# UNIVERSIDAD DE COSTA RICA FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGIA

Actualización volcanoestratigráfica del piso del Valle Central, de Costa Rica, específicamente la denominada Formación Colima y sus miembros.

Tesis sometida a consideración por la Comisión del Programa de Estudios de Licenciatura en Geología para optar por el grado académico de Licenciadas en Geología

Krista Thiele Mora

Ana Enid Vargas Carranza

Cuidad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro, julio de 2017

Tesis sometida y aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Licenciatura en Geología y el Comité Evaluador de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología.

Tribunal Evaluador

Dra. María Del Pilar Madrigal Quesada

Universidad de Costa Rica

Presidente del Tribunal

Lic. Alexis Cerdas Salas

Instituto Costarricense de Electricidad

Miembro del Tribunal

Dr. Guttlermo Enrique Alvarado Induni

Instituto Costarricense de Electricidad

Director

Dr. Paulo Ruiz Cubillo

412

Universidad de Costa Rica

Lector

Licda. Alicia Gómez Cruz

Universidad Nacional de Costa Rica

Lectora

**Postulantes** 

Geól. Krista Thiele Mora

Geól. Ana Enid Vargas Carranza

# Derechos de propiedad intelectual

Yo, Krista Sabine Thiele Mora, costarricense, portadora de la cédula de identidad N.º 1-1273-0822, afirmo que conozco las sanciones legales con las que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio.

Declaro bajo fe de juramento: que soy estudiante de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, y como requisito de graduación debo defender mi trabajo final de graduación, en modalidad de tesis para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología, la cual se titula "Actualización Volcanoestratigráfica del piso del Valle Central de Costa Rica, específicamente la Formación Colima y sus miembros". Por lo que manifiesto que la misma ha sido elaborada siguiendo las disposiciones exigidas por la Universidad de Costa Rica.

Además, declaro solemnemente que dicho trabajo, es producto del esfuerzo de mi compañera de tesis y del mío propio, como resultado de nuestra investigación en su totalidad, y que no han tenido participación personas o instituciones ajenas al Director y Lectores, además de afirmar que todos los documentos utilizados han sido respectivamente citados.

ES TODO.

Firma en la ciudad de San José a las 14 horas del 25 de Agosto del 2017.

Geól. Krista Sabine Thiele Mora

Vust Thicke M.

Sustentante

# Derechos de propiedad intelectual

Yo, Ana Enid Vargas Carranza, costarricense, portadora de la cédula de identidad N.º 2-0610-0681, afirmo que conozco las sanciones legales con las que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio.

Declaro bajo fe de juramento: que soy estudiante de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, y como requisito de graduación debo defender mi trabajo final de graduación, en modalidad de tesis para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología, la cual se titula "Actualización Volcanoestratigráfica del piso del Valle Central de Costa Rica, específicamente la Formación Colima y sus miembros". Por lo que manifiesto que la misma ha sido elaborada siguiendo las disposiciones exigidas por la Universidad de Costa Rica.

Además, declaro solemnemente que dicho trabajo, es producto del esfuerzo de mi compañera de tesis y del mío propio, como resultado de nuestra investigación en su totalidad, y que no han tenido participación personas o instituciones ajenas al Director y Lectores, además de afirmar que todos los documentos utilizados han sido respectivamente citados.

ES TODO.

Firma en la ciudad de San José a las 14 horas del 25 de Agosto del 2017.

Geól. Ana Enid Vargas Carranza

Sustentante

## Krista

# Dedicatoria

A mis padres, que me dieron el regalo más valioso, la vida.

# Agradecimientos

Primero quiero agradecer a Guillermo Alvarado, Paulo Ruiz y Alicia Gómez, ya que sin sus aportes el documento final no hubiera llegado tener la estructura y consistencia adecuada.

A Ana por aventurarse en este proceso de tesis.

Muchas personas han estado en diversas partes de este proceso. Quiero agradecer a Henriette, por todo lo que hemos hablado durante este proceso. Y a Nathalie quien pudo empatizarme en las últimas fases de este trabajo.

A las chicas de Luz de Luna, por las incontables veces que contuvieron mis dudas respecto a este proceso y otros, por simplemente estar dispuestas a escuchar.

A Marietta por su valiosa guía y a Rebe, por siempre estar dispuestas a ayudar.

A mi familia por siempre serlo.

En especial, me conmueve profundamente la colaboración de aquellas personas que contribuyeron únicamente por su buena voluntad, sin pedir nada a cambio.

#### Ana Enid

# Dedicatoria

A la memoria de Luis Ángel, quien siempre creyó fervientemente en que el sueño se podía convertir en realidad.

A Daniel, mi amado compañero.

# Agradecimientos

Al Ser Supremo por su infinito amor y misericordia, por sostenerme en su cuidado durante cada uno de mis días.

A Daniel López, mi compañero de viaje, por su amor incondicional, por su apoyo en cada una de las etapas de este proceso, por brindarme un andamiaje profesional-logístico valiosísimo, así como el soporte más trascendental de todos: el emocional-espiritual.

A mis padres y padrinos por su cariño y comprensión absolutos.

A mi madre, por su fe y positivismo, por todas las lecciones de vida que me ha proporcionado.

A Guillermo Alvarado por su constante y sincero interés en enseñarnos geología; a Krista Thiele por dejarme acompañarle en este pedacito de su trayecto personal; a los dos por todas las horas que pasamos juntos en este proceso, y por todo el aprendizaje que me han brindado.

A Alicia Gómez y a Paulo Ruiz, por estar siempre dispuestos a compartir sus conocimientos, por su buena voluntad, y por todos sus valiosos aportes que enriquecieron este trabajo.

A todas las personas que de alguna manera me ayudaron y/o me apoyaron en esta aventura.

# Agradecimientos generales

Se agradece principalmente al director de tesis Guillermo Alvarado, y a los co-directores Paulo Ruiz y Alicia Gómez. Por su aportes y comentarios. Asimismo a Ernesto Echandi que colaboró en las fases iniciales de esta tesis.

Al CICG por financiar parcialmente esta investigación por medio del proyecto código N° 830-B1-805 de Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. A Mario Arias exdirector de este centro de investigación y al actual director Percy Denyer. A Juan Vargas del CICG y a Janixia Vanegas por la colaboración brindada.

A la Compañía Nacional de Fuerza y Luz. En particular a Mileny Salguero quien tramitó los permisos de acceso a las plantas y a los sitios de presa. Además a los encargados de Planta Brasil, Electriona y Belén por tener la disposición a colaborar con este proyecto. A Laura Castro, por la colaboración brindada.

A Max Ureña del ICE por facilitarnos el acceso a los mapas de la geodatabase del GISENE.

A Alexis Cerdas del ICE por sus valiosas recomendaciones.

A Carlos Vargas, Giorghi Villalobos y Benito, por permitirnos acceder al proyecto de túneles. Y a Luis Sáenz por brindarnos información de perforaciones.

Vicente Pérez Peña, Jose Pablo Galve y Patricia Ruano por la colaboración en las giras de campo.

Los siguientes colegas que de una u otra forma colaboraron: Vanessa Rojas, Hernán Porras, Monse Cascante, Junior Ramos y Manuel Barrantes.

A Wilberth Siles por la colaboración en la elaboración de las líneas de flujo.

A Martín Rojas y Mario Fernández por la colaboración en la gira al río Pará.

A Ramiro García y Oscar Lücke, por la colaboración con las secciones delgadas. Así como Pilar Madrigal, por su guía en la interpretación microscópica y geoquímica.

Al SENARA, principalmente a Carlos Romero, Magdalena Monge y Mario Naranjo por brindar la información de perforaciones.

A Ricardo Sánchez, Marco Naranjo, Chico, José Daniel López por el apoyo en las giras.

A Wendy Pérez por la colaboración con las descripciones de las perforaciones exploratorias del Proyecto Hidroeléctrico Virilla. A Fernando Montalto por brindar datos de informes previos. A Nancy Ramírez por compartir informes antiguos.

Manrique Azofeifa por tramitar los permisos correspondientes a giras y otros. Rolando Mora por la colaboración con su firma en los permisos de acceso a los sitios de interés.

A Maureen Bonilla por la información aportada. A Isaac, por la colaboración con InkScape y la guía en temas de formato. A Waldo Taylor y sus colaboradores, particularmente a Mao.

A tantos compañeros cuyos nombres no quedan en papel, pero si en la memoria por sus variados aportes. A todas las personas que colaboraron es este proyecto de una u otra forma.

Caminante, son tus huellas
el camino y nada más;
Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.
Al andar se hace el camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante no hay camino
sino estelas en la mar.

-Antonio Machado

Dícese de una vez en que el sultán, deseoso siempre por ilustrar a su pueblo, mandó traer un elefante de la India, y para que el pánico no se apoderara de aquellas gentes que nunca habían visto un animal más grande que un caballo, mandó encerrarlo en un establo y envió, como primera providencia, a los cinco hombres más sabios de la ciudad a que lo examinaran, y seguidamente explicaran al pueblo lo que habían visto, para que fueran acostumbrándose a aquel fenómeno.

Los sabios fueron al establo a cumplir con el mandato del sultán. Era de noche y el lugar estaba a oscuras, y no tomaron la precaución de llevar lámparas con ellos. De modo que decidieron conocerlo por medio del tacto.

Cada uno de ellos, con las prisas por ser el primero en lanzar sus doctas explicaciones a la gente palpó una parte distinta del elefante y una vez creyó saber de qué se trataba aquel fenómeno salió rápidamente a explicarlo.

- Ese animal es como una manguera dijo aquel que tocó la trompa.
- No, no es así -replicó el que había tocado una oreja-. Es más bien como abanico.
- Ambos están locos intervino el que sintió el lomo del elefante-. Eso es como un trono.
- Los tres están mintiendo espetó el que había tocado una de las patas-. La única verdad es que ese animal es como una columna.
- ¡Qué equivocados están todos ustedes! Vociferó el que tanteó uno de los colmillos-.

  Eso era duro y afilado como una lanza.
- Que absurdo expresó el que palpó la cola-. Esa cosa es sólo como una cuerda parecida a una serpiente con un plumero al final para espantar moscas.

Y así comenzó una discusión acalorada entre ellos, porque todos afirmaban ser poseedores de la verdad y acusaban a los demás de locos o mentirosos. Y cada uno decidió darle un nombre distinto al elefante.

