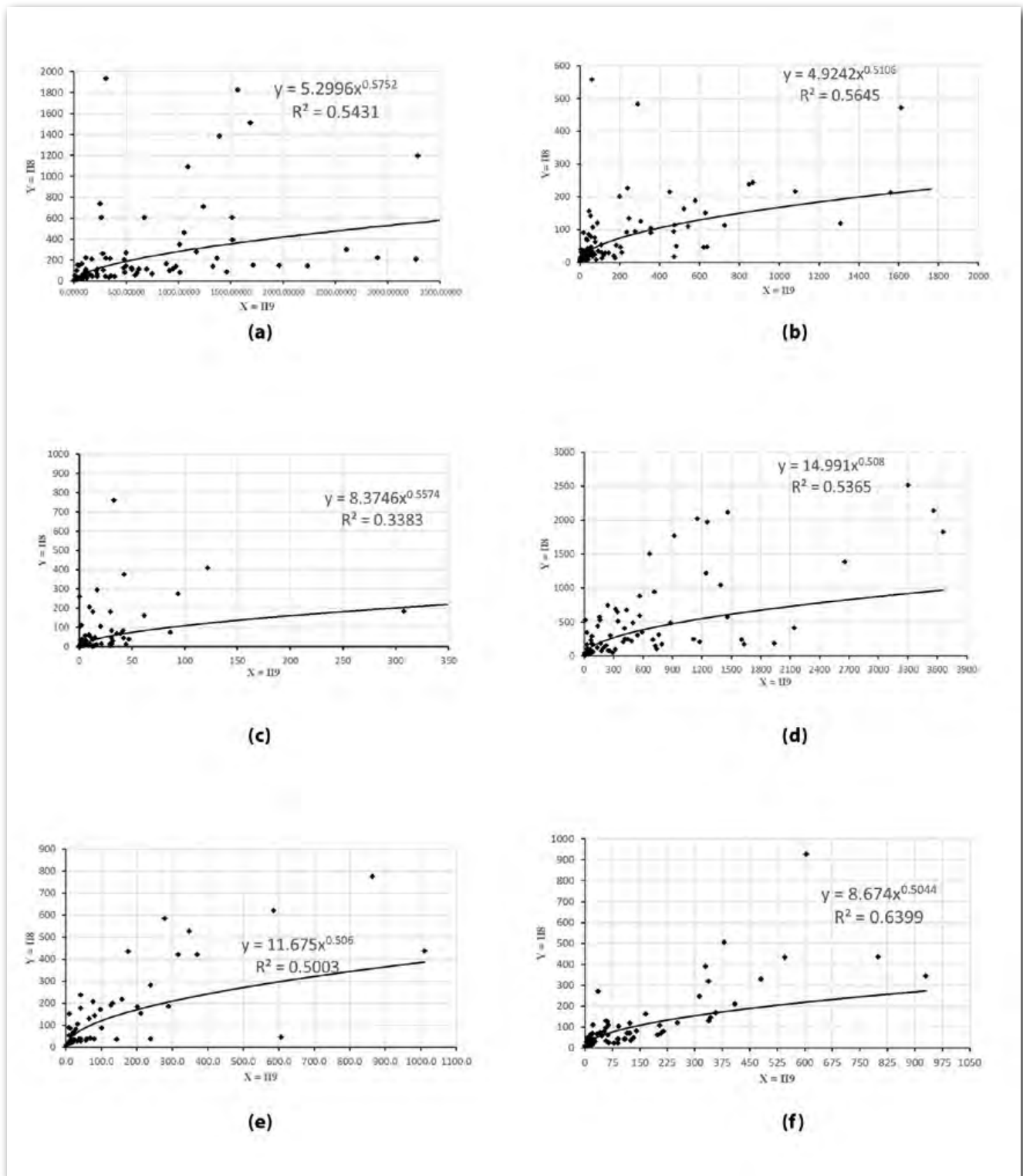


Figura 15. Función de ajuste entre parámetros Π8 y Π9: (a) zona 1; (b) zona 2; (c) zona 3; (d) zona 4; (e) zona 5; (f), zona 6.

Sustituyendo [3] y [4] en Y y X respectivamente, se determinaron las siguientes expresiones:

Zona 1:

$$V = \frac{5.30}{kA} P^{0.300} Q^{0.850} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0.575} \quad [10]$$

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:

$$V = \frac{8.37}{kA} P^{0.228} Q^{0.886} \left(\frac{g h_s j}{\tan \theta} \right)^{0.557} \quad [12]$$

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:

$$V = \frac{8.67}{kA} P^{0.016} Q^{0.992} \left(\frac{g h_s j}{\tan \phi} \right)^{0.504} \quad [15]$$

4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Ley General de reptación de coluviones

Las ecuaciones halladas difieren para cada deslizamiento, pero presentan la misma estructura algebraica, lo que condujo a deducir la ley general de reptación de coluviones, la cual se puede expresar mediante la ecuación 16:

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

Con $P \geq 0.54 \text{ mm}$; $n > 0.500$; $kA > 0$.

De (10) a (15), tomando para cada deslizamiento el coeficiente m , se verificó una buena correlación con el área correspondiente de cada zona inestable (figura 16).

La función potencial mostrada, presenta el mayor poder predictivo para el coeficiente m :

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

Para definir los exponentes, se calculó la media aritmética de los valores obtenidos en [10] a [15]:

$$\begin{aligned} p &= 0.108 \\ q &= 0.946 \\ n &= 0.527 \end{aligned} \quad [18]$$

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

$$V = \frac{1.120 \times 10^{-7} (A)^{0.43}}{k} P^{0.108} Q^{0.946} \left(\frac{g h_s j}{\tan \phi} \right)^{0.527} \quad [19]$$

Con P en mm, Q en m^3/s , A en m^2 , k en cm/s , $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$, h_s en m, j y $\tan \phi$ adimensionales.

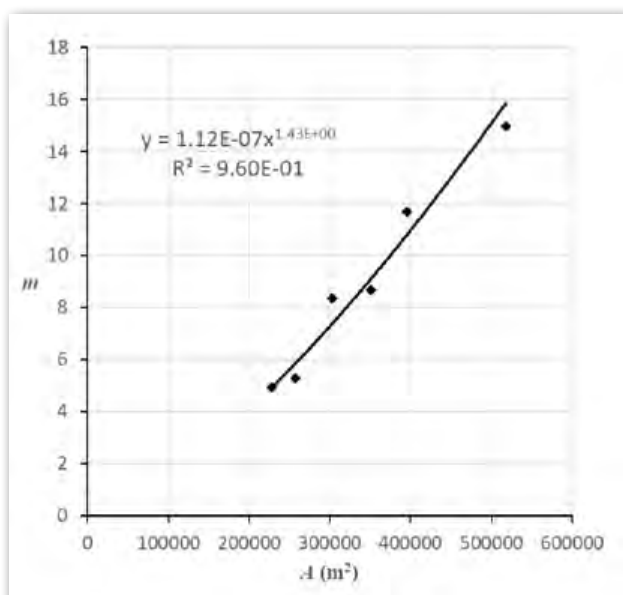


Figura 16. Correlación entre el coeficiente m y el área A .

La ley expresada mediante [19] es válida para deslizamientos de laderas en cuencas hidrográficas constituidas por coluviones, caracterizados por rocas metamórficas en matriz limo-arenosa, y fue determinada para movimientos en masa con extensiones desde 228.500 hasta 518.100 m^2 , en una región afectada por fallas inversas, que han causado fracturaciones y cizallamientos en el basamento rocoso.

