



## Caracterización geomecánica de secuencias Ignimbríticas. Sitio del Proyecto Hidroeléctrico “Las Cruces”

Geomechanical characterization of ignimbrite sequence. Site of the Hydroelectrical project “Las Cruces”

Edgar MONTIEL<sup>1</sup>, Julio C. CHABLE<sup>2</sup>

<sup>1 y 2</sup>Ingeniero de Proyectos, Comisión Federal de Electricidad, GEIC, Mecánica de Rocas

**RESUMEN:** La construcción del proyecto del Tren Interurbano México-Toluca, depende fundamentalmente de tres aspectos: las condiciones topográficas, las condiciones hidrológicas y las condiciones geológico – geotécnicas. En este artículo se muestra el proceso y los resultados de la caracterización geomecánica de un sitio seleccionado para la construcción del bitúnel de 4.7 km, el cual forma parte de dicho Proyecto . Después de introducirse en la condición geológica del sitio, se enuncia el procedimiento realizado para definir las propiedades geomecánicas de materiales heterogéneos, evidenciando la importancia de reconocer y generar un acopio de información de campo sobre las características geotécnicas de macizos rocosos localizadas en las galerías del bitúnel, en los que la roca intacta no es representativa de la masa en su totalidad, datos que serán de importancia en la información generada sobre la estabilidad y tratamientos que deberán colocarse para las excavaciones en las galerías que conforman el bitúnel.

**ABSTRACT:** The feasibility of a site for the construction of hydroelectric plants depends on three aspects: the topography, the hydrological and geological - geotechnical conditions. This article demonstrates the process and results of the geomechanical characterization of a selected site for the construction of a hydroelectric plant in the ignimbrite of Nayar. After entering into the geological condition of the site, states the procedure to define the geomechanical properties of heterogeneous materials, demonstrating the importance of recognizing and generating a collection of field information on the geotechnical characteristics of rock masses in which the rock intact is not representative of the estate as a whole, data that will be of importance in the information generated on stability and treatments to be affixed to the excavations. It also integrates the review of certain conditions from the standpoint of geological and geotechnical could affect the project.

### 1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto Hidroeléctrico “Las Cruces” de la Comisión Federal de Electricidad, requiere llevar cabo para su construcción, los estudios de factibilidad en el sitio, con el objetivo de albergar una cortina de Concreto Compactado con Rodillo (CCR) de alrededor de 180 metros de altura.

Con base en los resultados de los trabajos obtenidos por el departamento de geología de la GEIC y en conjunción con los estudios de campo y laboratorio realizados por el departamento de mecánica de rocas e inyecciones (DMRI), el presente documento pretende mostrar las consideraciones , actividades realizadas y resultados obtenidos que generaron el modelo geológico-geotécnico del sitio Las Cruces.

### 2 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

Fisiográficamente el P.H. Las Cruces, se localiza en la Sierra Madre Oriental, en la porción Central del estado de Nayarit y en la parte baja de la cuenca del río San Pedro, a 65 km y a 30° al Noroeste de la ciudad de Tepic.

La Cortina de Concreto Compactado con Rodillo (CCR) que formará parte del proyecto, tiene una altura de 176 m (a partir del nivel del lecho del río 83 msnm), una longitud de corona de 800 m, así como un ancho de corona de 8 m.

El arreglo de obras que componen al proyecto muestra que todas ellas, salvo las ataguías se alojan en la cortina.



Figura 1. Ubicación del sitio del PH. Las Cruces.

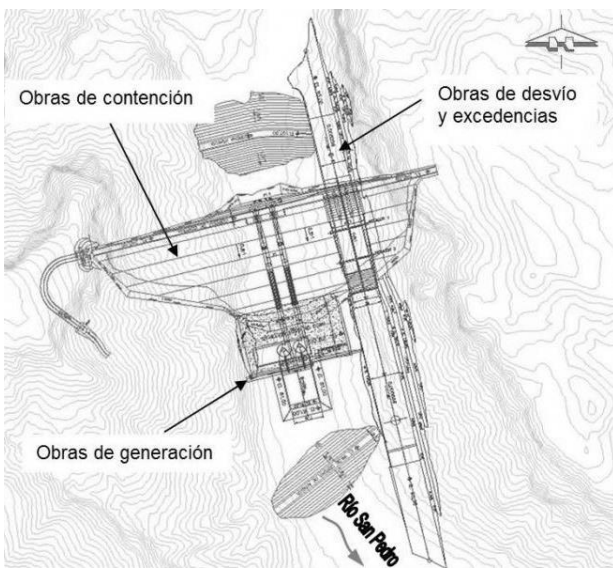
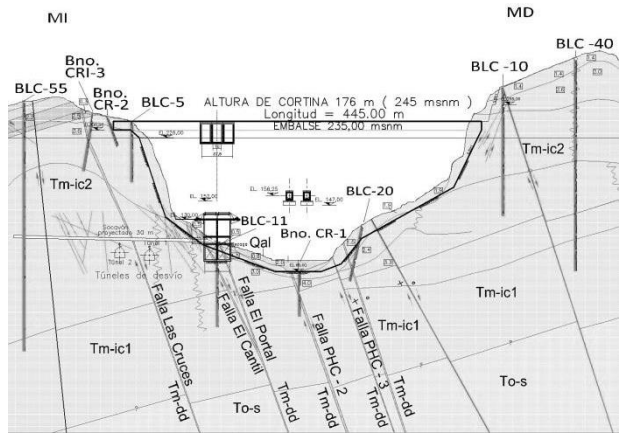


Figura 2. Arreglo de Obras del PH. Las Cruces.

### 3 GEOLOGÍA DEL SITIO Y CONDICIONES GEOTECNICAS DETECTADAS

El sitio en estudio se encuentra geológicamente ubicado en la secuencia Ignimbrítica del Nayar, teniendo como roca base en la boquilla una serie de secuencias de tobas arenosas de grano fino a grueso y tobas arcillosas rojizas. Concordante a esta roca, supra yacen las Unidades “Corapan” y “Las Cruces”, siendo la primera de ellas constituida por una intercalación de paquetes de ignimbritas y tobas de composición riolítica, con un espesor aproximado de 183m.