-Rumi

# **Índice General**

Ín	dice de	e figu	uras	XV
Ín	dice de	e cua	dros	XX
Si	glas y	Abre	eviaturas utilizadas	xxi
1	Intr	oduc	eción	1
	1.1	Prol	blema	1
	1.2	Just	ificación	3
	1.3	Obj	etivo general	4
	1.4	Obj	etivos específicos	4
	1.5	Hip	ótesis	4
	1.6	Ubi	cación del área de estudio	4
	1.7	Met	odología	6
	1.7.	1	Elaboración de la base de datos	9
	1.7.	2	Alcances y limitaciones	. 12
	1.8	Mar	co teórico	. 13
	1.8.	1	Lavas fisurales y campos de lava	. 13
	1.8.	2	Fracturas volcanotectónicas	. 13
	1.8.	3	Los depósitos de debris avalanche	. 14
	1.8.	4	Interpolación de datos tipo Spline	. 16
2	Ant	eced	lentes generales	. 18
	2.1	Con	texto geológico y tectónico	. 18
	2.2	Inve	estigaciones previas	. 19
	2.2.	1	Antecedentes	. 19
	2.2.	2	Relaciones estratigráficas	. 20
	2.3	For	mación Colima	. 22
	2.3.	1	Localidad tipo	. 22
	2.3.	2	Descripción	. 22
	2.3.	3	Aspectos regionales	. 23
	2.3.	4	Edad	. 24
	2.3.	5	Relaciones estratigráficas	. 24
	2.3.	6	Génesis	. 24

2.3.7	Antecedentes	25
2.4 Mi	embro Belén	.25
2.4.1	Localidad tipo	.25
2.4.2	Descripción	.25
2.4.3	Aspectos Regionales	25
2.4.4	Edad	.26
2.4.5	Génesis	.26
2.4.6	Relaciones estratigráficas	26
2.4.7	Antecedentes	.26
2.5 Mi	embro Nuestro Amo	.28
2.5.1	Localidad tipo	.28
2.5.2	Descripción	28
2.5.3	Aspectos regionales	28
2.5.4	Edad	. 29
2.5.5	Relaciones Estratigráficas	29
2.5.6	Génesis	.31
2.5.7	Antecedentes	.31
2.6 Ign	imbrita Puente de Mulas	.31
2.6.1	Localidad tipo	.31
2.6.2	Descripción	.31
2.6.3	Aspectos Regionales	.32
2.6.4	Edad	.32
2.6.5	Relaciones Estratigráficas.	.32
2.6.6	Génesis	.32
2.6.7	Antecedentes	.32
2.7 Mi	embro Linda Vista	.34
2.7.1	Localidad tipo	.34
2.7.2	Descripción	.34
2.7.3	Aspectos regionales	.34
2.7.4	Edad	.36
2.7.5	Relaciones Estratigráficas.	36

2.7.6	Génesis	36
2.7.7	Antecedentes	36
2.8 Fo	rmación Tiribí	36
2.8.1	Localidad tipo	36
2.8.2	Descripción	36
2.8.3	Aspectos regionales	37
2.8.4	Edad	37
2.8.5	Relaciones Estratigráficas	37
2.8.6	Antecedentes	37
2.9 Fo	rmación Barva	38
2.9.1	Localidad Tipo	38
2.9.2	Descripción	38
2.9.3	Aspectos regionales	39
2.9.4	Edad	39
2.9.5	Relaciones Estratigráficas	39
2.9.6	Génesis	39
2.9.7	Antecedentes	39
2.10	Problemática estratigráfica y litológica	39
2.10.1 en el V	La problemática en relación a los distintos depósitos de <i>debris avaland</i> alle Central Occidental	
2.10.2 miemb	La discrepancia entre Echandi (1981) y Kussmaul (1988) respecto a pros Linda Vista y Belén.	
2.10.3	Datos geoquímicos asociados	50
2.11	Unidades volcánicas más antiguas que el Miembro Belén en el Valle Central.	53
	is de la información de registros de perforación y su correlación con unida	
3.1 M	etodología del análisis	55
3.2 Re	einterpretación de pozos guía	56
3.3 At	loramientos de unidades de interés y localidades de referencia	75
3.3.1	Hipoabisal de Piedras Negras ¿Fuente de las lavas de Belén?	78
3.3.2	Lavas Belén	80
3.3.3	Ignimbrita Puente Mulas	85

	3.3.4	Lava Linda Vista	91
	3.3.5	Depósito de debris avalanche El Coyol	96
	3.3.6	Otros depósitos de debris avalanche no relacionados	101
	3.4 Per	files Geológicos	102
	3.5 Ma	pa Geológico	109
4	Modela	do paleotopográfico de unidades geológicas	110
	4.1 Bas	e teórica del modelado	110
	Método	triangulación (se le denomina TIN en algunos programas como	ArcGis):110
	Método sp	oline	110
	4.1.1	Justificación para escoger el método de interpolación	111
		pas de ubicación, isohipsas de los techos, isopacas, líneas de fl pesores	3
	4.2.1 Ignimb	Unidades de mayor edad: Ignimbrita 1, Lava 1, Ignimbrita 3	
	4.2.2	Lava Belén	127
	4.2.3	Ignimbrita Puente de Mulas	135
	4.2.4	Lavas Linda Vista	140
	4.2.5	Debris Avalanche El Coyol	145
	4.3 Mo	delo vulcanoestratigráfico	150
	4.3.1	Comparación con el campo de lavas de Cervantes	156
5	Conclu	siones	158
6	D	endaciones	
6	Recom	aluaciones	160
7		cias	

# Índice de figuras

Figura 1.1: Mapa del área de estudio. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968, proyección Lambert Norte (LN)
Figura 1.2: Diagrama de flujo metodológico.
Figura 1.3: Registro de perforación con interpretación errónea, donde se correlaciona Tiribí con lavas, lahares y tobas
Figura 1.4: Captura de pantalla del archivo de Excel donde se indican los datos asociados a los registros de perforación
Figura 1.5: Captura de pantalla del archivo de Excel, separado en pestañas por unidad litológica.
Figura 1.6: Captura de pantalla de la tabla de atributos asociada al archivo shape11
Figura 1.7: Relación H/L para deslizamientos, deslizamientos volcánicos y extraterrestres (Tomado de Van Wyk de Bries & Delcamp, 2015).
Figura 1.8: Esquema de funcionamiento del método de interpolación Spline17
Figura 2.1: Esquema del contexto tectónico regional de Costa Rica
Figura 2.2: Relaciones estratigráficas entre las formaciones y unidades que componen el piso del Valle Central [Basado en Echandi (1981), Denyer & Arias (1991), Pérez (2000), Méndez & Hidalgo (2004) y Alvarado & Gans (2012)]
Figura 2.3: Esquema de las relaciones estratigráficas entre los diferentes miembros de la formación Tiribí, según Fernández (1969), Echandi (1981) y Pérez (2000) (UF= unidad de flujo)
Figura 2.4: Esquema de las relaciones estratigráficas entre los diferentes miembros de la formación Colima, según Echandi (1981) y Alvarado & Gans (2012)22
Figura 2.5: Localidades de referencia para la Formación Colima. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968, proyección Lambert Norte (LN)
Figura 2.6: Esquema que muestra la propuesta de orientación de fisuras de diferentes autores, para explicar el origen de las lavas de la Formación Colima
Figura 2.7: Localidades de referencia para el Miembro Belén. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968, proyección Lambert Norte (LN)27
Figura 2.8: Localidades de referencia para el Miembro Nuestro Amo. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968, proyección Lambert Norte (LN)
Figura 2.9: Localidades de referencia para la Ignimbrita Puente de Mulas. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968, proyección Lambert Norte (LN)
Figura 2.10: Localidades de referencia para el Miembro Linda Vista. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968, proyección Lambert Norte (LN)

Figura 2.11: Posición estratigráfica, génesis y nomenclatura utilizada según la autores de los debris avalanche (en amarillo) del Valle Central Occidental	
Figura 2.12: Distribución de las secciones delgadas y datos geoquímicos de in previas	=
Figura 2.13: Dataciones asociadas a las lavas de Belén y Linda Vista, segúr Gans (2012). Hojas topográficas Abra, Barva, Poás, Río Grande, Naranjo y Qu 1:50 000 del IGN, año 1988, proyección Lambert Norte (LN)	iesada, escala
Figura 2.14: Diagrama K2O-SiO2, rocas de Fm. Colima.	52
Figura 2.15: Diagrama TAS, rocas de Fm. Colima.	52
Figura 2.16: Diagrama AFM, rocas de Fm. Colima.	53
Figura 3.1: Mapa de ubicación de un perfil realizado en Pérez (2000). Hojas Abra y Río Grande, escala 1: 50 000 del IGN, año 1988, proyección Lamber 56	1 0
Figura 3.2: Perfil de Pérez (2000)	57
Figura 3.3: Reinterpretación de la figura 3.2, basado en las dataciones de Alva (2012)	
Figura 3.4: Distribución de perforaciones en Echandi (1981) y Pérez (2000) en el área de estudio.	
Figura 3.5: Perforación de SENARA AB-353	60
Figura 3.6: Perforación de SENARA AB-454.	61
Figura 3.7: Perforación de SENARA AB-471A.	62
Figura 3.8: Perforación de SENARA AB-490.	63
Figura 3.9: Perforación de SENARA AB-500.	64
Figura 3.10: Perforación de SENARA AB-505.	65
Figura 3.11: Perforación de SENARA AB-520.	66
Figura 3.12: Perforación de SENARA AB-555A.	67
Figura 3.13: Perforación de SENARA AB-578.	68
Figura 3.14: Perforación de SENARA AB-635.	69
Figura 3.15: Perforación de SENARA AB-644.	70
Figura 3.16: Perforación de SENARA AB-656.	71
Figura 3.17: Perforación de SENARA AB-677.	72
Figura 3.18: Perforación de SENARA AB-683.	73
Figura 3.19: Perforación de SENARA AB-732.	74

Figura 3.20: Perforación de SENARA AB-736
Figura 3.21: Ubicación de afloramientos visitados
Figura 3.22: Ubicación de muestras para secciones delgadas
Figura 3.23: Diaclasas afectando únicamente a la Formación Peña Negra. Nótese que el contacto entre Peña Negra y el intrusivo es controlado por la dirección de buzamiento de las primeras
Figura 3.24: Sill (diabasa) de Piedras Negras (coordenadas 510 578 E/213890 N LN) 79
Figura 3.25: Andesita con augita en parque al sur del boulevard Ernesto Rohrmoser 80
Figura 3.26: Autobrecha al costado de Planta Eléctrica Belén y sección delgada
Figura 3.27: A. Contacto de Belén con paleosuelo sup. B. Contacto de autobrecha con parte masiva, tajo La Lindora
Figura 3.28: Lava de Belén emplazada sobre el basamento sedimentario
Figura 3.29: A: Lámina delgada "Brasil". B: Lava en Planta Eléctrica Brasil
Figura 3.30: A. Lámina delgada "D1P8" (nótese la corona de augita alrededor del cristal de hipersteno). B. Lava en Turrúcares, hacia el norte de la Ruta Nacional N.º 27
Figura 3.31: Base de la Ignimbrita Puente Mulas en el río Virilla
Figura 3.32: A. Paleosuelo, separando a las unidades Tiribí y Puente Mulas. B. Detalle de paleosuelo.
Figura 3.33: Depósito de retrabajo, separando a las unidades Tiribí y Puente Mulas 89
Figura 3.34: A. Detalle de la base de la ignimbrita Puente de Mulas B. Ignimbrita Puente de Mulas, limitada arriba y abajo por paleosuelos.
Figura 3.35: A. Chimenea de desgasificación B. Ignimbritas separadas por un paleosuelo.90
Figura 3.36: Capa de Pómez Tibás separando a las ignimbritas Tiribí y Puente Mulas hacia el oeste del peaje a Ciudad Colón
Figura 3.37: A. Lámina delgada 22. B. Lava en Sitio Presa Electriona
Figura 3.38 : Ignimbrita de Tiribí (nótese la disyunción columnar) sobreyaciendo a Linda Vista, en medio se observa la Capa de Pómez Tibás
Figura 3.39: A. Contacto irregular entre Linda Vista y Tiribí. B. Estructuras de flujo orientadas en lavas de Linda Vista. C. Lámina delgada "M-A-1". D. Lámina delgada "M-A-3"
Figura 3.40 : A. Lavas de Linda Vista en Bajo de los Ledezma. B. Lámina delgada "M-BL-1P". C. Lámina delgada "M-BL-2"
Figura 3.41: Esquema de correlación de los afloramientos principales de las lavas de Linda Vista