Los caudales medios han sido calculados tomando en cuenta la regulación de la obra de captación de la central HIDROSANBARTOLO, que utiliza el caudal de 30 m^3/s para la generación de electricidad.

La velocidad de reptación es inversamente proporcional a la permeabilidad k del suelo de la matriz, siendo mayor el riesgo en laderas con permeabilidad muy baja.

4.2. Correlación lineal entre valores observados (V_o) y valores del modelo (V)

Se obtuvieron coeficientes de correlación lineal " r " mayores a 0.50. El análisis reveló que este se obtiene para caudales del río mayores a 26 m^3/s . Para caudales menores a 26 m^3/s , el modelo no es confiable. El análisis realizado con datos del modelo para $Q < 26 \text{ m}^3/\text{s}$ dio como resultado coeficientes de correlación muy bajos, por lo que estos caudales fueron omitidos. En estadística, es permisible eliminar ciertos datos adecuadamente, siempre que exista una justificación apropiada (Navidi, 2006).

Estadísticamente, un coeficiente de correlación mayor o igual a 0.50 representa un ajuste moderado, mientras que valores inferiores a este representan un ajuste débil (Navidi, 2006). La figura 17 muestra los ajustes lineales y los coeficientes de correlación respectivos, para cada zona inestable.

El poder predictivo del modelo está en el rango 25 al 39 %.

La restricción para $Q > 26 \text{ m}^3/\text{s}$ se fundamenta en la protección que confieren las terrazas aluviales en el pie de las laderas, por lo que caudales menores no constituyen la causa para acelerar los movimientos por socavación lateral.

La heterogeneidad del suelo también ocasiona que el poder predictivo del modelo tome el máximo del 39 %.

4.3. Descripción de los movimientos en masa

La figura 2 muestra la escala de velocidades, en donde se describen los movimientos como: muy lento, lento, moderado, rápido, muy rápido y extremadamente rápido, para 6 valores típicos de la velocidad.

En un período de siete días se registraron:

P máxima = 28.15 mm

Q máximo = 259.21 m^3/s

Bajo estas condiciones hidrometeorológicas, aplicando [19] se determinó la siguiente descripción de los movimientos con base en la escala de Cruden y Varnes (figura 2):

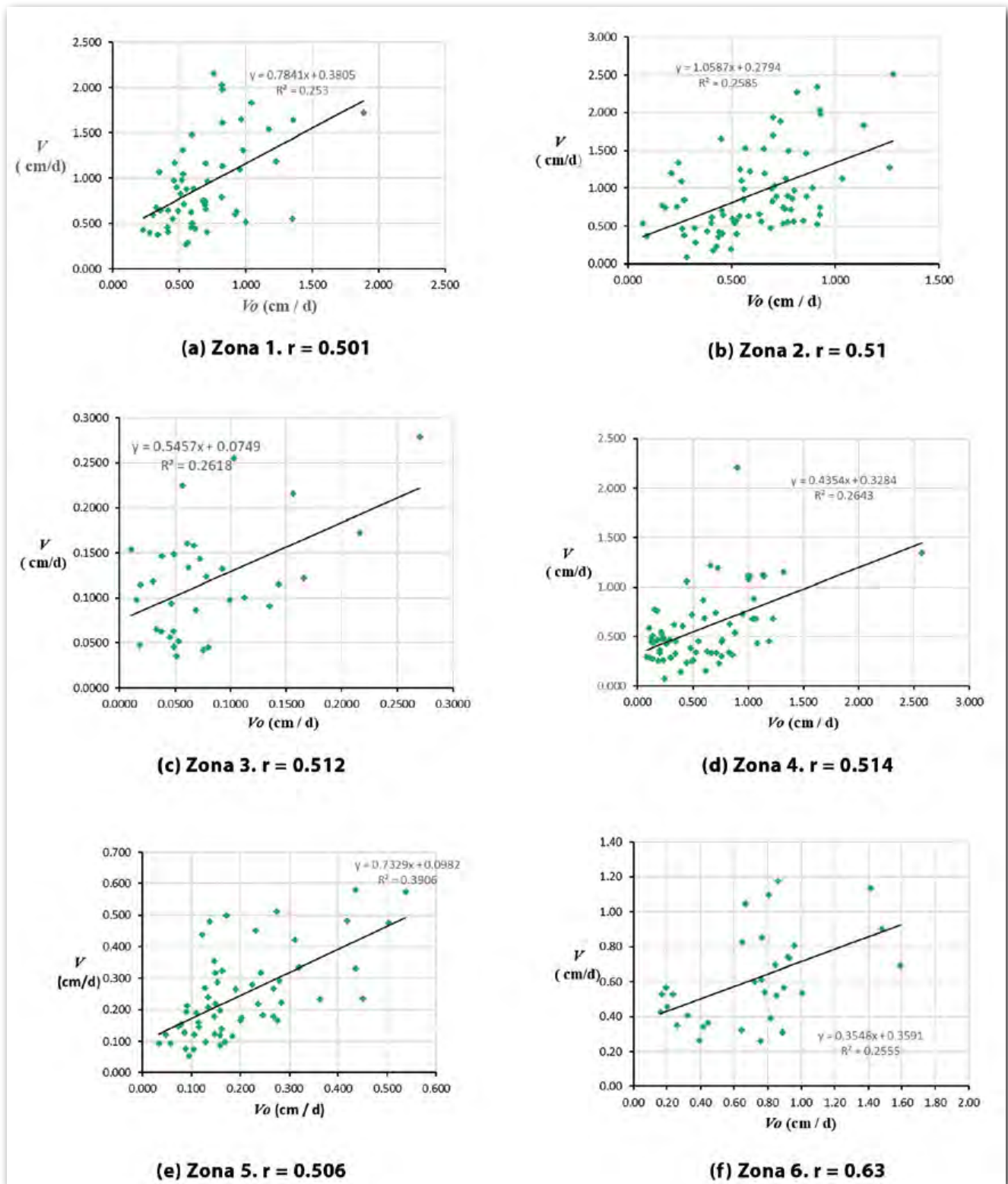


Figura 17. Correlación lineal entre valores observados y del modelo. Análisis efectuado para $Q > 26 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 11. Descripción de movimientos para condiciones hidrometeorológicas en un período de 7 días

| Zona | V(cm/d) | Desplazamiento = 7.V (cm) | Descripción |
|------|---------|---------------------------|-------------|
| 1 | 2.95 | 20.63 | Lento |
| 2 | 3.09 | 21.63 | Lento |
| 3 | 0.43 | 2.99 | Lento |
| 4 | 0.56 | 3.94 | Lento |
| 5 | 2.60 | 18.17 | Lento |
| 6 | 0.58 | 4.06 | Lento |

Desplazamiento máximo período semanal = 21.63 cm. Zona 2.

La velocidad máxima es 3.09 cm/d y se produce en la zona 2. Está en el intervalo 1.5 m/año – 1.5 m/mes (0.411 – 5.00 cm/d), para el cual, el movimiento se describe como “Lento” según la escala de Cruden y Varnes (figura 2).

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 12. Velocidades de reptación para los umbrales de precipitación y caudal de movimiento moderado ($5 < V < 150$ cm/d)

| Zona | V (cm/d) | Descripción |
|------|----------|-------------|
| 1 | 6.21 | Moderado |
| 2 | 6.51 | Moderado |
| 5 | 5.47 | Moderado |

Desplazamiento máximo período de 1 día = 6.51 cm. Zona 2.