La segunda unidad está compuesta por una riolita fluidal e ignimbrita lítica y presenta un espesor promedio de 75m. En la siguiente figura se puede observar la distribución de los tipos de roca encontradas en el sitio de la boquilla.



NOMENCLATURA			LITOLOGÍA
Qal	Qsr	Qdt	Depósitos de aluvión, suelo residual y depósitos de talud
DISCORDANCIA			
Tm-dd			Diques diabásicos de tono gris oscuro a verdoso, textura porfídica, estructura compacta, duro y denso, presenta hematización, cloritización y silicificación.
Tm-pa			Dique pórfido andesítico de tonos violáceos, altera a un tono oscuro con fenocristales blanquecinos, textura porfídica, estructura en dique o en dique estrato, duro.
<b>Secuencia Ignimbrítica del Nayar</b>			
<b>Unidad Corapan</b> Compuesta por una intercalación de paquetes de ignimbritas y tobas de composición riolítica.			
Tm-ci3			Tm-ci(2,3): Ignimbrita gris clara, textura piroclástica, fuertemente soldada, estructura compacta, dura.
Tm-ct3			Tm-ct(1,2,3): Toba de tono rojos a ocre con pigmentos blancos (posibles plagioclasas), textura piroclástica, estructura en estratos medianos y porosos se caracteriza por ser una roca permeable y se altera fácilmente a un material arcillo-arenoso.
Tm-ci2			Tm-ci1: Ignimbrita gris clara en su parte superior y rojiza en la inferior, textura piroclástica, fuertemente soldada, estructura compacta, dura.
Tm-ct2			Tm-ct1
Tm-ct1			<b>Unidad Las Cruces</b> Riolita fluidal e ignimbritas riolíticas y líticas, diferenciándose por su textura, color y contenido lítico.
Tm-ic2			Tm-ic2: Ignimbritas líticas de composición riolítica de tonos rojizos y blanquecinos de textura piroclástica, compacta, roca dura, con oquedades parcialmente rellenas de cristales de cuarzo. Localmente existe una variación de toba blanquecina alterada por hidrotremalismo.
Tm-ic1			Tm-ic1: Riolita fluidal de tono gris claro, textura (mesostasis) afanítica, con minerales (cuarzo) alineados en la dirección del flujo. En su base se compone de un vitrificado color negro y rojizo.
Tom-ta			Tom-ta: alternancia de tobas arenosas rojizas a verdosas, líticas de grano fino a grueso, de composición riolítica, con textura piroclástica, sacaroide, con lineamientos en una mesostasis desvitrificada con calcita.

Figura 3. Litología del sitio.

Las secuencias ignimbríticas de las formaciones “Las Cruces” y “Corapan” presentan una inclinación de pseudoestratificación en dirección hacia el NE con alrededor de 20°.

Por lo que respecta a la geología estructural, se encontró que el sitio se encuentra regido por un sistema de fallamiento regional con orientación NW-

SE, el cual presenta una inclinación hacia el SW mayor a los  $55^\circ$ .

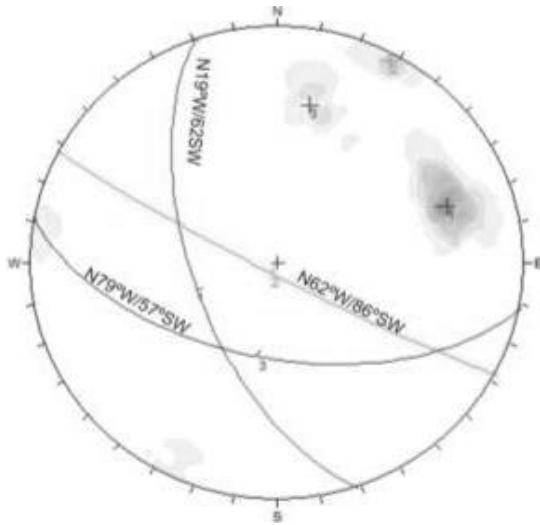


Figura 4. Estereograma de sistemas de fallas en el sitio.

### 3.1 Clasificación geomecánica y mecanismos de comportamiento en superficie

Para determinar los parámetros que definirán el comportamiento del macizo rocoso, es necesario realizar una caracterización y definición de las calidades de los materiales de estas zonas. Los sitios seleccionados para llevar a cabo estas actividades, fueron ubicados en cortes de caminos y afloramientos expuestos de roca. Los criterios de clasificación geomecánica utilizados en campo para estimar la calidad del macizo rocoso fueron: el GSI (Hoek y Brown 1997), RMR89 (Bieniawski 1989), Q (Barton 2002) aunados a los valores del Martillo Schmidt y descripción de discontinuidades para solventar el criterio de Barton – Choubey, (González *et al.* 2002).

Durante la ejecución de estos levantamientos se pudieron visualizar y definir algunos de los posibles mecanismos de falla que se presentarán durante la etapa de excavaciones de las obras. Los mecanismos identificados fueron los siguientes:

1.- El efecto del agua en la resistencia de un dique diabásico de echado casi vertical y fracturamiento de la roca supra yacente.

Este mecanismo de falla se debió a las lluvias que se presentaron anteriormente, los efectos del agua fueron los siguientes:

- Reducción de las propiedades de resistencia del dique al humectarlo
- Presiones por expansión de arcillas en el material que constituyen el relleno de las fracturas del dique.
- Creación de presiones hidrostáticas en el bloque a manera de empujes.

Estas acciones propiciaron la falla de pie del bloque de acuerdo a la figura 6.

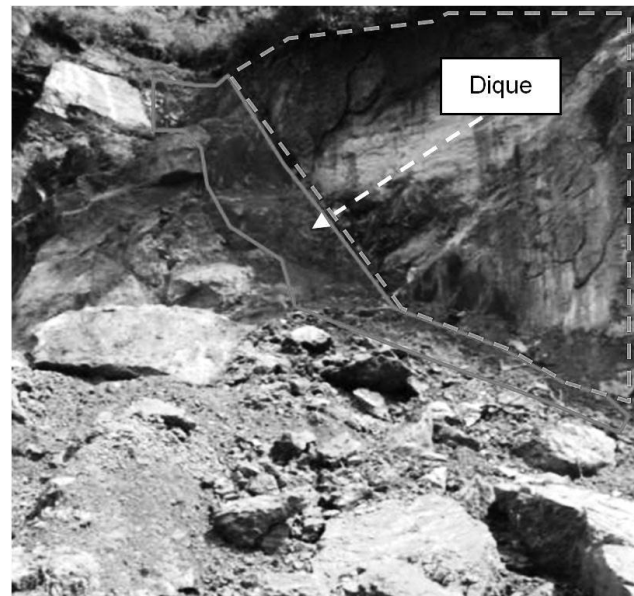


Figura 5. Levantamientos geomecánicos y descripción de mecanismos de comportamiento.