Figura 3.42: Morfología de hummock, Ruta Nacional N.º 27, en las cercan Guácima.	
Figura 3.43: Tres depósitos que pueden corresponder con la evolución del a debris flow.	
Figura 3.44: Bloques subredondeados en un potrero en Turrúcares	99
Figura 3.45: Debris avalanche en Turrúcares. Nótese los bloques de casi 3 99	l m de diámetro.
Figura 3.46: A. Posible hummock al sur de Cebadilla. B. Bloques presente 100	es en el depósito.
Figura 3.47: A. Afloramiento de El Coyol en La Guácima. B. Bloq conformando el depósito de debris avalanche de El Coyol	-
Figura 3.48: Depósito de debris avalanche en la salida a Escobal Ruta Naci	onal N.° 27 102
Figura 3.49: Perfil Geológico A-A'	104
Figura 3.50: Perfil Geológico B-B'	105
Figura 3.51: Perfil Geológico 1-1'	106
Figura 3.52: Perfil Geológico 2-2'	107
Figura 3.53: Perfil Geológico 3-3'	108
Figura 3.54: Mapa Geológico basado en la interpretación del registro de petomadas de Denyer & Arias (1991) y de Porras et al. (2012)	
Figura 4.1: Perforaciones que muestran a la unidad Ignimbrita 1	112
Figura 4.2: Perforaciones que muestran a la unidad Lava 1	113
Figura 4.3: Isohipsas de Lava 1.	114
Figura 4.4: Isopacas de Lava 1.	115
Figura 4.5: Perforaciones que muestran a la unidad Ignimbrita 2	116
Figura 4.6: Isohipsas de Ignimbrita 2.	117
Figura 4.7: Isopacas de Ignimbrita 2.	118
Figura 4.8: Perforaciones que muestran a la unidad Lava 2	119
Figura 4.9: Isohipsas de Lava 2.	120
Figura 4.10: Líneas de flujo de Lava 2.	121
Figura 4.11: Isopacas de Lava 2.	122
Figura 4.12: Perforaciones que muestran a la unidad Ignimbrita 3	123
Figura 4.13: Isohipsas de Ignimbrita 3.	124

Figura 4.14: Líneas de flujo de Ignimbrita 3	25
Figura 4.15: Isopacas de Ignimbrita 3.	26
Figura 4.16: Perforaciones que muestran a la unidad Lava Belén	28
Figura 4.17: Isohipsas de la unidad Lava Belén	29
Figura 4.18: Líneas de flujo de la unidad Lava Belén	30
Figura 4.19: Isopacas de la unidad Lava Belén.	31
Figura 4.20: Ubicación del bloque diagrama	33
Figura 4.21: Bloque diagrama del sector de San Antonio de Belén	34
Figura 4.22: Perforaciones y afloramientos que muestran a la unidad Ignimbrita Puente Mulas	
Figura 4.23: Isohipsas de la Ignimbrita Puente de Mulas	37
Figura 4.24: Dirección de flujo de la Ignimbrita Puente de Mulas	38
Figura 4.25: Isopacas de la Ignimbrita Puente de Mulas	39
Figura 4.26: Perforaciones y afloramientos utilizados para el ploteo de las Lavas Lir Vista	
Figura 4.27: Isohipsas de las Lavas Linda Vista	41
Figura 4.28: Líneas de flujo de las Lavas Linda Vista.	43
Figura 4.29: Isopacas de las Lavas Linda Vista	44
Figura 4.30: Perforaciones y afloramientos del depósito de debris avalanche El Coyol 1	46
Figura 4.31: Isohipsas del depósito de debris avalanche El Coyol	47
Figura 4.32: Líneas de flujo de depósito de debris avalanche El Coyol	48
Figura 4.33: Isopacas del depósito de debris avalanche El Coyol	49
Figura 4.34: Propuesta de las fracturas volcanotectónicas (FVT) que dieron origen a campos de lava Belén y Linda Vista.	
Figura 4.35: Columna esquemática de unidades presentes en el piso volcánico del Va Central (Se muestran los volúmenes calculados en la presente investigación, el volumen Tiribí se toma de Pérez, 2000)	de
Figura 4.36: Correlación entre las unidades (efusivas e ignimbríticas) presentes en cordillera y el piso del Valle Central.	

# Índice de cuadros

Cuadro 2.1: Síntesis de la nomenclatura de unidades geológicas, según los principales autores
Cuadro 2.2: Génesis de eventos asociados a Nuestro Amo, según los principales autores. 31
Cuadro 2.3: Ubicación de datos petrográficos y geoquímicos recolectados
Cuadro 2.4: Características macroscópicas y microscópicas del Miembro Belén
Cuadro 2.5: Características macroscópicas y microscópicas del Miembro Linda Vista45
Cuadro 2.6: Componentes de las secciones delgadas, según Kussmaul & Thorpe (inédito), Echandi (1981) y Bonilla (2012)
Cuadro 2.7: Detalle de las dataciones mostradas en la figura 2.10
Cuadro 2.8: Características geoquímicas de los miembros Belén y Linda Vista (Kussmaul & Thorpe, inédito)
Cuadro 3.1: Cantidad de perforaciones y afloramientos utilizados previamente para estudios realizados en el área de interés
Cuadro 3.2: Ubicación de perforaciones en Echandi (1981) y Pérez (2000), utilizadas como guía en el presente trabajo
Cuadro 4.1: Características de las unidades más antiguas que la Lava Belén
Cuadro 4.2: Características de la unidad Lava Belén
Cuadro 4.3: Características de la unidad Lava Belén en San Antonio
Cuadro 4.4: Características de la unidad Ignimbrita de Puente de Mulas
Cuadro 4.5: Características de Lava Linda Vista
Cuadro 4.6: Características de la unidad debris avalanche de El Coyol
Cuadro 4.7: Equivalencias entre las unidades del piso del Valle Central y las formaciones geológicas asociadas
Cuadro 4.8: Dimensiones de las coladas de lava de Cervantes según Alvarado & Vega (2013) y el volumen calculado para una colada de Linda Vista (en el caso de la colada Cervantes occidental se utiliza el valor máximo de espesor)

# Siglas y Abreviaturas utilizadas

An. Porcentaje de anortita

A y A Acueductos y Alcantarillados

CICG Centro de Investigación en Ciencias Geológicas

CRTM-05 Proyección oficial para Costa Rica

GAM Gran Área Metropolitana

GISENE GIS (Geographic Information System) Energía

GPS Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, por sus siglas

en inglés)

F. Fenocristales

ICE Instituto Costarricense de Electricidad

IGN Instituto Geográfico Nacional

ka Miles de años

LN Proyección Lambert Norte

NASA Agencia espacial del gobierno de Estados Unidos (National Aeronautics and

Space Administration, por sus siglas en inglés)

Ma Millones de años

MED Modelo de Elevación Digital

ONU Organización de las Naciones Unidas

PE Planta Eléctrica

PH Proyecto Hidroeléctrico

SENARA Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento

SIG Sistema de Información Geográfica

SP Sitio de Presa

SRTM Proyecto para obtener modelos de elevación digital dirigido por la NASA

(Shuttle Radar Topography Mission, por sus siglas en inglés)

TIN Red de triángulos irregulares

Φ Diámetro

# Resumen

El piso volcánico del Valle Central se conforma por una serie de intercalaciones de lavas e ignimbritas con algunas tobas y depósitos epiclásticos (incluyendo depósitos de debris avalanche). Para el análisis volcanoestratigráfico (área de 366 km²) de la Formación Colima, se realizó el análisis exahustivo de 2583 registros de perforación, de los cuales se seleccionan 1395 (101 169 m de perforación) para su re-interpretación y correlación. Se logran identificar cinco depósitos ignimbríticos intercalados con cinco campos de lava. Se consiguieron correlacionar dos de estas ignimbrtitas, con las denominadas Tiribí (322 ka) y Puente de Mulas (440 ka), mientras que las lavas se asocian con Barva (260 ka), Linda Vista (371-331 ka) y Belén (758-535 ka). Existen tres eventos ignimbríticos y dos campos lávicos, no contemplados previamente en el piso del Valle Central, cuya edad es mayor a la de Lava Belén. Una de estas ignimbritas se podría correlacionar con la Ignimbrita de San Jerónimo (859 ka). Se realizaron los mapas de isohipsas e isopacas de tres de las ignimbritas, a saber: las unidades informales Ignimbrita 2 y 3, así como la Ignimbrita 4 o Puente de Mulas (espesor máximo observado 75 m). Asimismo, cuatro campos lávicos, denominados Lava 1, Lava 2, Lava 3 (Lava Belén), la cual está compuesta por al menos 5 coladas de lava, con un espesor máximo de 140 m, y la Lava 4 (Lava Linda Vista) compuesta por al menos 6 coladas de lava y un espesor máximo de 219 m. Con base en información volcanológica, paleomorfológica (isohipsas), de los espesores (isopacas) y las pendientes, se sugiere que existen dos fracturas volcanotectónicas, una en la base de los cerros Zurquí, con orientación ~N18°W y otra con dirección ~N40°W. Ambas parecen continuar en los flancos de los volcanes Poás y Barva, donde existen conos piroclásticos alineados. La Lava Belén posiblemente fluyó de ambas fracturas y la Lava Linda Vista, probablemente se originó en la fractura ubicada en la base del Zurquí. Se determina el área y volumen de las unidades (mínimos, acotados en el área de estudio): Lava Linda Vista (219 km² v 12,3 km³), Ignimbrita Puente de Mulas (264 km² v 5,7 km³), Lava Belén (356 km² y 18,4 km³) y para el depósito de debris avalanche El Coyol (121 km² y 3,1 km³). Se correlacionaron las rocas volcánicas del piso del Valle Central con las formaciones geológicas y con el modelo de evolución volcánico de Proto-Cordillera, Paleo-Cordillera y Neo-Cordillera. Se descartó la correspondencia temporal entre El Coyol y Nuestro Amo (~621 ka); esta última unidad se encuentra intercalada entre las Lavas Belén, mientras que El Coyol (≤322 ka) es una unidad más joven.

**Palabras clave:** Piso volcánico del Valle Central de Costa Rica, Formación Colima, fractura volcano-tectónica, Proto-Cordillera, Paleo-Cordillera, Belén, Nuestro Amo, Puente de Mulas, Linda Vista, El Coyol.

# 1 Introducción

El Valle Central está ubicado en la región central del país y comprende una zona de gran importancia socio-económica para Costa Rica. Específicamente, en el Gran Área Metropolitana (GAM) se calcula una población de 2,6 millones de habitantes para el 2016 según estimaciones del INEC (2011) que corresponde con ~60% de la población del país.

Desde inicios del Siglo XX se han realizado una serie de estudios geológicos (Romanes, 1912, William, 1952) que han tratado de explicar la formación del Valle Central, las características de sus rocas, sus edades, y principalmente sus propiedades hidrogeológicas (Fernández, 1969, Echandi, 1981 y Gómez, 1987). Sin embargo, fue en las últimas dos décadas cuando se han hecho estudios que aportan insumos, como dataciones radiométricas y análisis geoquímicos de rocas (Pérez, 2000, Gans, et al., 2003, Pérez et al., 2006, Alvarado & Gans, 2012, Mana et al, 2015), por lo que actualmente para este trabajo se cuenta con mejores datos que han sido integrados, junto a cientos de registros de perforaciones distribuidas en la GAM, para mejorar el modelo volcanestratigráfico de las rocas de la llamada Formación Colima.