5. CONCLUSIONES

Se presentan, en este apartado, las conclusiones más relevantes derivadas de este estudio.

La ley de reptación encontrada es aplicable a movimientos en masa constituidos por rocas metamórficas (pizarras y esquistos grafiticos) cuyos fragmentos están englobados en una matriz arcillo limosa, con elevado nivel freático y erosión fluvial, en laderas de cuencas hidrográficas, con un poder predictivo moderado.

- El coeficiente de correlación lineal entre velocidades observadas V_0 y velocidades calculadas con el modelo es superior a 0.50, que estadísticamente indica un poder de asociación “moderado”. Este factor se obtuvo para caudales medios del río mayores a $26 \text{ m}^3/\text{s}$. El modelo refleja que caudales menores a $26 \text{ m}^3/\text{s}$ no activan los deslizamientos, lo que se explica por la presencia de terrazas aluviales en el pie de las laderas, que constituye una protección contra la socavación lateral.
- 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 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 se drena con facilidad, siendo mayor la resistencia al flujo, y se generan mayores fuerzas de filtración, causando que las laderas aceleren su movimiento.
- 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 2, 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 5.7 hasta 21.6 cm. 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. Se reemplazó en varias áreas, el suelo saturado por suelo con mayores parámetros de corte, con el fin de ganar resistencia y atenuar los movimientos en masa. Las obras indicadas se construyeron con recursos de HIDROSANBARTOLO. La construcción en media ladera de subdrenes asociados a bermas y muros con materiales más permeables contribuyó a la disminución del *campo de las fuerzas de filtración*, y por ende, a reducir la velocidad en un 70 %. Las escolleras construidas disminuyen la socavación lateral del río. Tienen sección de 120 ton/m y confieren una buena protección ante las crecidas de hasta $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$. La piedra utilizada tiene tamaño de 1.50 m.

6. REFERENCIAS

- Cruden, D.M., y Varnes, D.J. (1996). *Landslide Types and Processes*. Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: pp. 36-75.
- Ferrer, M., y Ayala, F. (1997). Relaciones entre desencadenamiento de movimientos y condiciones meteorológicas para algunos deslizamientos de España. *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Granada. Vol. I, pp. 185-198.
- Gibbins, J.C. (2011). *Dimensional Analysis*. London: Springer.
- González de Vallejo, L.I. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson/Prentice Hall.
- Highland, L.M., y Bobrowsky, P. (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes*. Circular 1325. Reston, Virginia: Servicio Geológico de los EE.UU.
- Keller, E., y Blodgett, R. (2007). *Riesgos naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Madrid: Pearson/Prentice Hall.
- López Marinas, J.M. (2002). *Geología aplicada a la Ingeniería Civil*. Madrid: Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000.
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Suárez Díaz, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis geotécnico*. Vol. I. Bucaramanga: División de Publicaciones UIS.
- Tarbut, E.J., y Lutgens, F.K. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la geología física*. Madrid: Pearson/Prentice Hall.
- U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation (2001). *Engineering Geology Field Manual*.