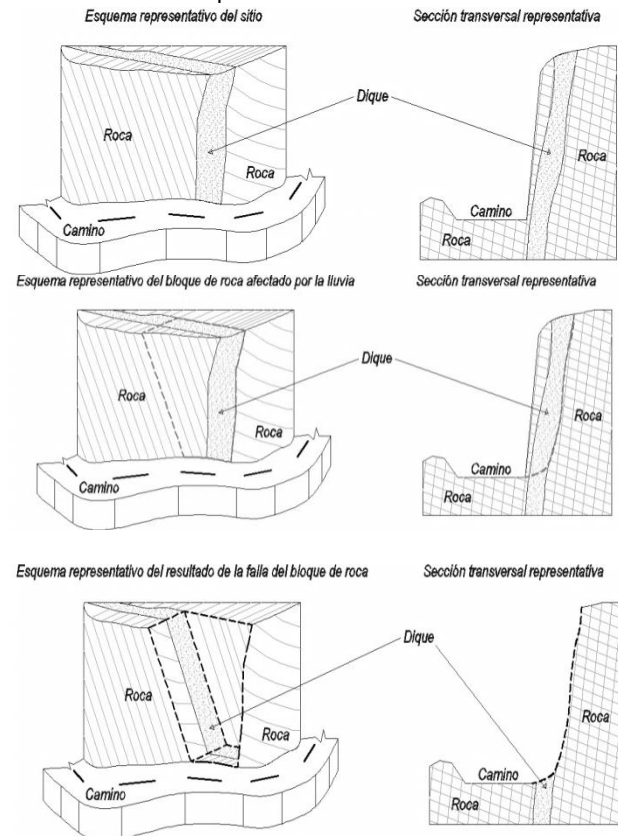


Figura 6. Mecanismo de falla identificado en diques con poca cobertura de roca hacia la excavación

Otro mecanismo de falla identificado fue la degradación progresiva de los diques diabásicos ante la presencia de agua.

### 3.1.1 Clasificación geomecánica en profundidad

La clasificación geomecánica en profundidad se realizó mediante exploración directa e indirecta.

La exploración directa realizada consto de la barrenación y descripción geológica detallada por cada unidad geológica, la tabla 1 muestra los resultados promedio de este trabajo.

Tabla 1. RQD versus Tipo de Roca.

Unidad geológica - Litología	Longitud		Rec.	Longitud de muestras > 10 cm (m)	RQD (%)	Calidad de roca
	Perf. (m)	Re. (m)				
Corapán Ignimbritas	227	213	94	185	81	Buena
Corapán Tobas	111	101	92	68	63	Regular
Cruces Ignimbritas	1812	1659	92	1307	72	Regular
Cruces Riolita	1332	1245	93	917	69	Regular
Dique diabásico	97	84	86	53	55	Regular
Tobas arenosas	249	245	99	222	89	Buena
Vitrófico	26	26	98	23	89	Buena

Donde: Perf. = Perforada; Re. = Recuperada; Rec. = Recuperación; RQD = índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation).

Además y como apoyo a este trabajo se realizó el levantamiento geológico de un socavón exploratorio, el cual sirvió para conocer la condición de las grandes discontinuidades en el sitio.

La exploración indirecta realizada en el sitio consistió en estudios geofísicos y de petite – sismique.

## 4 MODELO GEOMECÁNICO

Para definir propiedades índices y parámetros de resistencia, a la par de la definición del modelo geomecánico, se realizaron trabajos geotécnicos de campo y de laboratorio para cada una de las unidades litológicas.

La metodología seguida fue la siguiente:

1.- Con los resultados de laboratorio y con ayuda del criterio de Deere y Miller, (González *et al.* 2002) se clasificó el comportamiento de la roca intacta, todo a partir de procesos estadísticos.

2.- Una vez definidos los parámetros de la roca intacta, se procedió a determinar los parámetros que definirán el comportamiento del macizo rocoso a través de clasificaciones geomecánicas (RMR, Q y GSI) en conjunción a los resultados de geofísica,

perforación y geología de superficie, (González *et al.* 2002).

### 4.1 Análisis de resultados de laboratorio

En general, el comportamiento de la roca intacta en las tobas e ignimbritas del sitio arrojó una gran dispersión de los resultados en las pruebas mecánicas, esto debido a la condición de la roca a nivel de núcleo y a la gran cantidad de imperfecciones, tales como fiammes, oquedades y férulas.

En sitio, las clasificaciones geomecánicas permitieron observar que estas rocas tienen excelentes condiciones de superficie así como poco fracturamiento, además su respuesta al golpe con el martillo presenta una roca de resistencia excelente.

Para estimar los parámetros adecuadamente, se optó por realizar un promedio grueso de los resultados de laboratorio. En la tabla 2, se presentan las fotografías de tres probetas de un mismo barreno, se puede apreciar que la resistencia a la compresión simple está en función de las oquedades.

Tabla 2. Comparativa de resistencias y condición del núcleo.

Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Prof. 17 m	Prof. 52 m	Prof. 61 m
Mc = 88 MPa	Mc=17 MPa	Mc = 43 MPa
E=27297 MPa	E=10173 MPa	E=18430 MPa



El módulo de elasticidad fue obtenido con las deformaciones al 50% de la resistencia a la compresión simple. En paralelo se realizaron pruebas de resistencia a la tensión y pruebas triaxiales, con la finalidad última de definir la constante  $m_i$ , valor propuesto por Hoek para definir de forma general el comportamiento de la roca intacta. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Las propiedades índices de cada unidad litológica obtenidas en laboratorio, se muestran en el siguiente cuadro.

### 4.2 Definición de parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo rocoso

Los parámetros de deformabilidad se definieron a partir de la comparación de los resultados de las pruebas mecánicas de campo y las de laboratorio, escalando los valores de los ensayos mediante el uso

de ecuaciones para establecer cual se asemeja más al comportamiento observado en campo.