#### 1.1 Problema

Desde inicios del siglo XX hasta la actualidad se han realizado varios estudios del piso volcánico del Valle Central. Romanes (1912) fue el primero en describir las lavas y tobas aflorantes en el cañón del río Virilla; diversas investigaciones estudiaron la misma área de manera general como Williams (1952). Fernández (1969) describe estas rocas y su potencial hidrogeológico asociado y a partir de su estudio, muchos de los trabajos realizados tendrán un enfoque hacia el recurso hídrico subterráneo. Echandi (1981) uniformiza la nomenclatura de las unidades volcánicas ubicadas en la vertiente norte del río Virilla, sin embargo, muchos de los criterios utilizados por este autor, para diferenciar estas unidades se dan en función de sus propiedades hidrogeológicas y se basan en una cantidad limitada de 36 perforaciones, sin contar con datos geocronológicos.

En las últimas cuatro décadas se han realizado diversos estudios geológicos en distintas áreas del Valle Central. Por ejemplo, Kussmaul (1988) realiza una comparación petrológica entre el piso volcánico del Valle Central y la Cordillera Central, mientras que Pérez (2000) caracteriza la vulcanología y petroquímica de las ignimbritas de Tiribí. Se ha encontrado una discrepancia respecto a las características microscópicas de la Lava de Belén de la de Linda Vista, ya que Kussmaul (1988) y Echandi (1981) señalan parámetros de identifiación contradictorios.

Publicaciones recientes han encontrado una correlación entre las rocas volcánicas del piso del Valle Central, con rocas aflorantes en la Ruta Nacional N.º 27, al oeste del Valle Central (Porras et al, 2012). Además, Alvarado & Gans (2012) señalan una correlación

etaria entre la Formación Colima y las rocas de la Paleo-Cordillera, así como una posible correlación temporal y espacial entre la Formación Tivives, El Coyol y el Miembro Nuestro Amo. El Miembro Nuestro Amo fue originalmente definido como parte de la Formación Tiribí (Echandi, 1981), sin embargo, Pérez (2000) lo descarta, debido a su génesis.

Pese a todos estos estudios, existen muchos aspectos a resolver. Los cuales se evalúan por medio de una base de datos de 1395 registros de perforación, que supera considerablemente a la cantidad de 36, utilizados por Echandi (1981).

A continuación se enlistan algunos de los principales problemas a resolver:

- Uniformidad y detalle de las relaciones estratigráficas. ¿Son correctas las relaciones estratigráficas conocidas o es necesario actualizarlas? ¿Es la unidad de flujo basal propuesta por Pérez (2000) en realidad el Miembro Puente de Mulas? ¿El Coyol y Nuestro Amo son correlacionables temporal y espacialmente como lo indican Alvarado & Gans (2012)? Para ello, se debe confrontar y analizar la información disponible, con el fin de evaluar la estratigrafía de las unidades de interés, para construir la columna litoestratigráfica actualizada y uniformizar la nomenclatura de estas unidades.
- Extensión de las unidades. ¿Existen nuevos afloramientos que se puedan asociar a los miembros de Colima? Debido a la gran densidad y detalle de las descripciones litológicas en perforaciones, se elaborarán mapas paleotopográficos correspondientes a los techos de las unidades geológicas principales. Los cuales brindarán información más precisa respecto a la extensión de dichas unidades.
- Dimensiones de las unidades geológicas. Por medio de la reconstrucción de las unidades de interés, se busca determinar su geometría (espesor, área y volumen.
- Fuente de origen. ¿Provienen estas unidades de los volcanes antiguos de la cordillera Central (Paleo-Cordillera) o del propio piso del Valle Central? ¿Corresponde con los volcanes del Cuaternario como propone Echandi (1981), o si tienen un origen fisural como indica Kussmaul (1985)? Se busca encontrar evidencias de la fuente de origen de los miembros por medio de la reconstrucción paleomorfológica de las unidades.

#### 1.2 Justificación

El Valle Central de Costa Rica es un área de gran importancia económica y social, en la cual se encuentra cerca del 60% de la población nacional, para un territorio que representa únicamente el 3,8% del área total del país.

Resulta discordante que una zona de tanto interés socioeconómico, existan tan pocos estudios geológicos detallados recientes, contrastando por ejemplo, con el gran número de investigaciones geológicas realizadas en la zona de Guanacaste, específicamente en la península de Nicoya, hechas posiblemente con el objeto de estudiar a las rocas más antiguas del país y comprender así su evolución geológica. Concretamente para la presente investigación, se cuenta únicamente con 39 publicaciones, informes, resúmenes y tesis que abordan de manera parcial el tema a desarrollar en la presente investigación.

Efectivamente, el modelo geológico del Valle Central, se basa principalmente en el propuesto por Echandi (1981), el cual es sustentado con pocas modificaciones en Denyer & Arias (1991). Existen publicaciones científicas más actualizadas que cuentan con insumos de gran valor, particularmente datos geoquímicos y dataciones radiométricas (Pérez 2000; Marshall et al, 2003; Pérez et al., 2006; Alvarado & Gans, 2012; Porras et al, 2012, Mana et al, 2015), que aportan información que no ha sido analizada e incorporada de manera integral en ningún estudio hasta el presente. Además, se cuenta con el insumo de 1395 registros de perforación seleccionados de la base de datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), las cuales poseen una descripción litológica de suficiente calidad, para ser utilizadas en una investigación de este tipo.

La presente investigación pretende aportar un modelo volcanoestratigráfico integral, que incluirá la información de las publicaciones más recientes, sus datos geoquímicos y dataciones radiométricas, además de la reinterpretación y análisis litológico de las perforaciones.

# 1.3 Objetivo general

Analizar la estratigrafía del piso volcánico del Valle Central de Costa Rica y su modelo de interpretación vulcanológica, mediante la observación del registro de perforaciones, con el fin de actualizar el modelo litoestratigráfico. Específicamente, la Formación Colima y sus miembros: Belén, Nuestro Amo, Puente de Mulas y Linda Vista.

# 1.4 Objetivos específicos

- 1. Establecer las relaciones estratigráficas de las unidades volcánicas del piso del Valle Central, mediante la creación de perfiles geológicos, los cuales se basan en la interpretación de los registros de perforación, (principalmente los del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento, SENARA), con el fin de aclarar las relaciones estratigráficas de la Formación Colima.
- Revisar la secuencia estratigráfica de las unidades volcánicas del piso del Valle Central, integrando el análisis de registros de perforación y correlacionar con las unidades de interés.
- 3. Elaborar las isohipsas e isopacas de las unidades principales, con el fin de visualizar su paleomorfología, utilizando los techos de las unidades previamente definidas, mediante el uso de los registros de perforación.
- 4. Determinar el punto de emisión de las rocas que conforman las unidades principales, utilizando para ello los mapas de isohipsas y sus respectivas líneas de flujo, con el fin de identificar su fuente.

# 1.5 Hipótesis

El modelo litoestratigráfico de la Formación Colima, no ha considerado, en su concepción, una cantidad importante de información disponible en la actualidad, como los de registros de perforación del SENARA y dataciones radiométricas (Alvarado & Gans, 2012 y otros), que se encuentran distribuidas a lo largo y ancho del Valle Central.

Por lo cual, se postula que la inclusión de estos nuevos datos, puede modificar el modelo litoestratigráfico y con ello mejorar la visión de la procedencia de los materiales geológicos que componen la Formación Colima, su distribución y relaciones lito y cronoestratigráficas.

## 1.6 Ubicación del área de estudio

El área geográfica de la presente investigación comprende parte del Valle Central de Costa Rica, específicamente en su sector occidental. Abarca un área de 366 km², comprendida entre las hojas topográficas (escala 1: 50 000 del Instituto Geográfico Nacional, IGN), Abra, Barva, Río Grande y Naranjo. Su distribución se observa en el mapa de ubicación (Figura 1.1). El área de trabajo se definió con base en: 1) la gran densidad de perforaciones presentes, que están registradas primordialmente en la base de datos del SENARA, 2) las localidades en las cuales han sido reportadas las unidades de interés, y 3) la accesibilidad a

las unidades, puesto que en el área escogida existe una menor cobertura de los productos de la Neo-Cordillera. Se muestra además parte del arco volcánico cuaternario, así como el cerro Zurquí, el cual corresponde con un relicto volcánico.

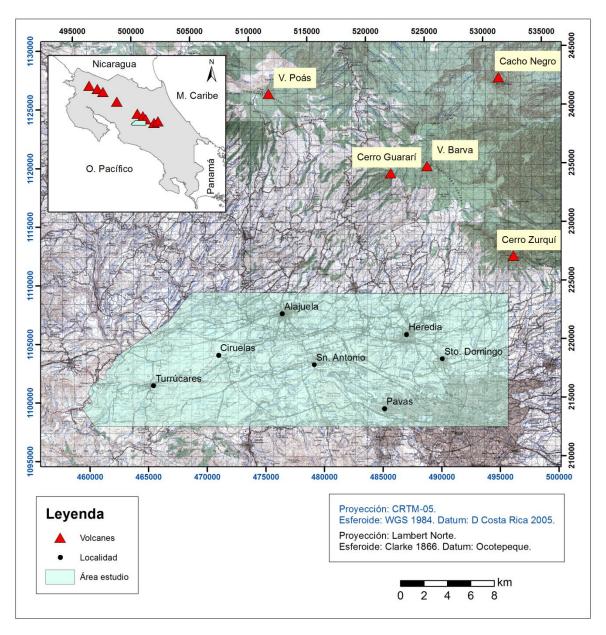


Figura 1.1: Mapa del área de estudio. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968.

## 1.7 Metodología

A continuación se describe el proceso que se llevó a cabo para la elaboración del presente estudio. En la figura 1.2 se muestra el diagrama de flujo resumido de la misma.

- I. Recopilar información.
  - Recopilar la información geológica del Valle Central, en particular de la Formación Colima, en publicaciones, tesis, informes y otros, documentos ubicados en las bibliotecas de las universidades e instituciones públicas y otros. Se hizo énfasis en la información asociada a dataciones radiométricas, así como a la litología descrita en perforaciones.
  - Realizar una selección de las perforaciones disponibles en el área de estudio, consultadas por medio de la base de datos virtual del SENARA, se descartó aquellas que no cuenten con descripción litológica.
  - Obtener acceso a los registros de perforación físicos, previamente seleccionados de la base de datos virtual del SENARA.
  - Descartar las descripciones litológicas pobres e inconsistentes.
  - Compilar los datos de las secciones delgadas y de los análisis geoquímicos.
- II. Analizar y sistematizar los datos de perforación.
  - Sintetizar y uniformar las descripciones litológicas de los registros de perforación a utilizar. Para ello se descartaron aquellas que respecto al criterio profesional, no contaban con los parámetros mínimos para ser calificados como una descripción mediamente aceptable, por ejemplo aquellas que presentaron descripciones escuetas, las que estaban repetidas con respecto a ubicaciones evidentemente distintas, y las que presentaban varias descripciones para una misma perforación. Además, se excluyeron las perforaciones que no alcanzaron a las unidades de interés. Del total de 2583 registros de perforación se descartaron 1188 (46%).
  - Crear una base de datos en excel con la interpretación litológica de 1395 registros de perforación, elevación, profundidad y espesores aparentes máximos, mínimos y promedio de las unidades determinadas en las perforaciones. Más adelante se detalla la elaboración de la base de datos.
- III. Incorporar los datos a un Sistema de Información Geográfica.
  - Elaborar los archivos tipo *shape* de las perforaciones, dataciones, secciones delgadas y otros insumos de interés.
  - Crear un modelo de elevación digital del terreno (MED) para determinar la elevación de los datos de interés.
  - Interpolar tanto la elevación de los techos de cada unidad como sus espesores aparentes, mediante el método Spline con barreras.
- IV. Interpretar la litología y elaborar perfiles geológicos.