7. ANEXOS

Cálculo de parámetros adimensionales Π para cada zona inestable

| FECHA | V_0 (cm/día) | P (mm) | Q (m ³ /s) | $X = \frac{P^4 g h_s j}{Q^2 \tan \theta}$ | $Y = \frac{V k A P^2}{Q^2}$ | FECHA | V_0 (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 | 8/2/2016 | | | | | |
| 8/15/2016 | 1.885 | 10.70 | 190.00 | 207.460 | 96.813 | 8/10/2016 | 0.930 | 9.78 | 190.00 | 28.875 | 13.731 |
| 8/29/2016 | 0.932 | 5.61 | 71.20 | 111.859 | 93.778 | 8/15/2016 | 0.737 | 6.20 | 190.00 | 4.654 | 4.370 |
| 9/16/2016 | 0.921 | 7.70 | 65.47 | 468.392 | 206.262 | 8/29/2016 | 0.747 | 5.61 | 72.00 | 21.792 | 25.298 |
| 9/29/2016 | 0.820 | 7.71 | 86.11 | 273.228 | 106.667 | 9/16/2016 | 0.453 | 7.70 | 66.27 | 91.073 | 34.031 |
| 11/1/2016 | 1.611 | 3.77 | 50.01 | 46.352 | 148.525 | 9/29/2016 | 0.773 | 7.71 | 84.91 | 55.982 | 35.551 |
| 11/14/2016 | 1.971 | 9.73 | 65.16 | 1209.528 | 712.553 | 10/11/2016 | 0.634 | 5.19 | 64.02 | 20.113 | 23.193 |
| 11/30/2016 | 1.685 | 11.58 | 47.82 | 4507.209 | 1602.926 | 11/1/2016 | 0.525 | 2.97 | 39.28 | 5.715 | 16.677 |
| 3/14/2017 | 6.298 | 3.28 | 51.92 | | | 11/14/2016 | 0.760 | 9.74 | 65.96 | 235.673 | 92.351 |
| 3/31/2017 | 3.181 | 8.68 | 46.06 | 1528.752 | 1829.220 | 11/30/2016 | 0.771 | 11.58 | 48.62 | 868.615 | 244.052 |
| 4/19/2017 | 2.521 | 13.84 | 80.86 | 3211.845 | 1196.944 | 12/13/2016 | 0.989 | 4.30 | 26.82 | 54.359 | 141.957 |
| 5/2/2017 | | | | | | 1/6/2017 | 0.456 | 4.54 | 38.73 | 32.358 | 34.992 |
| 7/31/2017 | 1.639 | 6.73 | 103.92 | 108.675 | 111.356 | 1/16/2017 | 0.926 | 10.51 | 67.58 | 304.340 | 124.845 |
| 8/15/2017 | 1.639 | 2.23 | 50.31 | 5.624 | 52.328 | 2/2/2017 | 0.764 | 6.76 | 55.65 | 76.960 | 62.934 |
| 9/6/2017 | 0.843 | 4.31 | 34.59 | 164.544 | 211.787 | 2/13/2017 | 0.927 | 4.44 | 52.83 | 15.818 | 36.451 |
| 9/26/2017 | 1.152 | 6.70 | 62.10 | 299.448 | 217.510 | 3/3/2017 | 0.072 | 9.84 | 47.58 | 472.961 | 17.239 |
| 10/11/2017 | 0.790 | 5.91 | 45.47 | 337.642 | 216.261 | 3/14/2017 | 0.091 | 3.28 | 36.15 | 10.096 | 4.193 |
| 10/15/2017 | 1.242 | 6.16 | 35.50 | 654.737 | 606.344 | 3/31/2017 | 0.911 | 9.66 | 46.98 | 449.368 | 214.707 |
| 10/31/2017 | 1.931 | 14.38 | 128.59 | 1481.632 | 391.622 | 4/19/2017 | 0.881 | 13.40 | 76.50 | 628.835 | 150.759 |
| 11/6/2017 | 2.267 | 4.14 | 14.92 | 756.683 | 2831.774 | 5/2/2017 | 1.421 | 15.75 | 90.89 | 849.082 | 237.883 |
| 11/14/2017 | 1.244 | 14.74 | 33.03 | 24780.261 | 4015.268 | 5/15/2017 | 1.154 | 13.19 | 77.23 | 578.289 | 187.667 |
| 11/27/2017 | 1.755 | 4.55 | 59.39 | 69.307 | 166.690 | 5/30/2017 | 1.032 | 7.07 | 61.65 | 74.796 | 75.624 |
| 3/19/2018 | 1.689 | 3.46 | 56.66 | 25.618 | 102.187 | 6/14/2017 | 0.933 | 13.32 | 100.62 | 354.317 | 91.139 |
| 4/3/2018 | 1.000 | 14.08 | 51.90 | 8339.566 | 1191.446 | 7/3/2017 | 0.996 | 6.49 | 74.97 | 36.031 | 41.639 |
| 4/18/2018 | 1.219 | 8.73 | 56.86 | 1027.848 | 465.500 | 7/14/2017 | 1.092 | 5.31 | 105.56 | 8.128 | 15.396 |
| 4/24/2018 | 0.693 | 5.77 | 79.83 | 99.307 | 58.581 | 7/31/2017 | 0.924 | 14.05 | 187.18 | 126.895 | 29.044 |
| 6/1/2018 | 0.822 | 16.60 | 209.56 | 989.434 | 83.601 | 8/1/2017 | 0.943 | | 78.50 | | |
| 6/6/2018 | 0.822 | 13.23 | 172.66 | 588.034 | 78.221 | 8/15/2017 | 0.890 | 2.39 | 51.11 | 1.431 | 10.880 |
| 6/11/2018 | 0.678 | 6.43 | 84.24 | 137.823 | 64.014 | 8/31/2017 | 0.439 | 5.19 | 39.66 | 52.604 | 41.926 |
| 6/19/2018 | 0.760 | 13.79 | 234.14 | 377.179 | 42.715 | 9/26/2017 | 1.138 | 5.46 | 52.93 | 36.097 | 67.470 |
| 6/27/2018 | 0.713 | 10.03 | 103.67 | 539.115 | 108.104 | 10/11/2017 | 1.187 | 5.91 | 46.27 | 64.967 | 107.952 |
| 7/6/2018 | 0.621 | 1.22 | 57.67 | 0.377 | 4.480 | 10/30/2017 | 1.262 | 13.40 | 115.31 | 276.663 | 95.044 |
| 7/10/2018 | 0.598 | 5.84 | 55.43 | 216.279 | 107.550 | 11/14/2017 | 0.975 | 9.53 | 25.97 | 1394.316 | 731.939 |
| 7/16/2018 | 0.531 | 8.41 | 115.43 | 214.683 | 45.617 | 12/1/2017 | 1.400 | 5.51 | 57.58 | 31.596 | 71.385 |
| 7/30/2018 | 0.595 | 10.76 | 161.29 | 295.298 | 42.925 | 12/5/2017 | 3.585 | 13.89 | 49.09 | 1759.898 | 1599.942 |
| 8/13/2018 | 0.509 | 9.02 | 89.35 | 474.785 | 84.056 | 12/28/2017 | 1.482 | 6.58 | 27.20 | 289.250 | 483.760 |
| 8/20/2018 | 1.228 | 10.86 | 127.75 | 487.200 | 143.723 | 1/8/2018 | 1.662 | 2.94 | 11.99 | 59.326 | 557.523 |
| 8/28/2018 | 0.821 | 13.11 | 221.13 | 345.954 | 46.794 | 1/22/2018 | 0.891 | 17.86 | 86.21 | 1559.707 | 213.059 |
| 9/3/2018 | 0.694 | 10.93 | 78.25 | 1335.531 | 219.521 | 2/1/2018 | 2.201 | 4.48 | 52.10 | 16.842 | 90.546 |
| 9/11/2018 | 1.175 | 6.14 | 179.71 | 25.140 | 22.199 | 2/15/2018 | 0.323 | 4.29 | 26.51 | 54.902 | 47.185 |
| 9/17/2018 | 0.932 | 5.07 | 18.85 | 1061.452 | 1090.984 | 2/27/2018 | 2.354 | 5.80 | 53.26 | 45.609 | 155.841 |
| 9/25/2018 | 0.428 | 3.51 | 18.04 | 267.713 | 263.116 | 3/7/2018 | 0.269 | 9.21 | 33.57 | 726.528 | 112.720 |