Tabla 3. Resultados de propiedades mecánicas de la roca intacta.

Unidad geológica	Lit.	$\sigma_i$ MPa	$E_{150}$ MPa	$\sigma_t$ MPa	D&M	$m_i$ adm	$c$ MPa	$\phi$ °
Corapán	Ig	59,0	17754	7,2	CM	12,8	11,3	45,5
	T	33,3	9542	2,6	DM	4,7	8,3	34,0
Cruces	Ig	44,21	17577	3,9	DM	14,5	6,4	46,8
	R	85,1	21579	8,0	CM	12,6	16,3	45,5
Dique diabásico		36,1	15710	---	DM	12,5	6,9	45,3
Tobas arenosas		111,5	21884	6,1	BL	7,9	23,9	40,2
Vitrófico		54,4	32232	5,8	DH	11,4	10,7	44,4

Donde: Lit. = litología; Ig = ignimbrita; T = toba;  $\sigma_i$  = resistencia a compresión simple;  $c$  = cohesión;  $E_{150}$  = módulo de deformación tangente al 50%;  $\phi$  = fricción;  $\sigma_t$  = resistencia a la tensión indirecta;  $m_i$  = constante de la roca intacta; D&M = Clasificación Deere y Miller.

Tabla 4. Resultados de propiedades índices de la roca intacta.

Unidad litológica	Roca	W %	$\gamma_{Amb}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{Sat}$ kN/m <sup>3</sup>	i %	a %
Corapán	Ignimbritas	6,1	20,8	21,8	6,0	8,0
	Tobas	6,0	21,6	22,7	3,9	7,9
Cruces	Ignimbritas	5,7	22,0	22,8	4,7	6,9
	Riolita	4,9	22,1	23,3	3,0	5,0
Dique diabásico		7,7	20,5	21,9	9,7	10,9
Tobas arenosas		1,9	24,5	24,5	1,0	3,0
Vitrófico		4,0	22,0	22,1	2,0	4,7

Dónde: W = contenido de agua natural; a = índice de absorción; i = índice de alteración.

### 4.3. Ensayes de campo

Las pruebas mecánicas realizadas fueron los ensayos de Gato Plano, Placa Flexible y Gato Goodman, de las cuales las dos primeras fueron realizadas dentro de un socavón de exploración, probando la unidad litológica Tmic2. Los levantamientos geomecánicos realizados en los sitios de prueba presentan una roca de buena calidad. La prueba de placa flexible, determina el módulo de deformabilidad estático de un macizo a un cierto nivel de esfuerzo El valor definido se puede consultar en la figura 7, (Marsal y Reséndiz 1979).

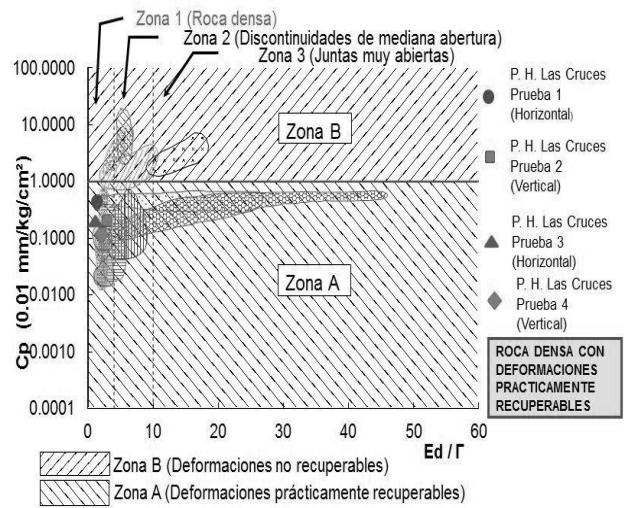


Figura 7. Clasificación del macizo rocoso en función de su deformabilidad.

Las pruebas de gato plano determinan la magnitud de los esfuerzos principales preexistentes en el macizo rocoso ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ) (Marsal y Reséndiz 1979), las deformaciones en la dirección de los esfuerzos y por consiguiente el módulo de deformabilidad, (González *et al.* 2002).

Estos valores se obtienen aplicando de forma ascendente, ciclos de carga, hasta establecer una presión de cancelación, la cual es igual a la deformación de la ranura.

El resultado obtenido es una gráfica que relaciona la presión de contacto con el desplazamiento, permitiendo así establecer el módulo de deformabilidad de la roca. La gráfica del PH. Las Cruces, se muestra en la figura 8.

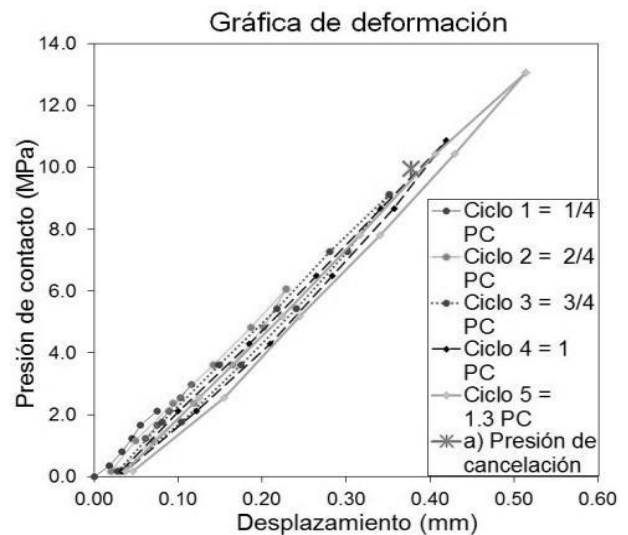


Figura 8. Realización de ciclos en la prueba de gato plano.

Los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas anteriores se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de pruebas de Módulos de Deformabilidad del Macizo Rocoso.

Socavón	Placa flexible		Gato Plano		RU (MPa)
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	
Principal (Ignimbrita)	17,036	11,225	12,291	11,027	119.51
Crucero Izquierdo (ignimbrita)	18,744	13,896	12,472	12,468	114.91
Promedio	17,890	12,561	12,382	11,748	117.21

Dónde: RU = resistencia uniaxial con esclerómetro.