- Realizar visitas de campo para observar las localidades tipo y otros afloramientos de las unidades de interés.
- Analizar las perforaciones utilizadas en estudios previos, con el fin de establecer el modelo geológico y así extender la interpretación de dicha secuencia a las demás perforaciones disponibles.
- Analizar y correlacionar la información litológica de los registros de perforación, la litoestratigrafía observada en los afloramientos y las dataciones radiométricas, para identificar sus relaciones litoestratigráficas y generar perfiles geológicos.
- V. Elaborar mapas paleomorfológicos de las unidades de interés, con el fin de determinar su fuente.
  - Elaborar las isohipsas e isopacas de las unidades a partir de los techos y espesores aparentes previamente identificados en la base de datos.
  - Identificar la fuente de las principales unidades, basándose en su paleomorfología.
- VI. Calcular la geometría de las unidades de interés.
  - Determinar el espesor, área y volumen de las unidades de interés, acotados y delimitados respecto al área de estudio.
- VII. Comparar el modelo geológico de Echandi (1981) con la información integrada en el presente estudio, con el fin de actualizar el modelo litoestratigráfico.

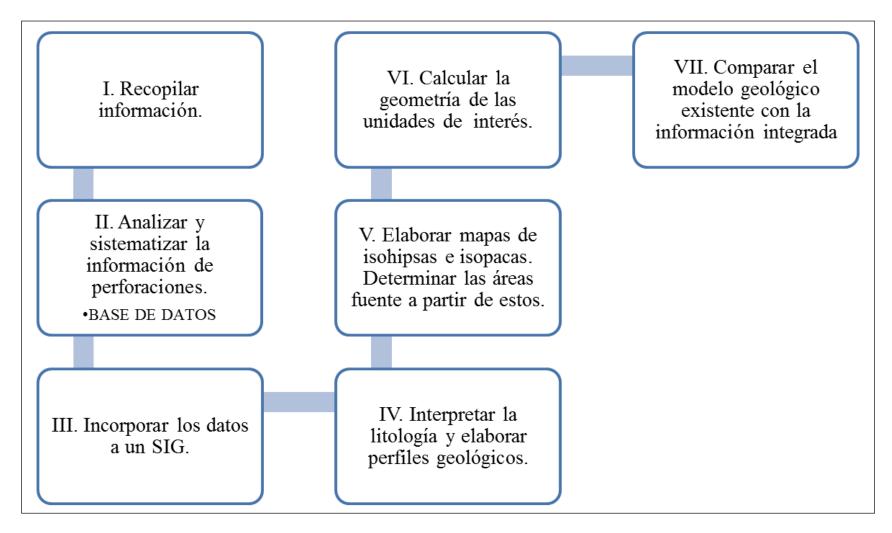


Figura 1.2: Diagrama de flujo metodológico.

#### 1.7.1 Elaboración de la base de datos

El insumo principal para la elaboración de isohipsas e isopacas fue la base de datos, cuya elaboración se explica a continuación.

Durante la revisión a detalle de la litología contenida en el registro de perforaciones se identificaron varias anomalías en las interpretaciones, por ejemplo, descripciones escuetas, incongruentes y con falta de criterio profesional (figura 1.3). Por lo que se procedió a descartar el 46% del total de 2583 perforaciones.

Debido al gran volumen de registros de perforación se utilizaron los estudiados previamente por Echandi (1981) y Pérez (2000), esto debido a que muchas de las perforaciones utilizadas por dichos autores son de núcleo continúo. En algunas de las perforaciones del P. H. Virilla (utilizadas por Pérez, 2000) se realizaron posteriormente dataciones radiométricas, lo que facilitó utilizarlas de guía, correlacionándolas con las unidades de interés. Por lo que el primer acercamiento a la comprensión de la estratigrafía del Valle Central se basa en las 46 perforaciones de los estudios de Echandi (1981) y Pérez (2000). Seguidamente, se interpretan el resto de los registros de perforación por medio de "cadeneo" con dichas perforaciones.

Se obtuvo así, para cada perforación la elevación del techo y piso, y el espesor aparente en las 1395 perforaciones utilizadas, estos datos se manejaron en una hoja electrónica en formato Excel (figura 1.4). Se creó además, otro archivo del mismo formato, pero por unidad (figura 1.5), que indica la elevación de los techos, pisos y espesor aparente; el cual fue el insumo para elaborar los archivos puntos tipo *shape*, a partir de los cuales se crearon las isohipsas e isopacas (figura 1.6), mediante la interpolación tipo spline con barreras en ArcGis 10.0.

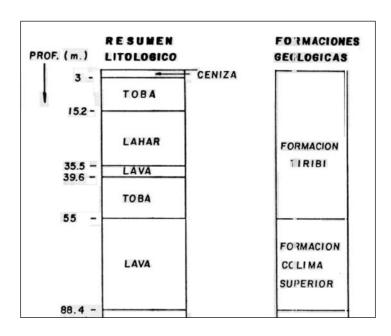


Figura 1.3: Registro de perforación con interpretación errónea, donde se correlaciona Tiribí con lavas, lahares y tobas.

A	A	В	С	D	E	F	G	Н
1	N°Pozo	Altura del pozo	Profundi dad	Espesor de la unidad	Litología	Altura del techo la unidad		Interpretación
2	x	1090	0-3	36	36 ceniza		1054	LyC LAVINA
3			3-15		toba			
4			15-36		lahar			
5			36-40	52	lava	1054	1002	Linda Vista
6			40-55		toba			
7			55-88		lava			
8			88-111	51	ceniza	1002	951	Puente Mulas
9			111-117		lahar			
10			117-139		toba			
11			139-159	20	Brecha lávica	951	931	Belén
12						931		
13	У	1078	0-12	32	Suelo	1078	1046	LyC LAVINA
14			12-32		Lahar , bloques de lava y tobas en matriz limo y arena			
15			32-39	7	Toba gris oscuro bien soldada	1046	1039	Tiribí
16			39-40	1	Pómez blanco crema	1039	1038	Capa Tibás
17			40-73	33	Lava, alterna tramos brechosos, color rojizo y morado,	1038	1005	Linda Vista
18			73-130	57	Toba, se alternan tramos de arenas volcánicas sanas co	1005	948	Puente Mulas
19			130-139	9	Lava muy porosa	948	939	Belén
20						939		

Figura 1.4: Captura de pantalla del archivo de Excel donde se indican los datos asociados a los registros de perforación.

13	AB-1880	523700	215050	1070	170	1041	1000	41	
14	AB-1904	523675	214925	1073	170	1037	1012	25	
15	AB-1881	523625	214700	1080	168	1043	1024	19	
16	AB-1328	524150	215075	1078	139	1038	1005	33	
17	AB-462	524200	214650	1090	159	1054	1002	52	
18	AB-2050	524170	214900	1082	140	1036	1012	24	
19	AB-1402	524770	214370	1103	162	1071	993	78	
20	AB-699	525350	215700	1077	203	1051	951	100	
21	AB-1606	525740	214390	1121	110	1079	1011	68	
22	AB-484	526200	214900	1099	191	1067	997	70	
23	AB-1295	526500	214500	1125	100	1061	1025	36	
24	AB-1803	527745	214825	1139	164	1104	1015	89	
25	AB-1921	528050	214550	1148	78	1094	1070	24	
26	AB-1227	528600	214500	1159	156	1099	1039	60	
27	AB-1471	528680	214209	1173	87	1092	1086	6	
28	AB-2486	529197	214120	1176	301	1053	1037	16	
29	AB-1735	529390	214375	1185	242	1064	1045	19	
30	AB-739	529300	214340	1184	240	1065	1054	11	
31	AB-2379	529720	214170	1183	136	1095	1047	48	
32	AB-1439	527850	214100	1145	41	1112	1104	8	
33	AB-2148	527800	214075	1143	180	1095	915	180	
34	AB-59	529230	213810	1180	61	1150	1119	31	
35	AB-5	526380	215810	1116	36	1090	1080	10	
36	AB-1642	526660	215640	1125	168	1067	1003	64	
37	AB-1150	526850	216425	1129	67	1078	1062	16	
38	AB-1608	527320	215550	1143	140	1052	1007	45	
39	AB-2223	527920	215600	1154	193	1082	1022	60	
40	A D 1121	procesados	Barva Irazú	Tiribí CPT	NA T+PM	Linda Vista	Puente I	Marina /	Be

Figura 1.5: Captura de pantalla del archivo de Excel, separado en pestañas por unidad litológica.

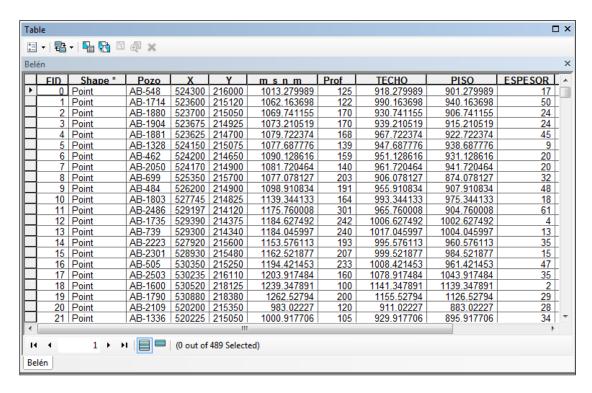


Figura 1.6: Captura de pantalla de la tabla de atributos asociada al archivo shape.

# 1.7.2 Alcances y limitaciones

La presente investigación tuvo un carácter descriptivo y cuantitativo. El análisis de 1395 registros de perforación aporta información básica de las unidades presentes en el piso volcánico del Valle Central, a partir de esto se obtuvo información cuantitativa de las unidades, como su espesor aparente (ya que las perforaciones no necesariamente cortan perpendicularmente las unidades), volumen aparente y área superficial, estos últimos acotados en el área de estudio y limitados a la erosión que presentan estas rocas. La fuente de las unidades se determinó por medio de la paleomorfología de las mismas. La unidad El Coyol se ha incluído en el estudio pese a no encontrarse dentro de los objetivos, esto debido a que fue asociado temporal y espacialmente a Nuestro Amo (Alvarado & Gans, 2012), el cual sí es asociado a la Formación Colima.

Existen una serie de limitantes asociadas al presente trabajo, las cuales se presentan a continuación y se describen brevemente.

- De acceso: No se pudieron visitar ciertos afloramientos de las unidades, puesto que el trámite de solicitud de permisos para los accesos duró como mínimo un mes para cada sitio, también existe el riesgo de acceso a zonas urbano-marginales, así como, a ríos muy contaminados, encañonados y de caudales importantes. Pese a la solicitud de permiso solicitada, y dado que no se obtuvo respuesta, no se logró acceder al dique que se ubica en las cercanías de La Reforma.
- Descripción de los registros de perforación: En los que se ha observado un sesgo cognitivo en algunas descripciones litológicas, en donde se hacen interpretaciones de manera que coincidan con un modelo particular. Además, son pocas las descripciones que cualifica y cuantifica de forma detallada a las rocas observadas.
- Uso final de las perforaciones: La gran mayoría de estas fueron realizadas con fines hidrogeológicos, por lo que las descripciones se enfocaron en este tipo de parámetros. Además, la profundidad de las perforaciones para pozos en la mayoría de los casos es controlada por el nivel del acuífero más somero. La distribución de estos va asociada a los requerimientos de agua de las poblaciones e industrias, por lo que en sitios con abundancia de agua superficial o descargas naturales la densidad de pozos es baja.
- Interpretación de perforaciones: Se aclara que el proceso de elaboración del mapa geológico del área de estudio se basó en la interpretación del registro de perforación, con el fin de tener una idea de cómo se distribuyen las unidades litológicas en superficie, el cual no pretende ser una herramienta en exceso precisa, ya que para su comprobación haría falta una campaña geológica a detalle.
- Económicas: Pese a que se obtuvo la colaboración económica del C.I.C.G., hubo limitaciones respecto a las giras, en particular con el alquiler de vehículos.
- Propias de la vulcanoestratigrafía: Se presentaron conflictos de interpretación e identificación de las unidades ignimbríticas, en particular debido a las facies que

presentan. Dificultad para diferenciar los distintos eventos lávicos basándose en características macro y microscópicas. Ausencia de capas guías de amplia extensión y fácil identificación.