| 10/1/2018 | 0.491 | 3.89 | 8.93 | 1647.719 | 1512.953 | 3/19/2018 | 1.534 | 3.46 | 57.46 | 4.963 | 31.061 |
| 10/17/2018 | 0.229 | 7.52 | 45.34 | 889.587 | 102.009 | 4/3/2018 | 1.187 | 14.08 | 52.70 | 1611.350 | 472.128 |
| 10/26/2018 | 0.314 | 1.36 | 7.79 | 32.373 | 155.163 | 4/18/2018 | 1.578 | 8.73 | 57.67 | 199.121 | 201.656 |
| 11/6/2018 | 0.281 | 7.39 | 42.31 | 951.303 | 138.919 | 4/24/2018 | 0.696 | 5.77 | 80.63 | 19.393 | 19.865 |
| 11/20/2018 | 0.416 | 12.22 | 67.07 | 2834.345 | 223.710 | 6/1/2018 | | | | | |
| 11/28/2018 | 0.707 | 7.53 | 43.22 | 985.327 | 347.957 | 6/6/2018 | 1.136 | 10.55 | 173.46 | 46.934 | 23.429 |
| 12/4/2018 | 0.550 | 13.15 | 25.82 | 25671.994 | 2311.102 | 6/11/2018 | 0.862 | 6.43 | 85.04 | 26.943 | 27.469 |
| 12/12/2018 | 0.590 | 8.26 | 48.22 | 1143.375 | 280.247 | 6/19/2018 | 1.277 | 13.79 | 234.94 | 74.631 | 24.522 |
| 12/19/2018 | 0.597 | 4.67 | 57.09 | 83.597 | 64.712 | 6/27/2018 | 1.035 | 10.03 | 104.47 | 105.764 | 53.227 |
| 1/3/2019 | 0.450 | 5.10 | 62.58 | 98.590 | 48.314 | 7/2/2018 | 0.925 | 1.47 | 73.15 | 0.099 | 2.082 |
| 1/17/2019 | 0.563 | 5.34 | 30.93 | 484.828 | 271.372 | 7/10/2018 | 0.643 | 3.37 | 57.01 | 4.518 | 12.512 |
| 2/6/2019 | 0.462 | 14.00 | 100.29 | 2182.199 | 145.606 | 7/16/2018 | 0.588 | 8.41 | 116.23 | 42.182 | 17.149 |
| 2/13/2019 | 0.957 | 10.69 | 117.76 | 537.992 | 127.727 | 7/24/2018 | 0.817 | 16.74 | 206.67 | 209.763 | 29.887 |
| 2/19/2019 | 0.588 | 7.78 | 67.32 | 463.374 | 127.465 | 7/30/2018 | 0.804 | 2.79 | 102.66 | 0.657 | 3.317 |
| 2/25/2019 | 1.352 | 9.65 | 57.95 | 1477.863 | 607.499 | 8/14/2018 | 0.693 | 8.42 | 93.69 | 65.278 | 31.194 |
| 3/12/2019 | 0.409 | 7.75 | 48.85 | 863.573 | 166.865 | 8/20/2018 | 0.700 | 12.67 | 157.15 | 118.823 | 25.352 |
| 3/19/2019 | 0.489 | 15.14 | 64.17 | 7292.647 | 441.069 | 8/29/2018 | 0.773 | 11.66 | 138.86 | 109.114 | 30.376 |
| 3/26/2019 | 0.698 | 5.41 | 74.95 | 87.073 | 58.904 | 9/3/2018 | 0.716 | 13.12 | 78.91 | 542.395 | 110.326 |
| 4/2/2019 | 0.611 | 10.12 | 94.23 | 676.351 | 114.145 | 9/11/2018 | 0.762 | 6.14 | 110.77 | 13.183 | 13.042 |
| 4/16/2019 | 0.338 | 9.01 | 38.53 | 2544.413 | 300.145 | 9/17/2018 | 0.499 | 5.07 | 17.74 | 238.620 | 226.738 |
| 5/1/2019 | 0.361 | 12.50 | 66.18 | 3193.057 | 208.998 | 9/27/2018 | 0.428 | 3.88 | 21.50 | 55.870 | 77.638 |
| 5/21/2019 | 0.462 | 11.21 | 125.89 | 570.183 | 59.341 | 10/1/2018 | 0.412 | 3.16 | 16.40 | 42.383 | 85.462 |
| 5/28/2019 | 0.302 | 5.52 | 67.08 | 118.204 | 33.124 | 10/17/2018 | 0.261 | 7.52 | 42.43 | 202.390 | 45.676 |
| 6/11/2019 | 0.702 | 13.58 | 122.33 | 1298.540 | 139.992 | 10/26/2018 | 0.282 | 1.36 | 8.59 | 5.304 | 39.544 |
| 6/19/2019 | 0.978 | 12.00 | 140.23 | 603.360 | 115.994 | 11/6/2018 | 0.323 | 7.39 | 43.11 | 182.550 | 52.817 |
| 6/26/2019 | 0.963 | 6.94 | 190.32 | 36.555 | 20.712 | 11/14/2018 | 0.382 | 8.83 | 38.15 | 476.387 | 114.189 |
| 7/2/2019 | 0.826 | 8.18 | 125.55 | 162.809 | 56.886 | 11/19/2018 | 0.658 | 18.77 | 103.99 | 1308.567 | 119.570 |
| 7/9/2019 | 0.517 | 6.14 | 111.55 | 65.175 | 25.340 | 11/26/2018 | 0.513 | 9.26 | 48.50 | 355.867 | 104.189 |
| 7/17/2019 | 0.479 | 7.37 | 99.90 | 169.036 | 42.256 | 12/3/2018 | 0.437 | 8.24 | 31.77 | 521.440 | 164.183 |
| 7/23/2019 | 1.043 | 18.06 | 190.72 | 1672.949 | 151.553 | 12/12/2018 | 0.403 | 9.92 | 48.39 | 470.869 | 94.432 |
| 8/1/2019 | 0.553 | 4.31 | 103.58 | 18.330 | 15.481 | 12/19/2018 | 0.506 | 4.67 | 57.89 | 16.197 | 18.352 |
| 8/7/2019 | 0.523 | 12.55 | 139.57 | 728.663 | 68.480 | 2/14/2019 | 4.047 | 14.78 | 125.58 | | |
| 8/13/2019 | 0.413 | 2.12 | 49.40 | 4.707 | 12.291 | 2/19/2019 | 1.387 | 6.98 | 55.88 | 86.650 | 120.622 |
| 9/2/2019 | 0.348 | 9.38 | 116.46 | 325.886 | 36.537 | 3/11/2019 | 0.847 | 8.69 | 51.48 | 245.626 | 134.593 |
| 9/12/2019 | 0.534 | 6.94 | 78.51 | 214.741 | 67.568 | 3/19/2019 | 0.269 | 13.28 | 74.48 | 638.251 | 47.704 |
| 9/20/2019 | 0.327 | 5.38 | 76.45 | 82.093 | 26.237 | 3/27/2019 | 0.179 | 6.54 | 70.98 | 41.331 | 8.487 |
| 10/4/2019 | 0.201 | 6.68 | 34.99 | 927.615 | 118.390 | 4/1/2019 | 0.211 | 9.71 | 112.00 | 80.779 | 8.827 |
| 10/9/2019 | 0.342 | 14.35 | 56.24 | 7670.842 | 361.262 | 4/16/2019 | 0.167 | 8.41 | 71.78 | 110.857 | 12.765 |
| 10/22/2019 | 0.225 | 10.29 | 67.06 | 1425.515 | 85.847 | 5/1/2019 | 0.236 | 12.50 | 66.98 | 621.014 | 45.805 |
| 11/7/2019 | 0.354 | 11.33 | 70.09 | 1917.988 | 149.967 | 5/14/2019 | 0.243 | 12.35 | 122.50 | 176.497 | 13.749 |
| | | | | | | 5/28/2019 | 0.258 | 7.31 | 105.04 | 42.256 | 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 | 24.209 |
| | | | | | | 7/8/2019 | 0.560 | 5.97 | 96.45 | 15.581 | 11.971 |
| | | | | | | 7/18/2019 | 0.546 | 6.49 | 106.81 | 17.727 | 11.243 |
| | | | | | | 7/23/2019 | 0.913 | 20.71 | 208.40 | 482.8 | |