Las pruebas de gato Goodman se realizaron en diferentes barrenos, definiendo la deformabilidad tanto de la de Ignimbrita Rioliítica (Tm-ic2) como de la Rioliita Fluidal (Tm-ic1). El resumen de los resultados preliminares obtenidos en campo, se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de los módulos de Gato Goodman.

Profundidad (m)	Tipo de roca	Módulo E (GPa)
8-25	Barreno BLC-94	6 590
25-36	Ignimbrita (Tm-ic2)	
	Barreno BLC-91	9 470
	Riolita Fluidal (Tm-ic1)	
Vertical	Ignimbrita (Tm-ic2)	12 080
Horizontal		9 540

#### 4.4 Definición de ecuación representativa, para estimación a diferentes calidades de roca

Para definir la deformabilidad del macizo rocoso en los diversos tipos de calidades que existen en el sitio, se obtuvo que, la ecuación propuesta por Hoek y Diederichs en 1996 (González *et al.* 2002), es la más conveniente para escalar el módulo de elasticidad de la roca intacta al macizo rocoso. En la tabla 7, se muestran los parámetros de resistencia, y deformabilidad del macizo rocoso representativo del sitio P.H. Las Cruces, los cuales evidencian la fuerte diferenciación entre las condiciones superficiales de la masa rocosa, que adquieren valores de GSI extremos, contra lo reportado en geofísica.

##### 4.4.1. Estado de esfuerzos

Dado que las masas de roca pueden verse afectadas por esfuerzos horizontales, mayores a los verticales (tectonismo) y aunado a que las pruebas de gato plano, requieren de la colocación de una roseta de referencias, fue factible establecer el estado de esfuerzos en el sitio. Las direcciones principales de esfuerzos fueron las definidas en la figura 10.

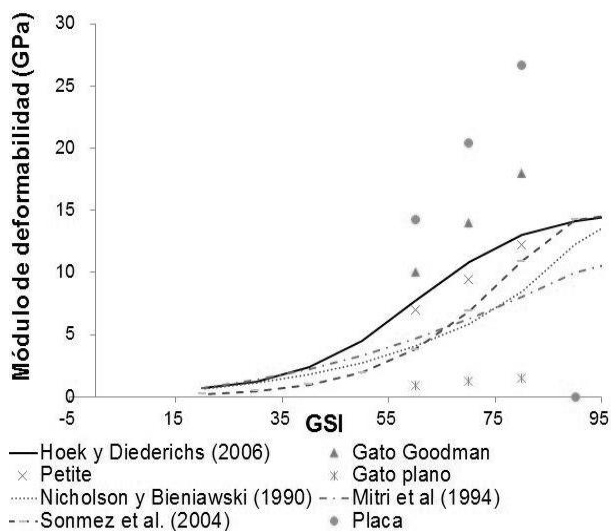


Figura 9. Deformabilidad del macizo rocoso.

Tabla 7. Resultados de propiedades mecánicas del macizo rocoso.

Unidad geológica	Litología	CR	GSI	$\sigma$ (MPa)	E (MPa)	$m_b$ adm
Corapan	Ignimbritas	DA	39	9,10	2647	1,445
		RS	70	18,25	13010	4,372
	Tobas	DA	34	2,76	1011	0,443
		RS	72	7,83	7334	1,722
Cruces	Ignimbritas	DA	39	7,54	2620	1,769
		RS	75	16,87	14348	6,398
	Riolita	RS	78	32,79	18494	5,763
Dique diabásico		DA	34	4,91	1665	1,188
		RS	65	9,79	9924	3,594
Tobas arenosas		RS	80	40,05	19266	3,844
		RS	78	16,00	27624	5,198
Vitrófido						

Unidad geológica	Litología	s adm	a adm	c (MPa)	$\phi$ °	n adm
Corapan	Ignimbritas	0,0011	0,512	2,67	29	0,3
		0,0357	0,501	4,40	38	0,20
	Tobas	0,0007	0,517	0,97	20	0,30
		0,0446	0,501	2,26	30	0,20
Cruces	Ignimbritas	0,0011	0,512	2 133	31	0,30
		0,0622	0,501	3,78	42	0,20
	Riolita	0,0868	0,501	7,54	41	0,20
Dique diabásico		0,0007	0,517	1,49	28	0,30
		0,0205	0,502	2,45	37	0,20
Tobas arenosas		0,1084	0,501	10,42	37	0,20
		0,0868	0,501	4,76	40	0,20

Dónde:  $\sigma$  = resistencia a compresión simple del macizo rocoso;  $c$  = cohesión;  $m_b$  y  $s$  = constantes del macizo rocoso en función del GSI; DA = roca descomprimida ó alterada; E = módulo de deformación tangente del macizo rocoso;  $\phi$  = fricción;  $n$  = módulo de Poisson; CR = condición de la roca; RS = roca sana.

Como se puede observar, el esfuerzo principal está alineado prácticamente con la vertical (González *et al.* 2002), con lo que se propone de forma conservadora, el uso del valor:

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\nu}{1-\nu} = 0,33 \quad (1)$$

Dónde:  $\nu$  = relación de Poisson del material en cuestión.

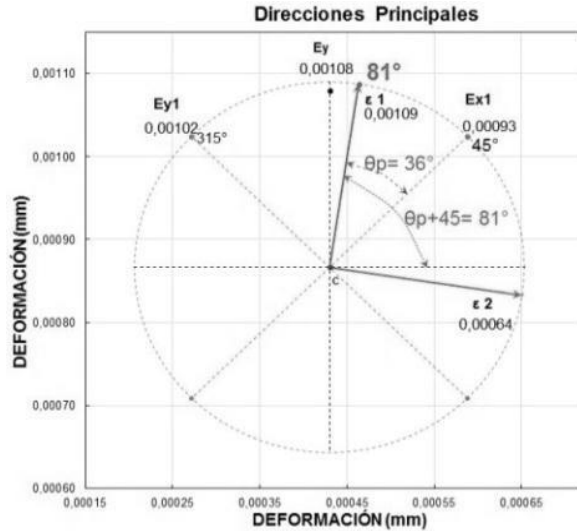


Figura 10. Dirección de los esfuerzos principales en la prueba de roseta.