#### 1.8 Marco teórico

La actual investigación se encarga de estudiar los productos volcánicos del piso de Valle Central, en particular tres tipos de productos volcánicos, a saber, depósitos ignimbríticos, lavas y depósitos de *debris avalanche*.

Al ser las lavas e ignimbritas relativamente bien conocidas y comprendidas desde el punto de vista geológico, no se detalla acerca de estas en el presente marco teórico. Sin embargo, en el gremio geológico de Costa Rica aún hay poca claridad respecto a los depósitos de *debris avalanche*, por lo cual se hace una síntesis de estos. Así mismo, se incluye las características del vulcanísmo fisural.

## 1.8.1 Lavas fisurales y campos de lava

Las lavas fisurales suelen presentar composición basáltica. Se presentan como campos extensos y voluminosos de coladas, eruptadas tradicionalmente por fisuras monogenéticas, las cuales tienden a evolucionar a fuentes puntuales. Normalmente ocurren en las cercanías de puntos calientes o en sistemas tipo rift. Este tipo de formación produce una topografía con un relieve suave, cubriendo hasta miles de kilómetros cuadrados. Las lavas suelen presentarse como lavas compuestas, que pueden ser divididas en unidades de flujo y reconocidas por los contactos con las otras unidades de flujo (Walker, 2000). Sin embargo, existen pocos estudios acerca de lavas fisurales de composición andesítica.

Los campos flujos de lava resultan del emplazamiento de varios eventos de coladas de lava, en los cuales, se puede o no identificarse sus flujos individuales, los cuales pueden presentar volúmenes de pocos kilómetros cúbicos. Los campos de lava pueden extenderse a lo largo de decenas de kilómetros y alcanzar espesores de cientos de metros, sin embargo, en términos generales estos suelen tener dimensiones modestas (Kilburn, 2000).

#### 1.8.2 Fracturas volcanotectónicas

Alvarado et al. (1986) identifican una serie focos volcánicos menores (estratovolcanes simples, conos piroclásticos, calderas y cráteres de explosión) con orientación N-S ubicados transversalmente a la Cordillera Central de Costa Rica. Estos autores indican que estos focos han sido edificados sobre fracturas corticales profundas, cuya actividad no es muy antigua y aún activa. Gazel & Ruíz (2005) describen una fractura volcanotectónica de rumbo norte-sur, sobre la cual se emplazan los conos piroclásticos de Sabana Redonda, el volcán Poás (cráter principal, cráter Botos y cono von Frantzius), el volcán Congo y los cráteres explosivos de Hule y Río Cuarto. Señalan la ausencia en campo, de los planos principales de esta estructura. Asimismo, Rojas et al. (2017) identifican una fractura

volcanotectónica asociada al volcán Barva, con dirección N19°W, la cual tiene una longitud de 8,5 km y presenta varios conos satelitales menores asociados. Las orientaciones de estas estructuras coinciden con el esfuerzo compresivo horizontal máximo (ECHM), el cual para la Cordillera Central es predominantemente N-S, con pequeñas variaciones al este u oeste (Montero & Morales, 1990).

#### 1.8.3 Los depósitos de debris avalanche

Estos eventos, también llamados colapsos sectoriales, se generan por medio de megadeslizamientos, originándose en un sistema volcánico, que normalmente se compone de productos fragmentarios con poca o ninguna soldadura, así como de lavas con fracturas de enfriamiento y productos que suelen estar afectados por un sistema hidrotermal. Debido a sus características geomecánicas estos son inestables (Van Wyk de Bries & Delcamp, 2015).

Los volcanes son un medio dinámico en el cual interactúan diversos procesos, como: erupciones, intrusiones, deformación, tremor, sismos volcano-tectónicos y actividad hidrotermal, lo cual los hace más propensos a la inestabilidad de sus laderas, facilitando que se generen este tipo de eventos, que pueden involucrar diferentes porciones del volcán, desde sectores pequeños hasta grandes porciones del macizo, así como domos (Van Wyk de Bries & Delcamp, 2015).

Estos eventos pueden evolucionar a depósitos tipo *debris flow*, al incorporar la suficiente cantidad de agua (Van Wyk de Bries & Delcamp, 2015). Estos eventos alcanzan grandes velocidades (50-360 km/h) y distancias (0,5-120 km) y sus espesores pueden alcanzar centenas de metros (Alvarado et al, 2004).

El volumen de este tipo de depósitos es variable, suele oscilar entre millones de metros cúbicos hasta decenas de kilómetros cúbicos. Pueden extenderse a lo largo de muchos kilómetros, de hecho, presentan una mayor movilidad que los deslizamientos no volcánicos (Van Wyk de Bries & Delcamp, 2015).

El recorrido de los materiales desplazados por medio de deslizamientos puede ser muy extenso (a esta distancia se le denomina L) respecto al cambio total en la altura (H). En la figura 1.7 se muestra la razón de H/L, que suele ser alrededor de 0,6 para eventos pequeños, mientras que para eventos de varios kilómetros cúbicos la razón llega hasta 0,1 (Heim, 1932; Erismann, 1979).

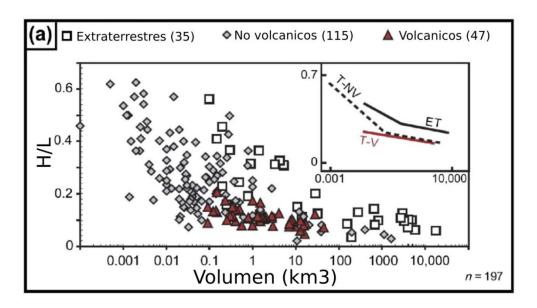


Figura 1.7: Relación H/L para deslizamientos, deslizamientos volcánicos y extraterrestres (Tomado de Van Wyk de Bries & Delcamp, 2015).

Existen factores de disparo asociados a la actividad propia del volcán, como las intrusiones y las variaciones en la presión de poro del sistema hidrotermal, o incluso, la deformación progresiva del edificio volcánico, que puede extenderse desde decenas a decenas de miles de años. Además existen factores externos como la actividad sísmica y las condiciones meteorológicas (Van Wyk de Bries & Delcamp, 2015).

Alvarado et al. (2004) sugieren que puede ocurrir uno de estos eventos cada 500-2000 años.

Al ser un tipo de deslizamiento presenta características similares a estos. A continuación se describen sus principales rasgos.

Cicatriz: Zona donde se da la ruptura, suele ser triangular o con forma de herradura, pudiendo cortar únicamente el edificio volcánico o incluir parte del basamento.

Bloques toreva: Son bloques de gran dimensión que han presentado un movimiento rotacional, provenientes de la zona de cicatriz. En eventos donde la depositación se da sobre terrenos muy erosionados no suelen preservarse.

Hummocks: Una de las características típicas de los depósitos de debris avalanche. Se forman durante la dispersión de la masa deslizada y su origen es extensional. Suelen alinearse en la dirección de movimiento del evento y su tamaño disminuye al alejarse de la fuente. Se conocen dos tipos, los que son generados por estructuras en el deslizamiento a modo de horst y graben, y los formados por separación y aislamientos de fragmentos del edificio volcánico. Los bloques tipo toreva son una clase de hummock formado por dicho mecanismo.

Áreas inter-hummock: Suelen comprender la mayor área superficial del depósito. Y su proporción incrementa en la zona distal. Estas áreas suelen estar conformadas por matriz y facies mixtas, donde se ha incorporado una cantidad importante del substrato. En estos sectores se suele concentrar agua y producir depósitos de *debris flow* secundarios. En caso de que se incorpore suficiente volumen de agua y lo sature, puede transformar la masa que se desliza en un *debris flow*.

Morrenas: Se dan debido a la extensión en áreas distales del depósito.

Limites marginales: Tanto el frente como el borde del depósito pueden presentar una pendiente importante y es común encontrar en su frente estructuras compresivas.

Facies de depósitos de debris avalanche:

- Facies en bloques: se componen de partes altamente fracturadas de la masa deslizada original. Caracterizándose por la textura en rompecabezas, donde se mantiene la posición del elemento, pero está completamente triturado.
- Facies de matriz: corresponde con bloques altamente fracturados.
- Facies mixtas: se compone de una matriz arenosa-limosa con bloques poligenéticos aislados, de hasta pocos metros de diámetro. Es común que presente textura fluidal. Se observan además diques clásticos.

# 1.8.4 Interpolación de datos tipo Spline

Para la interpolación de datos espaciales existen distintas metodologías: ponderación por distancia (*Inverse Distance Weighting*, por sus siglas en inglés), Krigin o hipótesis de la variable regionalizada y triangulación lineal son las que se utilizan con mayor frecuencia.

La interpolación tipo Spline (o de curvatura mínima) estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (ArcGis, 2017). Mediante una técnica de multicuadrícula unidireccional, va desde una cuadrícula inicial gruesa (que usa como promedio los datos de entrada) y a través de cuadrículas más pequeñas, produce una aproximación de una superficie de curvatura mínima en el espaciado de filas y columnas deseadas (Terzoupulus, 1988). Así el modelo de superficie basado en cuadrícula se trata como una membrana elástica, cuya deformación en cada celda se calcula en función de una suma molecular, la cual compara la suma ponderada de las doce celdas vecinas con el valor actual de una celda de destino central, calculando así un nuevo valor para la celda de destino.

En programa ArcGis cuenta con una herramienta de interpolación tipo Spline que utiliza barreras definidas por el usuario, lo cual la hace ideal para interpolar datos, en los casos que existan barreras físicas, como es el caso actual con los paleorelieves positivos. Asimismo,

este tipo de interpolación permite mostrar gradaciones variables de superficies, como el caso de las elevaciones (Terzopoulus, 1988).

En la siguiente figura (1.8) se aprecia de manera gráfica como funciona este método de interpolación multicuadrícula unidireccional.

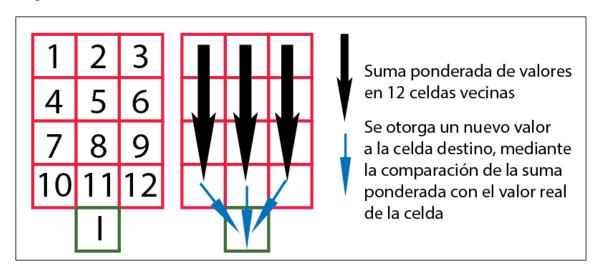


Figura 1.8: Esquema de funcionamiento del método de interpolación Spline.

# 2 Antecedentes generales

A continuación se expone de manera general el contexto tectónico de Costa Rica, asimismo, se muestran las investigaciones geológicas previas, correspondientes al área de interés para el presente estudio.

# 2.1 Contexto geológico y tectónico

Como se observa en la figura 2.1, el contexto tectónico de Costa Rica está regido por la presencia de un punto triple localizado hacia el sur de punta Burica, en el cual interactúan las placas Caribe, del Coco y Nazca. La placa del Coco se subduce bajo la placa Caribe a lo largo de la Fosa Mesoamericana, mientras que la placa Nazca muestra un límite transformante con la placa del Coco. Además, una cuarta placa, de dimensiones menores y con límites incipientes, se separa de la placa Caribe; esta es la microplaca de Panamá, cuyo límite occidental transcurre por la parte central de Costa Rica, límite que se denomina Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR) (Montero, 1999; 2001).