| FECHA | V_o (cm/día) | P (mm) | Q (m ³ /s) | $X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$ | $Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$ | FECHA | V_o (cm/día) | P (mm) | Q (m ³ /s) | $X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$ | $Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$ |
|------------|----------------|----------|-------------------------|---|---------------------------------|------------|----------------|----------|-------------------------|---|---------------------------------|
| 6/1/2018 | 0.083 | 14.30 | 208.74 | 15.064 | 8.285 | 8/11/2016 | 0.295 | 8.69 | 193.20 | 45.124 | 24.778 |
| 6/11/2018 | 0.083 | 7.41 | 126.47 | 2.959 | 6.060 | 8/15/2016 | 2.573 | 7.74 | 193.20 | 28.398 | 171.192 |
| 6/27/2018 | 0.156 | 10.49 | 165.57 | 6.933 | 13.246 | 8/29/2016 | 0.716 | 5.61 | 46.03 | 138.075 | 440.761 |
| 7/10/2018 | 0.045 | 1.55 | 49.93 | 0.036 | 0.923 | 9/15/2016 | 0.236 | 5.72 | 67.10 | 70.224 | 71.040 |
| 7/24/2018 | 0.043 | 12.19 | 169.59 | 12.051 | 4.659 | 9/29/2016 | 0.175 | 9.01 | 86.51 | 260.082 | 78.797 |
| 8/14/2018 | 0.080 | 6.75 | 89.88 | 4.034 | 9.603 | 10/11/2016 | 0.219 | 5.01 | 74.86 | 33.204 | 40.653 |
| 8/29/2018 | 0.068 | 11.90 | 194.95 | 8.282 | 5.384 | 11/1/2016 | 0.082 | 2.79 | 44.46 | 9.054 | 13.420 |
| 9/11/2018 | 0.139 | 8.71 | 137.13 | 4.804 | 11.857 | 11/14/2016 | 0.405 | 9.74 | 67.16 | 589.330 | 353.105 |
| 9/27/2018 | 0.071 | 4.26 | 16.00 | 20.193 | 107.229 | 11/30/2016 | 0.186 | 11.58 | 49.82 | 2139.790 | 415.585 |
| 10/17/2018 | 0.017 | 7.00 | 34.76 | 31.191 | 14.461 | 12/13/2016 | 0.229 | 3.85 | 37.12 | 47.095 | 102.261 |
| 11/5/2018 | 0.061 | 3.96 | 24.81 | 6.271 | 32.818 | 1/6/2017 | 0.108 | 4.53 | 40.94 | 74.220 | 54.668 |
| 11/20/2018 | 0.069 | 10.43 | 62.78 | 47.129 | 40.070 | 1/16/2017 | 0.328 | 10.51 | 68.78 | 761.827 | 317.386 |
| 12/3/2018 | 0.049 | 8.75 | 32.61 | 86.521 | 74.419 | 2/1/2017 | 0.225 | 7.18 | 63.94 | 191.978 | 117.751 |
| 12/17/2018 | 0.033 | 6.38 | 49.40 | 10.657 | 11.740 | 2/13/2017 | 0.340 | 4.07 | 47.29 | 36.246 | 104.470 |
| 1/17/2019 | 0.038 | 4.24 | 49.63 | 2.060 | 5.843 | 3/3/2017 | 0.123 | 9.84 | 48.46 | 1179.228 | 209.607 |
| 2/14/2019 | 0.038 | 13.40 | 106.74 | 44.418 | 12.695 | 3/14/2017 | 0.190 | 3.28 | 37.35 | 24.505 | 60.861 |
| 3/11/2019 | 0.048 | 8.14 | 46.45 | 31.939 | 31.439 | 3/31/2017 | 0.149 | 9.66 | 48.06 | 1113.624 | 248.769 |
| 4/16/2019 | 0.016 | 8.11 | 73.86 | 12.447 | 3.963 | 4/18/2017 | 0.151 | 14.01 | 83.52 | 1631.385 | 176.334 |
| 5/14/2019 | 0.061 | 11.13 | 120.08 | 16.704 | 11.043 | 5/2/2017 | 0.148 | 14.63 | 83.60 | 1935.984 | 187.827 |
| 5/29/2019 | 0.011 | 10.23 | 115.70 | 12.842 | 1.778 | 5/15/2017 | 0.490 | 13.20 | 78.43 | 1457.897 | 575.242 |
| 6/13/2019 | 0.031 | 8.96 | 88.98 | 12.777 | 6.586 | 5/30/2017 | 0.132 | 7.57 | 62.85 | 245.537 | 79.088 |
| 6/18/2019 | 0.103 | 16.00 | 187.89 | 29.138 | 15.796 | 6/14/2017 | 0.291 | 13.58 | 112.81 | 789.842 | 175.129 |
| 6/25/2019 | 0.046 | 7.30 | 194.71 | 1.176 | 1.369 | 7/3/2017 | 0.212 | 6.49 | 76.17 | 90.318 | 63.727 |
| 7/1/2019 | 0.216 | 8.08 | 134.00 | 3.726 | 16.631 | 7/14/2017 | 0.299 | 4.19 | 96.97 | 9.681 | 23.146 |
| 7/8/2019 | 0.019 | 5.10 | 92.26 | 1.248 | 1.233 | 8/1/2017 | 0.218 | 13.27 | 177.66 | 290.376 | 50.503 |
| 7/17/2019 | 0.062 | 5.86 | 106.52 | 1.631 | 3.963 | 8/15/2017 | 0.529 | 2.39 | 52.31 | 3.538 | 45.888 |
| 7/22/2019 | 0.053 | 17.53 | 224.57 | 29.391 | 6.881 | 9/5/2017 | 0.505 | 4.32 | 36.59 | 76.836 | 291.665 |
| 8/7/2019 | 0.072 | 6.86 | 112.59 | 2.742 | 5.699 | 9/26/2017 | 0.291 | 6.57 | 64.10 | 134.030 | 126.577 |
| 8/12/2019 | 0.053 | 0.96 | 48.24 | 0.006 | 0.447 | 10/11/2017 | 0.826 | 5.91 | 47.47 | 159.921 | 530.968 |
| 9/4/2019 | 0.049 | 7.89 | 115.07 | 4.594 | 4.898 | 10/30/2017 | 0.445 | 13.40 | 116.51 | 702.124 | 244.075 |
| 9/11/2019 | 0.046 | 7.20 | 71.62 | 8.223 | 9.950 | 11/14/2017 | 0.494 | 9.53 | 27.17 | 3300.497 | 2516.911 |