#### 4.5 Criterio y definición de propiedades de las discontinuidades

Con respecto a la resistencia de las discontinuidades, se utilizaron dos criterios, dependiendo del tipo de discontinuidad:

- a) Discontinuidades de gran magnitud con relleno mayor a 5 centímetros (fallas geológicas y fracturas con relleno).
- b) Fracturas de menor espesor y contactos roca-roca.

##### 4.5.1 Propiedades en las discontinuidades de gran magnitud

Para poder establecer los parámetros de resistencia de este tipo de discontinuidades se realizaron pruebas de corte directo en muestras cúbicas extraídas del sitio.

Estas muestras fueron ensayadas en el laboratorio de mecánica de rocas de la GEIC, determinando en las pruebas los parámetros de resistencia pico y residual (Mohr-Coulomb) al esfuerzo cortante de los rellenos (González *et al.* 2002). Las propiedades obtenidas se describen en la tabla 7.

Para el caso de los diques diabásicos, estas enormes discontinuidades presentan en la roca que los compone minerales como la hematita, epidota y sericita, producto de la alteración hidrotermal y arcillas como la montmorillonita y la smectita, que al contacto con el agua generan comportamiento expansivo, lo cual propicia una reducción en sus propiedades de resistencia y deformabilidad, (tal

como se vio en campo de acuerdo a la figura 6) generando los valores reportados en la tabla 9.

Tabla 8. Propiedades de las discontinuidades de la roca intacta.

Ubicación	Discontinuidad	Resistencia	
		Máxima c (Mpa)	Residual $\phi_r$ (°)
Socavón exploratorio	Cuatro diferentes estructuras cuyo relleno coincide con arcillas arenosas de poco plástica a semi-plástica	0,013	17

Dónde: c = cohesión;  $\phi$  (°) = ángulo de fricción; ángulo residual.

Tabla 9. Resultados de propiedades mecánicas del dique húmedo.

Litología	CR	GSI	$\sigma$ MPa	E MPa	$m_b$ adm
Dique diabásico húmedo	DA	10	2,112	479,22	0,502
	RS	35	4,88	1781,6 2	1,227

Litología	s	a	c	$\phi$	$\nu$
	adm	adm	MPa	°	adm
Dique diabásico húmedo	0,000045	0,585	0,74	19,7	0,3
	4			0	5
	0,0007	0,516	1,47	27,9 3	0,3 0

Estas propiedades, son necesarias para realizar los análisis que permitirán diseñar los tratamientos de las diferentes excavaciones que tenga el proyecto, así como revisar y anticipar la seguridad de las mismas ante diferentes mecanismos de falla, tanto en las laderas como en profundidad.

##### 4.5.2 Propiedades de las discontinuidades de menor espesor y sistemas de fracturamiento (contactos roca – roca)

La obtención de los datos que definirán los parámetros de resistencia del criterio de Barton - Choubey (González *et al.* 2002) se obtuvieron en campo. La ecuación que define este criterio es la siguiente:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC_n \log_{10} \left( \frac{JCS_n}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (2)$$

Dónde:  $\tau$  y  $\sigma_n$  = Esfuerzos tangencial y normal sobre el plano de discontinuidad;  $JRC_n$  = Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad;  $JCS_n$  = Resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad;  $\phi_r$  = Ángulo de fricción interna residual de la roca, obtenido en función del ángulo básico y se correlación con el uso del esclerómetro.

Dado que la resistencia al esfuerzo cortante de estas juntas son función del esfuerzo vertical, se

realizó un promedio de dichos valores para definir los parámetros de resistencia para cada sistema de fracturamiento, los resultados se dan en la tabla 10.

Tabla 10. Características de las fallas y fracturas en la obra subestación.

Discontinuidad	(°)	Unidad Cruces		Unidad Corapán		Dique diabásico
		Ign	TB	Toba	Ign	
Pseudoestratificación	$\varnothing_{max}$	40	25	31	45	37
	$\varnothing_{res}$	35	20	28	43	34
Sistema de fracturamiento S1	$\varnothing_{max}$	41	24	32	46	36
	$\varnothing_{res}$	35	20	28	43	34
Sistema de fracturamiento S2	$\varnothing_{max}$	41	24	32	47	36
	$\varnothing_{res}$	35	20	28	43	34
Sistema de fracturamiento S3	$\varnothing_{max}$	41	24	-	-	36
	$\varnothing_{res}$	35	20	-	-	34

Donde: (°) = tipo de ángulo de fricción; Ign = ignimbrita; TB = toba blanquecina,  $\varnothing_{max}$  = ángulo máximo;  $\varnothing_{res}$  = ángulo residual.

#### 4.6 Zonificación de Permeabilidades

Para evaluar el impacto de las infiltraciones durante la ejecución de las excavaciones, el diseño de la pantalla impermeable y el efecto del vaciado hasta los niveles mínimos ordinarios, se requiere conocer la permeabilidad de las masas de roca, la cual a diferencia de los medios continuos, desarrollan su permeabilidad a través de las discontinuidades presentes en la masa. Para evaluar esta condición, se realizaron pruebas del tipo Lugeón en los barrenos. Los valores de permeabilidad obtenidos de las pruebas Lugeón de estas litologías se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Caracterización geotécnica de permeabilidad.

Unidad geológica	Litología	CR	GSI	U.L.	TP	Permeabilidad
						tipo (k) (m <sup>3</sup> /seg)
Corapán	Ignimbritas	DA	39	25,00	MP	2,5E-06
		RS	70	2,50	IP	2,5E-07
	Tobas	DA	34	18,00	P	1,8E-06
		RS	72	3,00	IP	3,0E-07
Cruces	Ignimbritas	DA	39	7,0 - 20	P	1,4E-06
		RS	75	0,23 - 7,0	PP	3,6E-07
	Riolita	DA	78	3,00	IP	3,6E-07
		DA	34	13,00	P	1,3E-06
Dique diabásico	RS	65	4,00	IP	4,0E-07	
	DA	80	4,00	IP	4,0E-07	
Tobas arenosas	DA	80	4,00	IP	4,0E-07	
	Vitrófico	DA	78	4,00	IP	4,0E-07

Donde: CR = condición de la roca; GSI = Índice de Resistencia Geológica (Geological Strength Index); U.L. = unidades Lugeon; TP = tipo de permeabilidad; MP = muy permeable; PP = poco permeable; P = permeable; IP = impermeable.