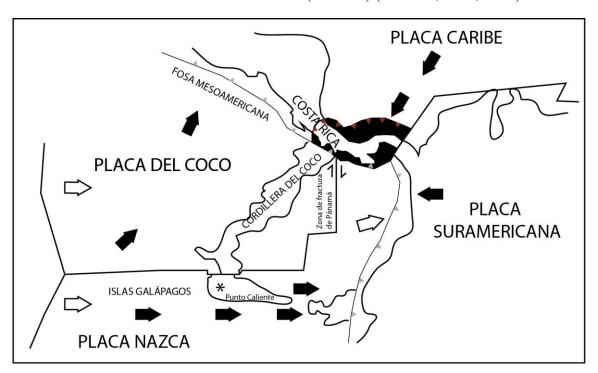


Figura 2.1: Esquema del contexto tectónico regional de Costa Rica.

De acuerdo con Marshall et al. (2003), la evolución del paisaje del Cenozoico Tardío dentro del arco volcánico de Costa Rica, ha sido altamente influenciada por la subducción de la Cordillera del Coco y su dominio de montes submarinos. La migración del frente magmático desde los montes del Aguacate a la Cordillera Central resultó en el reacomodo

de la divisoria de aguas Pacífico-Caribe, la formación de la cuenca del Valle Central, y la reorganización de las redes fluviales. Dichos autores sugieren que la migración del arco y la consecuente secuencia de evolución del paisaje del Valle Central, son el resultado de la placa subducida con una corteza irregular oceánica gruesa. El retroceso del arco ocurre cerca de la costa, de corteza moderadamente engrosada (de dominio de montes submarinos).

En la Cordillera del Coco el vulcanismo ha cesado y el rápido levantamiento mantiene el drenaje dividido a lo largo de la Cordillera de Talamanca. A lo largo de otros márgenes convergentes, como en Ecuador, Chile y Perú, episodios del retroceso del arco han sido asociados con la disminución del ángulo de subducción, mediante modelos térmicos y observaciones geoquímicas (Gutsher et al., 2000).

Alvarado (1990) deja entrever la posible existencia de lo que actualmente se conoce como la Paleo-Cordillera; así mismo Gans et al. (2003) concluyen que ha habido una rotación del arco volcánico de 30° contra las agujas del reloj, desde el Mioceno Medio hasta el presente, la cual tiene su polo de tracción centrado al sur del país.

### 2.2 Investigaciones previas

#### 2.2.1 Antecedentes

El primer estudio conocido de las rocas del piso del Valle Central corresponde con el realizado por Romanes (1912). Posteriormente, Williams (1952) identifica la unidad de lavas "que fluyeron por los cañones de ríos", denominándolas Lavas Intracañón.

Fernández (1969) realiza un estudio geológico, en el sector comprendido entre el noreste de la ciudad de Alajuela y el este de San Isidro de Coronado. Dicho estudio identifica que esa área está constituida por dos unidades geológicas mayores: un basamento de rocas sedimentarias, plegadas e intruídas, que corresponden con las formaciones: Pacacua, Turrúcares, San Miguel y Coris. Sobre ellas, seguidamente se emplazan los materiales volcánicos del Grupo Aguacate, así como los productos de la actividad de la Cordillera Central; que incluye las formaciones Colima, Ignimbrita Inferior de Puente de Mulas, Tiribí, Setillal y Barva. Diversos autores han denominado con diferentes nombres a estas unidades volcánicas, las cuales se muestran en el cuadro 2.1.

Posteriormente, Echandi (1981) reúne las distintas unidades volcánicas posteriores al Grupo Aguacate cuyo origen, sugiere el autor, que corresponde a la Cordillera Central y están localizadas en el Valle Central Occidental, denominándolo, Grupo Volcánico Central, constituido por materiales provenientes de los volcanes Poás, Barva y otros centros de emisión localizados al este del valle. Les asigna edad de final del Plioceno a Holoceno.

Cuadro 2.1: Síntesis de la nomenclatura de unidades geológicas, según los principales autores.

Williams (1952)	Fernández (1969)	Echandi (1981)	Kussmaul & Sprechmann (1984)	Denyer & Arias (1991)	Pérez (2000)	Pérez et al. (2006)	Alvarado & Gans (2012)
Avalancha Ardiente	Formación Tiribí	Formación Tiribí (Mb. Nuestro Amo, Mb. Electriona, Mb. La Caja)	Formación Depósitos de Avalancha Ardiente	Formación Depósitos de Avalancha Ardiente (sin miembros)	Formación Ignimbrita Tiribí (elimina miembros, excluye Nuestro Amo)	Formación Ignimbrita Tiribí	Formación Ignimbrita Tiribí
Lavas Intracañón	Formación Colima	Formación Colima (Mb. Belén, Mb. Puente de Mulas, Mb. Linda Vista)	Formación Lavas Intracañón	Formación Lavas Intracañón (sin miembros)	Formación Colima (sin miembros)	Formación Colima (sin miembros)	Formación Colima (Mb. Belén, Mb. Nuestro Amo*, Mb. Linda Vista) Formación Puente de Mulas

(\*Nuestro Amo=El Coyol=Tivives)

# 2.2.2 Relaciones estratigráficas

A lo largo de los años las relaciones estratigráficas propuestas para las rocas volcánicas del Valle Central han variado para los miembros de las formaciones Colima y Tiribí. Sin embargo, las relaciones estratigráficas entre las formaciones se han mantenido. Echandi (1981) explica al Valle Central, como constituido de un basamento sedimentario (Mioceno), que fue cubierto por las rocas del Grupo Aguacate (Mioceno-Plioceno) y seguidamente por las rocas volcánicas de la Cordillera Central (Cuaternario), siendo las primeras rocas en emplazarse las de la Formación Colima. En concreto, las lavas del Miembro Belén, seguidas por las Ignimbritas de Puente de Mulas y las lavas del Miembro Linda Vista, continuando con el evento ignimbrítico de Tiribí y las rocas de la Formación Barva, para culminar con la cobertura de cenizas y lahares (Figura 2.2).

Fernández (1969) es el primer autor en asignar miembros a la Formación Tiribí, denominándolos La Caja y Nuestro Amo. Nuestro Amo es descrito originalmente por Brenes (1967), como unas tobas lodosas y tobas lapillíticas lodosas, sin embargo, no les asigna nombre y sugiere que su origen es por medio de avalanchas calientes. Echandi (1981) mantiene los miembros de Tiribí, e incluye uno más, llamado Electriona. Define además, tres miembros para la Formación Colima, dos lávicos, a saber, Belén y Linda Vista y una ignimbrita en medio de ambas lavas, denominada Puente de Mulas. Pérez (2000) determina que el miembro Nuestro Amo no es una ignimbrita, sino un depósito de *debris avalanche* no asociado a Tiribí, además agrega que los otros miembros propuestos (La Caja y Electriona) son en realidad facies de la ignimbrita Tiribí (Figura 2.3). Alvarado & Gans (2012) y Porras et al. (2012) basados en dataciones y observaciones de campo proponen al

miembro Nuestro Amo como parte de la Formación Colima, siendo este parcialmente coetáneo a las lavas del miembro Belén (Figura 2.4). Méndez & Hidalgo (2004), describen unos depósitos de *debris avalanche*, en las cercanías de El Coyol, y lo correlacionan por cronología con la Formación Barva.

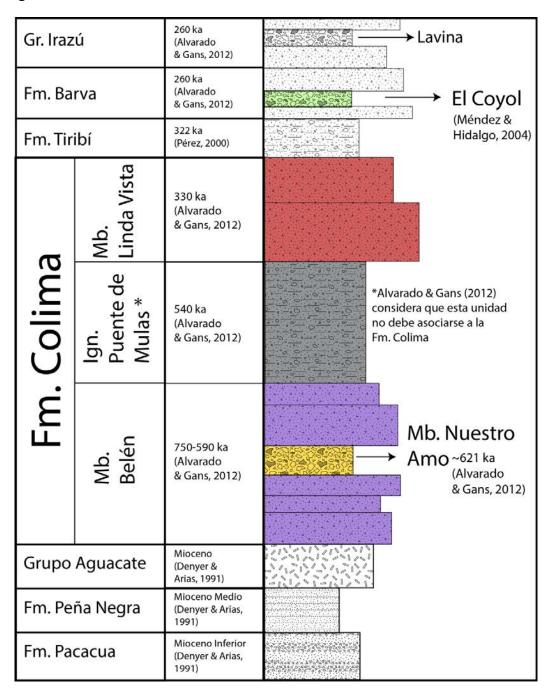


Figura 2.2: Relaciones estratigráficas entre las formaciones y unidades que componen el piso del Valle Central [Basado en Echandi (1981), Denyer & Arias (1991), Pérez (2000), Méndez & Hidalgo (2004) y Alvarado & Gans (2012)].

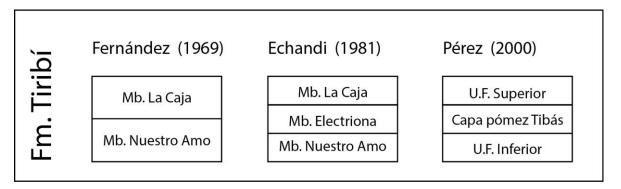


Figura 2.3: Esquema de las relaciones estratigráficas entre los diferentes miembros de la formación Tiribí, según Fernández (1969), Echandi (1981) y Pérez (2000) (UF= unidad de flujo).

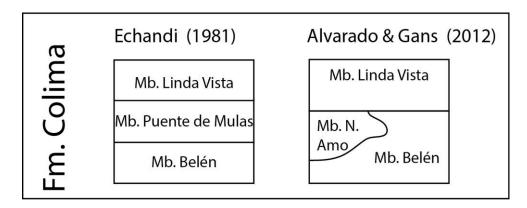


Figura 2.4: Esquema de las relaciones estratigráficas entre los diferentes miembros de la formación Colima, según Echandi (1981) y Alvarado & Gans (2012).

A continuación se describe por medio de las investigaciones previas, y mediante la nomenclatura estratigráfica vigente, a la Formación Colima, que atañe al presente estudio, así como la secuencia que las sobreyace: Formación Tiribí y Formación Barva.

#### 2.3 Formación Colima

# 2.3.1 Localidad tipo

Fernández (1969) define la localidad tipo en el Tajo Colima (cerca del puente sobre el río Virilla entre Tibás y Santo Domingo de Heredia), en la margen derecha del río Virilla (coordenadas aproximadas 527270/216812 LN y 490713/1102334 CRTM-05). En la figura 2.5 se encuentran las localidades de referencia para esta unidad.

## 2.3.2 Descripción

Litológicamente corresponden con lavas andesíticas e ignimbritas. Echandi (1981) la subdivide en tres miembros: Belén (corresponde con las lavas inferiores), la ignimbrita de Puente de Mulas (miembro intermedio), y el Miembro Linda Vista (lavas superiores). Según ONU (1975) se compone de hasta seis derrames lávicos, con espesores entre 1 y 38

m, alternando con tobas. Su espesor máximo es 300 m, en el pozo AB-471-A (350m al oeste del puente sobre el río Virilla, entre San José y La Valencia, coordenadas: 523950/216050 LN, 487385/1101567 CRTM-05).