| 9/24/2019 | 0.099 | 4.49 | 78.46 | 1.036 | 6.880 | 11/30/2017 | 0.260 | 4.84 | 60.55 | 44.229 | 68.966 |
| 10/3/2019 | 0.051 | 4.90 | 26.61 | 12.779 | 36.952 | 12/28/2017 | 0.446 | 7.97 | 30.99 | 1241.237 | 1222.135 |
| 1/3/2020 | 0.135 | 10.26 | 66.50 | 39.331 | 68.114 | 1/22/2018 | 0.136 | 11.29 | 54.75 | 1603.007 | 239.308 |
| 2/27/2020 | 0.246 | 4.91 | 56.87 | 2.821 | 38.845 | 2/15/2018 | 0.137 | 4.37 | 38.37 | 72.930 | 73.652 |
| 3/31/2020 | 0.124 | 6.00 | 42.88 | 11.063 | 51.519 | 3/6/2018 | 0.203 | 6.31 | 45.96 | 221.683 | 158.458 |
| 6/16/2020 | 0.067 | 11.67 | 117.79 | 20.983 | 13.961 | 4/2/2018 | 0.122 | 9.13 | 53.15 | 726.226 | 149.130 |
| 8/4/2020 | 0.078 | 8.67 | 93.75 | 10.091 | 14.174 | 4/24/2018 | 0.108 | 10.12 | 64.75 | 739.097 | 109.073 |
| 8/25/2020 | 0.119 | 9.19 | 56.15 | 35.510 | 67.330 | 7/3/2018 | 0.629 | 1.23 | 57.49 | 0.201 | 11.845 |
| 9/1/2020 | 0.152 | 1.39 | 7.69 | 0.991 | 105.435 | 7/9/2018 | 0.299 | 2.62 | 43.49 | 7.321 | 44.941 |
| 9/15/2020 | 0.505 | 3.39 | 33.14 | 1.888 | 111.824 | 7/24/2018 | 0.390 | 13.04 | 164.29 | 316.705 | 101.984 |
| 10/22/2020 | 0.360 | 8.88 | 57.58 | 29.438 | 181.165 | 8/14/2018 | 0.230 | 7.84 | 127.78 | 68.344 | 35.941 |
| 11/5/2020 | 0.754 | 1.27 | 9.97 | 0.411 | 259.022 | 8/20/2018 | 0.605 | 12.67 | 138.61 | 395.745 | 209.253 |
| 11/10/2020 | 0.124 | 2.69 | 5.00 | 32.875 | 759.993 | 8/28/2018 | 0.514 | 13.11 | 223.13 | 175.382 | 73.545 |
| 11/17/2020 | 0.817 | 2.15 | 5.00 | 13.416 | 3197.965 | 9/3/2018 | 0.520 | 10.93 | 100.84 | 415.053 | 253.373 |
| 11/24/2020 | 0.080 | 7.34 | 32.98 | 41.887 | 83.908 | 9/11/2018 | 0.707 | 6.14 | 105.89 | 37.378 | 98.384 |
| 12/8/2020 | 0.238 | 9.80 | 34.47 | 121.847 | 408.192 | 9/25/2018 | 0.389 | 4.18 | 19.37 | 239.939 | 749.910 |
| 12/15/2020 | 0.091 | 3.46 | 20.00 | 5.624 | 57.943 | 10/3/2018 | 0.245 | 4.22 | 10.10 | 916.689 | 1771.563 |
| 12/22/2020 | 0.614 | 6.26 | 49.61 | 9.794 | 207.014 | 10/17/2018 | 0.205 | 7.85 | 48.23 | 482.171 | 224.754 |
| 12/30/2020 | 0.240 | 6.96 | 8.30 | 534.655 | 3573.526 | 10/25/2018 | 0.784 | 1.38 | 10.80 | 9.186 | 530.833 |
| 1/5/2021 | 0.238 | 6.03 | 22.10 | 42.489 | 375.751 | 10/29/2018 | 0.860 | 8.29 | 34.79 | 1151.144 | 2023.798 |
| 1/13/2021 | 0.542 | 6.50 | 40.57 | 17.023 | 294.876 | 11/5/2018 | 0.666 | 6.96 | 45.41 | 336.957 | 649.691 |
| 1/19/2021 | 0.237 | 3.30 | 41.23 | 1.095 | 32.102 | 11/12/2018 | 0.741 | 6.79 | 30.66 | 666.352 | 1504.015 |
| 1/26/2021 | 0.363 | 13.60 | 93.44 | 61.501 | 162.803 | 11/19/2018 | 1.050 | 16.79 | 94.04 | 2655.774 | 1388.097 |
| 2/3/2021 | 0.306 | 7.80 | 81.21 | 8.810 | 59.854 | 11/26/2018 | 0.342 | 9.26 | 49.70 | 878.040 | 491.573 |
| 2/10/2021 | 0.518 | 7.09 | 55.13 | 13.050 | 181.289 | 12/3/2018 | 0.762 | 8.24 | 32.97 | 1254.455 | 1973.399 |
| 2/24/2021 | 0.164 | 8.66 | 30.73 | 93.485 | 276.270 | 12/11/2018 | 0.481 | 9.50 | 41.59 | 1390.537 | 1040.443 |
| 3/9/2021 | 0.275 | 11.64 | 96.94 | 30.662 | 84.049 | 12/17/2018 | 0.550 | 4.48 | 64.76 | 28.453 | 109.316 |
| 3/23/2021 | 0.075 | 5.56 | 31.62 | 15.003 | 49.103 | 1/3/2019 | 0.767 | 5.62 | 65.14 | 69.330 | 236.584 |
| 3/30/2021 | 0.093 | 20.94 | 91.30 | 362.042 | 103.431 | 1/7/2019 | 1.083 | 10.24 | 47.12 | 1461.199 | 2118.589 |
| 4/6/2021 | 0.440 | 9.36 | 112.86 | 9.458 | 64.071 | 1/16/2019 | 0.617 | 2.59 | 22.19 | 26.986 | 348.294 |
| 4/13/2021 | 0.193 | 3.36 | 58.68 | 0.581 | 13.389 | 1/25/2019 | 0.591 | 8.66 | 99.46 | 167.571 | 185.421 |
| 4/21/2021 | 0.113 | 10.17 | 73.85 | 30.788 | 45.177 | 1/31/2019 | 0.832 | 15.29 | 66.44 | 3658.879 | 1827.287 |
| 5/4/2021 | 0.165 | 19.31 | 84.23 | 307.602 | 184.056 | 2/12/2019 | 0.727 | 13.39 | 132.49 | 541.176 | 307.673 |
| 5/17/2021 | 0.270 | 18.26 | 203.34 | 42.204 | 46.066 | 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 |
| | | | | | | 3/11/2019 | 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 |