## 5 EVALUACIÓN DE CONDICIONES DESFAVORABLES

Como parte de los estudios realizados, es de gran importancia revisar las condiciones que eventualmente pudieran resultar desfavorables durante o después del desarrollo de la obra.

Como punto principal, se revisó a través de estereografía, la formación de macro-bloques en el sitio. Como resultado fueron ubicados dos bloques de tamaño considerable en cada margen de la boquilla. La figura 11 muestra estos bloques.

El bloque de la margen derecha, se genera por la intersección de planos cuya inclinación se orienta en dirección al SE con alrededor de 34°.

Realizando una sección transversal ubicada en la mitad del prisma, se visualiza que la intersección queda por debajo del nivel del río, dejando al bloque acuñado, descartando así un deslizamiento.

La margen izquierda por su parte, muestra un macro - bloque generado por la intersección de la Falla Las Cruces y la pseudoestratificación, combinación estructural que genera salida en cuanto a la cinemática del bloque.

El límite extensional de este, se da por la intersección de la Fallas Las Cruces con la Falla El Cantil, el análisis de sensibilidad de las propiedades de la intersección quedo definido de acuerdo al siguiente modelo de análisis, (ver figura 12).

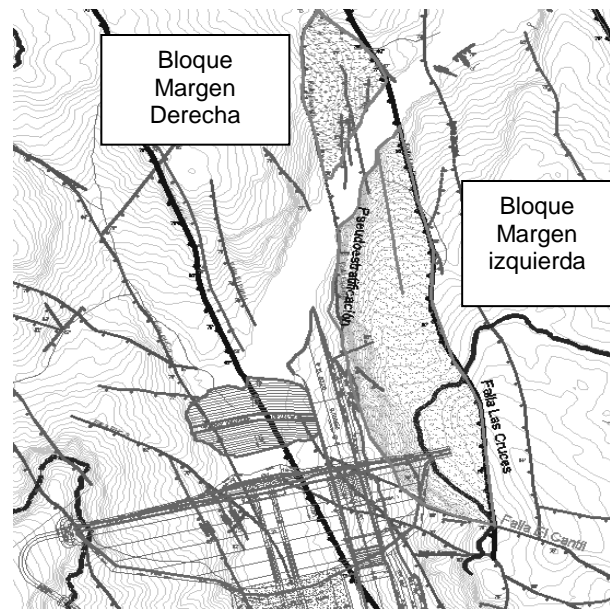


Figura 11. Ubicación de Bloques formados estructuralmente.

Este modelo se revisó en condiciones estáticas, pseudoestáticas y de vaciado rápido, determinándose que para mantener el equilibrio de la cuña (factor de seguridad de 1), se requiere un ángulo de fricción de alrededor de 22°, valor que resulta bajo considerando

los resultados obtenidos en las discontinuidades de contacto roca – roca. La figura 13, presenta una sección transversal de la cuña analizada.

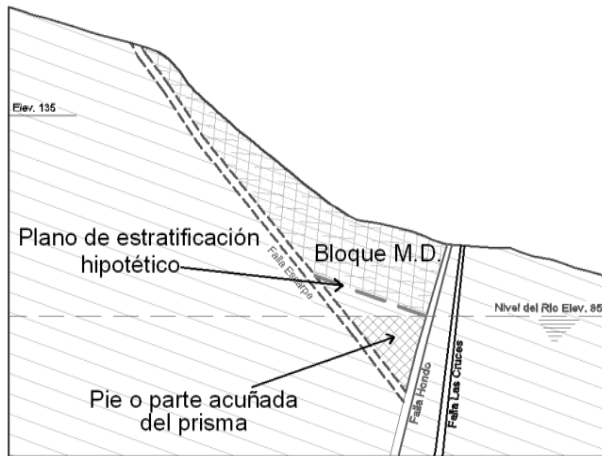


Figura 12. Configuración del bloque de margen derecha.

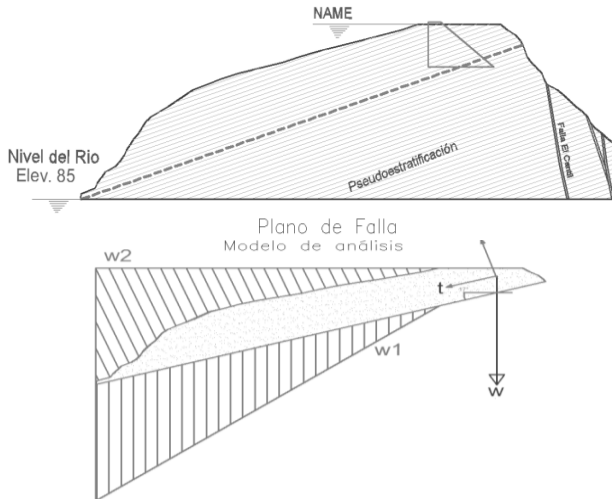


Figura 13. Análisis de sensibilidad de la intersección.

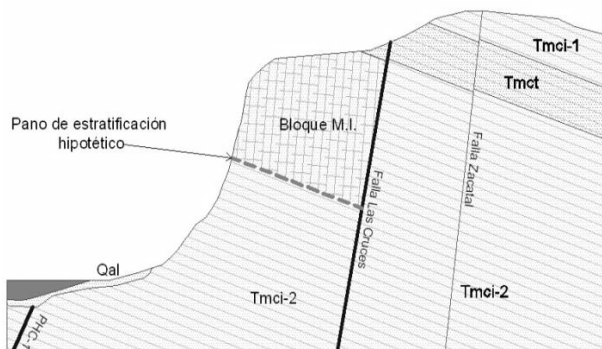


Figura 14. Sección transversal del bloque de margen izquierda.

Con respecto a la influencia de grandes estructuras en las obras de desvío y excedencias, se encontró que debido al paralelismo de las excavaciones con

el sistema regional NW-SE pudiera haber dificultades debido a la variación de las inclinaciones de las fallas y en el caso de que alguna de las estructuras mayores (fallas) presenten listricación se generarían salidas de mega bloques hacia el río, condición que debe ser cuidada durante la construcción de la obra, ver figura 14. En la zona donde se encuentra ubicado el material denominado "toba blancuecina", es necesario realizar un análisis de asentamientos en la base del canal, puesto que es probable que se produzcan deformaciones debido a la condición del material, de acuerdo a las figuras 15, 16.