Figura A2. Parámetros adimensionales para las zonas 3 y 4.

| FECHA | V_0 (cm/d) | P (mm) | Q (m ³ /s) | $X = \frac{(P)^4 g h_s j}{(Q)^2 \tan \theta}$ | $Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$ | FECHA | V_0 (cm/d) | P (mm) | Q (m ³ /s) | $X = \frac{(P)^4 g h_w j}{(Q)^2 \tan \theta}$ | $Y = \frac{V k A (P)^2}{(Q)^2}$ |
|------------|--------------|--------|-----------------------|---|---------------------------------|------------|--------------|--------|-----------------------|---|---------------------------------|
| 11/1/2016 | | | | | | 8/11/2016 | 0.4191066 | 8.69 | 190.00 | 13.162 | 27.662 |
| 11/14/2016 | 0.896 | 9.74 | 51.30 | 316.084 | 421.551 | 8/15/2016 | 0.5026788 | 7.75 | 190.00 | 8.296 | 26.341 |
| 11/30/2016 | 0.853 | 11.58 | 43.92 | 863.579 | 774.866 | 8/29/2016 | 0.3461281 | 5.61 | 73.20 | 15.394 | 64.129 |
| 12/13/2016 | 0.759 | 4.30 | 27.77 | 41.134 | 237.932 | 9/16/2016 | 0.2674617 | 7.70 | 67.47 | 64.153 | 109.759 |
| 1/6/2017 | 0.416 | 4.54 | 37.15 | 28.518 | 81.169 | 9/29/2016 | 0.2834915 | 7.71 | 84.91 | 40.876 | 73.784 |
| 1/16/2017 | 0.922 | 10.51 | 68.78 | 238.540 | 281.065 | 10/11/2016 | 0.2761585 | 5.19 | 65.22 | 14.150 | 55.054 |
| 2/1/2017 | 0.723 | 7.18 | 61.15 | 65.730 | 130.129 | 11/1/2016 | 0.176866 | 2.97 | 40.48 | 3.929 | 29.936 |
| 2/13/2017 | 0.818 | 4.07 | 45.46 | 12.241 | 85.472 | 11/14/2016 | 0.2458872 | 9.74 | 67.16 | 165.984 | 163.050 |
| 3/3/2017 | 0.782 | 9.84 | 48.46 | 369.235 | 420.959 | 11/30/2016 | 0.5436186 | 11.58 | 49.82 | 604.040 | 927.075 |
| 3/14/2017 | 0.89 | 3.28 | 37.35 | 7.673 | 89.604 | 12/13/2016 | 0.3656328 | 4.30 | 28.02 | 36.365 | 271.963 |
| 3/31/2017 | 1.005 | 9.66 | 48.18 | 346.959 | 527.485 | 1/6/2017 | 0.2686231 | 4.54 | 39.93 | 22.228 | 109.635 |
| 4/18/2017 | 1.479 | 14.01 | 78.08 | 584.467 | 621.688 | 1/16/2017 | 0.1096205 | 10.51 | 68.78 | 214.530 | 80.694 |
| 5/2/2017 | 0.114 | 14.63 | 83.60 | 606.188 | 45.577 | 2/1/2017 | 0.3061029 | 7.18 | 62.02 | 57.651 | 129.538 |
| 8/31/2017 | 0.390 | 4.59 | 41.16 | 24.22979249 | 63.315 | 2/13/2017 | 0.1592349 | 4.07 | 47.47 | 10.104 | 36.860 |
| 9/19/2017 | 0.194 | 6.32 | 59.94 | 41.06620027 | 28.156 | 3/3/2017 | 0.304785 | 9.84 | 48.78 | 328.554 | 391.488 |
| 10/11/2017 | 0.321 | 4.27 | 46.70 | 14.0970235 | 35.035 | 3/14/2017 | 0.160412 | 3.28 | 37.35 | 6.906 | 39.013 |
| 10/30/2017 | 0.260 | 12.07 | 116.88 | 143.6806749 | 36.197 | 3/31/2017 | 0.1954302 | 9.66 | 48.18 | 311.969 | 247.663 |
| 11/14/2017 | 0.284 | 9.61 | 27.94 | 1010.39324 | 438.614 | 4/18/2017 | 0.362874 | 14.15 | 83.37 | 479.973 | 329.631 |
| 11/30/2017 | 0.235 | 4.93 | 60.18 | 15.0845721 | 20.589 | 5/2/2017 | 0.4498892 | 14.63 | 83.60 | 544.841 | 434.194 |
| 12/28/2017 | 0.258 | 7.52 | 32.00 | 288.8158947 | 186.005 | 5/15/2017 | 0.2358978 | 13.19 | 78.43 | 409.420 | 210.380 |
| 1/22/2018 | 0.202932 | 4.10 | 53.82 | 9.021894097 | 15.375 | 5/30/2017 | 0.2004326 | 7.07 | 62.85 | 52.548 | 79.909 |
| 2/15/2018 | 0.1934315 | 13.13 | 107.42 | 238.1981001 | 37.727 | 6/14/2017 | 0.2243056 | 13.32 | 101.82 | 252.646 | 121.040 |
| 3/6/2018 | 0.1618601 | 5.21 | 45.96 | 32.26044686 | 27.155 | 7/3/2017 | 0.1584382 | 6.49 | 76.17 | 25.486 | 36.298 |
| 4/2/2018 | 0.1691388 | 7.02 | 53.15 | 79.49007641 | 38.513 | 7/14/2017 | 0.1897317 | 5.31 | 106.76 | 5.802 | 14.797 |
| 4/24/2018 | 1.5921129 | 9.50 | 65.58 | 175.1367154 | 436.138 | 8/1/2017 | 0.1374575 | 13.27 | 180.77 | 79.038 | 23.368 |
| 6/11/2018 | 0.8058859 | 6.83 | 126.81 | 12.51574279 | 30.522 | 8/15/2017 | 0.1480385 | 2.39 | 52.31 | 0.997 | 9.768 |
| 6/27/2018 | 0.7887278 | 10.49 | 170.90 | 38.33939689 | 38.792 | 9/5/2017 | 0.0569716 | 4.32 | 36.59 | 21.730 | 25.089 |
| 7/9/2018 | 0.6431851 | 1.59 | 50.49 | 0.231868513 | 8.327 | 9/19/2017 | 0.0896256 | 9.09 | 72.16 | 108.920 | 44.804 |
| 7/24/2018 | 0.6060526 | 11.44 | 164.29 | 58.68273897 | 38.361 | 10/11/2017 | 0.047953 | 4.52 | 47.63 | 15.318 | 13.620 |
| 8/14/2018 | 0.6488272 | 6.17 | 94.07 | 15.14550142 | 36.439 | 10/30/2017 | 0.1498076 | 13.40 | 116.51 | 197.868 | 62.522 |
| 8/28/2018 | 0.7174601 | 12.81 | 190.25 | 68.80340276 | 42.465 | 11/14/2017 | 0.0888135 | 9.53 | 27.17 | 930.125 | 344.616 |
| 9/11/2018 | 0.6978315 | 8.45 | 138.23 | 24.67685778 | 34.045 | 11/30/2017 | 0.0791 | 4.84 | 60.55 | 12.464 | 15.942 |
| 9/25/2018 | 0.3568928 | 4.31 | 20.39 | 76.79577613 | 208.277 | 12/28/2017 | 0.1591083 | 7.97 | 31.60 | 335.923 | 318.970 |
| 10/17/2018 | 0.4444015 | 6.73 | 34.71 | 157.4916704 | 218.134 | 1/22/2018 | 0.1833229 | 11.29 | 41.16 | 799.368 | 435.279 |
| 11/5/2018 | 0.3921638 | 4.12 | 28.60 | 32.5754556 | 106.239 | 2/15/2018 | 0.1687212 | 4.37 | 38.37 | 20.553 | 68.903 |
| 12/4/2018 | 1.3335451 | 9.46 | 51.59 | 278.2956369 | 585.400 | 3/6/2018 | 0.1055218 | 6.31 | 45.96 | 62.390 | 62.688 |
| 12/17/2018 | 1.0528135 | 5.91 | 52.06 | 41.62362937 | 177.107 | 4/2/2018 | 0.1157328 | 9.13 | 53.15 | 204.660 | 107.667 |
| 1/16/2019 | 0.7237033 | 4.08 | 53.41 | 8.981922266 | 55.123 | 4/24/2018 | 0.2025206 | 8.87 | 64.76 | 122.999 | 119.883 |
| 2/12/2019 | 0.8606703 | 12.89 | 109.91 | 211.3425477 | 154.539 | 5/31/2018 | 0.4350566 | 16.69 | 214.83 | 139.818 | 82.771 |
| 3/11/2019 | 0.7639129 | 8.40 | 59.18 | 131.4752749 | 200.932 | 6/11/2018 | 0.4350566 | 8.94 | 126.81 | 33.012 | 68.139 |
| 4/2/2019 | 0.9607457 | 8.70 | 80.97 | 80.81247666 | 144.800 | 6/27/2018 | 0.2305095 | 11.91 | 170.90 | 57.327 | 35.299 |
| 4/15/2019 | 0.9290251 | 8.64 | 72.54 | 97.93762143 | 172.056 | 7/9/2018 | 0.1287594 | 1.92 | 42.17 | 0.637 | 8.425 |
| 5/1/2019 | 0.8465101 | 8.90 | 67.52 | 127.2755095 | 192.007 | 7/24/2018 | 0.1227135 | 13.04 | 164.29 | 89.252 | 24.391 |
| 5/22/2019 | 0.702263 | 10.41 | 161.98 | 41.39206051 | 37.865 | 8/14/2018 | 0.1345086 | 6.64 | 94.07 | 18.237 | 21.107 |
| 5/28/2019 | 0.7654436 | 10.88 | 80.15 | 201.7326878 | 184.142 | 8/28/2018 | 0.1712379 | 12.92 | 188.33 | 65.422 | 25.422 |
| 6/13/2019 | 0.6649274 | 10.40 | 103.25 | 101.4926212 | 88.077 | 9/11/2018 | 0.1465398 | 8.19 | 138.23 | 19.627 | 16.235 |
| 6/25/2019 | 0.6244915 | 12.30 | 194.51 | 55.95061563 | 32.602 | 9/25/2018 | 0.0954364 | 4.18 | 20.39 | 61.066 | 126.460 |
| 7/1/2019 | 0.5352483 | 8.08 | 137.71 | 20.78643157 | 24.057 | 10/17/2018 | 0.0334529 | 6.53 | 34.71 | 125.596 | 37.337 |
| 8/7/2019 | 1.4119162 | 7.72 | 126.30 | 20.59335256 | 68.869 | 11/5/2018 | 0.1047753 | 4.89 | 28.60 | 58.283 | 96.674 |
| 8/30/2019 | 1.6396219 | 8.51 | 159.61 | 19.03998749 | 60.852 | 11/20/2018 | 0.1465342 | 11.44 | 64.49 | 342.767 | 145.407 |
| 9/6/2019 | 1.7990576 | 3.89 | 48.32 | 9.069727501 | 152.216 | 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 |

Figura A3. Parámetros adimensionales para las zonas 5 y 6.