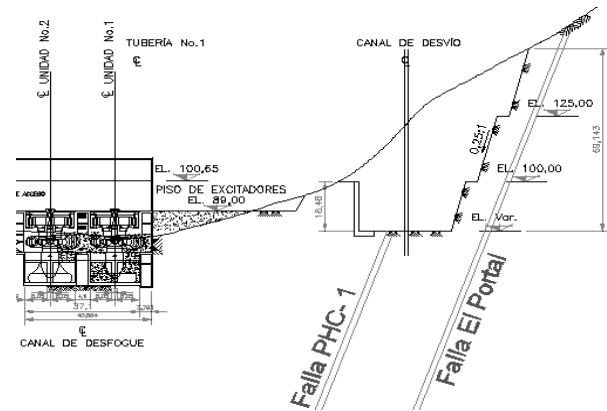


Figura 15. Cercanía de las fallas a las excavaciones.

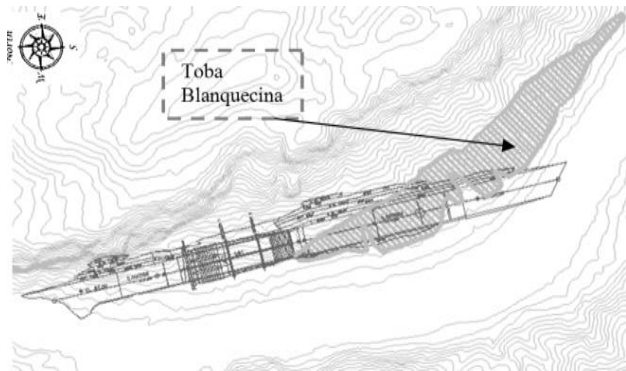


Figura 16. Condición de desplante del desvío en la toba blancuecina.

Además se tiene que debido al fracturamiento de un cantil en la margen derecha, existe una zona de bloques, la cual deberá de ser analizada para tomar las medidas de estabilización o remoción necesarias antes de iniciar o durante la obra. La figura Y las condiciones de dicho cantil. (Ver figura 17).

Cabe señalar que los bloques que se pudieran formar, se deben directamente a la intemperización, limitando este efecto a la zona de roca descomprimida, zona donde se puedan generar roturas locales ver la figura 18.



Figura 17. Zona de bloques en margen izquierda.

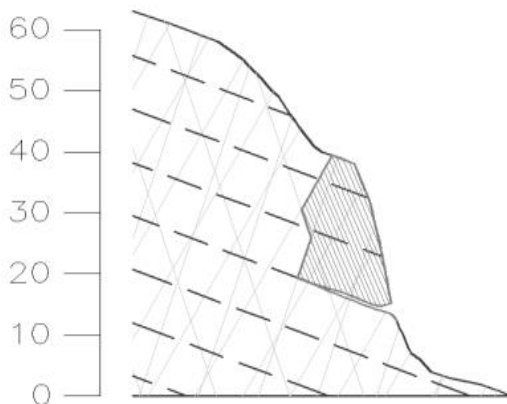


Figura 18. Rotura local en zona de bloques.

## 6 CONCLUSIONES

De acuerdo a lo presentado en este artículo, los resultados y análisis realizados muestran que geotécnicamente, las condiciones del sitio, son en general, buenas para poder ubicar ahí un proyecto hidroeléctrico.

Resulta evidente que, en el caso de las Ignimbritas encontradas en el sitio y por su constitución a nivel de roca intacta, fue determinante el reconocimiento y acopio de información de campo sobre las características tanto de las masas de roca como de las discontinuidades, puesto que a partir de ellas se pudo establecer una relación entre los resultados de laboratorio y el comportamiento observado.

A su vez, los trabajos de campo permitieron valorizar y establecer una actividad que es de vital importancia durante la definición de factibilidad de un sitio, *la evaluación de condiciones desfavorables*.

Sin lugar a dudas queda como dato y registro técnico del proyecto, que el realizar un acopio de registros de calidades de roca en el sitio, clasificación y caracterización de discontinuidades, así como de los eventos y mecanismos que siguen las masas rocosas, en la gran mayoría de los casos es la sustancia vital de las consideraciones de diseño,

acotando así el número de datos a obtener y sobre todo, la optimización y dirección correcta de las pruebas mecánicas en sitio.

## 7 REFERENCIAS

- Comisión Federal de Electricidad. (2011). "Informe de la interpretación de los resultados de las pruebas de campo del P.H. Las Cruces". *Subgerencia de geotecnia y concretos. Departamento de mecánica de rocas e inyecciones*.
- Comisión Federal de Electricidad. (2011). "Caracterización geomecánica en el sitio del P.H. Las Cruces, Nay." *Subgerencia geotécnica. Departamento de mecánica de rocas e inyecciones*.
- Comisión Federal de Electricidad. (2010). "Avance del informe geológico-geotécnico a nivel de factibilidad del P.H. Las Cruces". *Subgerencia de estudios geológicos. Departamento de geología*.
- Comisión Federal de Electricidad. (2010). "Estudio de tendido sísmico corto (Petite Sismique) en el socavón de Margen Izquierda del Rio San Pedro". *Subgerencia de Estudios Geológicos*.
- Chávez J. (2006). "Geotecnia" *Comisión Federal de Electricidad y Universidad Autónoma de México*.
- González V. L. (2002). "Ingeniería Geológica". *Editorial Pearson Prentice Hall, Pearson Educación. Madrid, España*.
- Hoek E. y Brown E. T. (1980), "Excavaciones subterráneas en roca". *Mc Graw Hill*.
- Marsal R. y Reséndiz D. (1979). "Presas de tierra y enrocamiento". *Editorial Limusa México. Primera reimpresión 1979*.
- Comisión Federal de Electricidad. "Manual de Diseño de Obras Civiles", *Tomo B.3.4. Pruebas de campo y laboratorio*.

## 8 AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del geólogo Vicente Páez Juárez por sus comentarios en este escrito, al departamento de geología y de la misma forma, al poblado y todo el equipo humano participante en el Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, quien con su esfuerzo y entusiasmo fue posible la excelente ejecución de los trabajos.