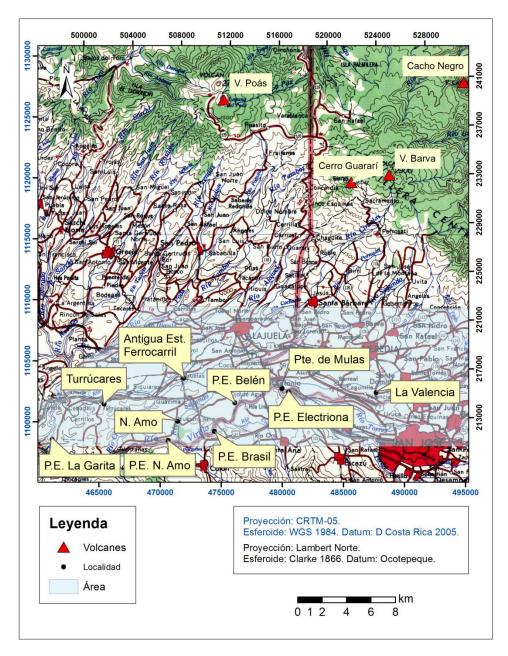


Figura 2.5: Localidades de referencia para la Formación Colima. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968.

## 2.3.3 Aspectos regionales

Fernández (1969) indica que estas lavas se extienden hacia el sur y oeste de la Cordillera Central, siendo su flujo obstaculizado por la morfología preexistente; a partir de donde se desplazan hacia el suroeste, en correspondencia con lo que es el valle actual del río Grande

de Tárcoles. Según Fernández (1969), estas rocas tienen una dispersión amplia pero no continua. Echandi (1981) indica que se encuentran ampliamente distribuidas en el Valle Central, bajo los depósitos ignimbríticos y tobáceos de la Formación Tiribí. Los principales afloramientos se presentan mayormente en los cañones del río Virilla y Tibás, sin embargo, tanto Porras et al. (2012) como Alvarado & Gans (2012) señalan afloramientos en la Ruta Nacional N.º 27, más allá del Valle Central, estos últimos sugieren que existen rocas correlacionables petrográficamente y por edad, en la localidad de Turrúcares.

#### 2.3.4 Edad

Dataciones <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar asignan 758 – 590 ka a las rocas del Miembro Belén, 630 – 610 ka a las rocas del Miembro Nuestro Amo, 440 ka a las rocas de Puente de Mulas, y 331 ka a las rocas del Miembro Linda Vista (Alvarado & Gans, 2012). Sin embargo, Alvarado & Gans (2012) consideran que Puente de Mulas, al ser un evento destructivo, no debe considerarse parte de la Formación Colima.

### 2.3.5 Relaciones estratigráficas

Echandi (1981) señala que esta Formación es sobreyacida en la mayoría de su extensión por la Ignimbrita de Tiribí; la observa sobreyaciendo discordantemente a depósitos sedimentarios de lutitas y areniscas del Neógeno, aguas abajo de la presa de Brasil y hasta las plantas eléctricas Nuestro Amo y Las Ventanas.

#### 2.3.6 Génesis

De acuerdo con Fernández (1969), las lavas de Colima son las primeras en fluir en el Valle Central, producto de la actividad de la Cordillera Central, con algunos lentes y tobas intercalados. Otros autores consideran un origen fisural para estas lavas, Por ejemplo, Protti (1986) señala que la orientación de estas fisuras es NW-SE, mientras que Kussmaul (1988) indica que probablemente fluyen de fisuras con orientaciones NE-SW hasta E-W. Alvarado (1984) sugiere que las plataformas de ignimbritas y las lavas que reposan al pie de la Cordillera Central testifican eventos fisurales y volcano-tectónicos del Plioceno Superior - Pleistoceno. Denyer & Arias (1991) considerando los esfuerzos tectónicos regionales, desde el Mioceno a la actualidad, señalan que probablemente provengan de fracturas orientadas N-S o NE-SW (figura 2.6). Kussmaul (1988) identifican a estas lavas de carácter andesítico- dacítico rico en potasio. Pérez (2000) señala que los flujos lávicos que sobreyacen y subyacen a la ignimbrita Tiribí, muestran una gran similitud geoquímica entre sí, sugiriendo que la fuente es la misma; esto por su carácter andesítico, rico en potasio, sugiriendo que las lavas e ignimbritas del piso del Valle Central tienen una afinidad química con el vulcanismo Paleo-Barva.

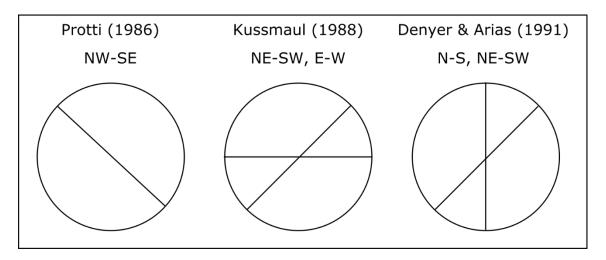


Figura 2.6: Esquema que muestra la propuesta de orientación de fisuras de diferentes autores, para explicar el origen de las lavas de la Formación Colima.

#### 2.3.7 Antecedentes

Romanes (1912) es el primero en hablar acerca de las rocas aflorantes en el río Virilla, sin embargo, es Williams (1952) quien hace un estudio detallado y les asigna el nombre de Lavas Intracañón. Malavassi & Madrigal (1967) identifican dos coladas de lava, ubicadas cerca del río Virilla. Castillo (1969) en su estudio sobre el Valle Central Occidental, cartografió las rocas de los volcanes de la Cordillera Central sin diferenciarlas. Fernández (1969) se enfoca en las características acuíferas de estas rocas.

#### 2.4 Miembro Belén

### 2.4.1 Localidad tipo

Echandi (1981) ubica la localidad tipo en la planta eléctrica Belén, hacia el sur de San Rafael de Alajuela. En la figura 2.7 se muestran las localidades de referencia para esta unidad.

## 2.4.2 Descripción

Echandi (1981) propone a Belén como el miembro basal de la Formación Colima. Se compone de una serie de coladas de lava andesíticas piroxénicas, negras, separadas por capas de tobas; las lavas son muy densas y diaclasadas, su composición varía de una colada a otra. Kussmaul (1988) las describe como una asociación petrológica de carácter andesítico/dacítico, rico en potasio.

### 2.4.3 Aspectos Regionales

Echandi (1981) reporta un espesor aflorante de 20 m, pero mediante interpretación de perforaciones determina un máximo de 140 m. Sus afloramientos abarcan desde Puente de Mulas hasta la planta eléctrica Las Ventanas en el río Virilla. Mediante interpretación de testigos de perforación, le da una extensión que limita al norte con el río Virilla y hacia el área en donde se ubican las plantas eléctricas Nuestro Amo y Las Ventanas.

#### 2.4.4 Edad

Según Alvarado & Gans (2012) la edad de este miembro determinada mediante el método radiométrico <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, se ubica entre los 750 y 590 ka.

#### 2.4.5 Génesis

Tanto Kussmaul (1988) como Denyer & Arias (1991) indican un origen fisural de las estas lavas. Kussmaul (1988) señala que un dique ubicado en las cercanías del Centro Penitenciario La Reforma tiene una dirección estimada de E-W, por otra parte, Denyer & Arias (1991) proponen una orientación de las fisuras de rumbo N-S o NE-SW. Alvarado & Gans (2012) lo asocian a las rocas de la Paleo-Cordillera en sus faces medias a distales.

# 2.4.6 Relaciones estratigráficas

Sobreyace discordantemente la secuencia de areniscas y lutitas (Mioceno) y rocas volcánicas del Grupo Aguacate (Mioceno-Plioceno), y subyacen a la ignimbrita de Puente de Mulas. En los sectores donde no se depositó la ignimbrita, se encuentra en contacto con las lavas de Linda Vista (Echandi 1981). Alvarado & Gans (2012) reportan que en algunos lugares es sobreyacido por el Miembro Nuestro Amo.

#### 2.4.7 Antecedentes

Echandi (1981) lo definió como el Miembro basal de la Formación Colima, durante las investigaciones posteriores y hasta la actualidad ha sido clasificado de la misma manera.

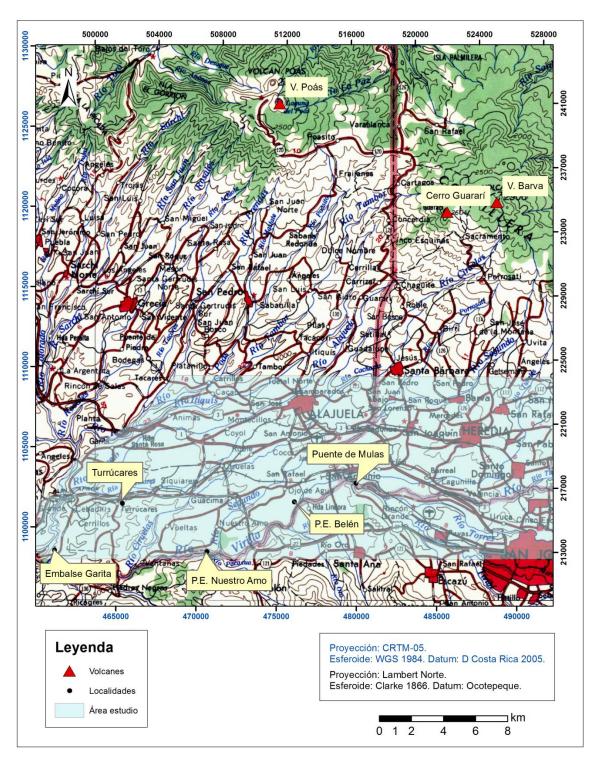


Figura 2.7: Localidades de referencia para el Miembro Belén. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968.

#### 2.5 Miembro Nuestro Amo

### 2.5.1 Localidad tipo

Brenes (1967) determina la localidad tipo en el cauce de río Segundo, en la zona de Nuestro Amo, entre el puente del camino que lleva a la finca Pital y la unión del río Segundo con el río Virilla (en las cercanías de la localidad de Nuestro Amo, coordenadas aproximadas 507900/214500 LN).

Echandi (1981) propone una nueva localidad tipo, en un afloramiento localizado en el río Ciruelas, en el puente del ferrocarril, 150 m al este de la antigua Estación de Ciruelas (coordenadas aproximadas 508100/218200 LN). En la figura 2.8 se encuentran las localidades de referencia para esta unidad.

# 2.5.2 Descripción

Fue originalmente definida por Fernández (1969) como el Miembro basal de la Formación Tiribí. Caracterizándola como avalanchas frías o "tobas caóticas". Litológicamente, la describe como una toba con fragmentos de composición muy heterogénea (lavas, escorias negras), de tamaño variado, desde guijarros hasta cantos, de redondeados a subangulosos, soportados por una matriz tobácea y lapillítica, densa, masiva, generalmente con cierto grado de arcillificación.

Posteriormente, Echandi (1981) la describe como un material heterogéneo, constituido por una matriz tobácea muy dura y densa, con pómez y fragmentos líticos de composición variable, de granulometría desde pocos milímetros hasta bloques de 1,5 m de diámetro.

Pérez (2000) visita de nuevo los afloramientos utilizados por Fernández (1969) y Echandi (1981), y describe esta unidad como un material heterogéneo, con grandes bloques lávicos de diferentes texturas, fragmentos de tobas, pómez blancas con anfibol, escorias negras y con evidencia de mezcla de magmas, semejantes a las de las ignimbritas del Valle Central. Además, observó estructuras de canal y concentraciones de fragmentos; por lo que lo interpreta como un depósito secundario, posiblemente un flujo de detritos o *debris-flow*, posterior al emplazamiento de las ignimbritas, el cual rellenó los cauces de ciertos ríos.

Según Alvarado & Gans (2012) consiste de una brecha polimíctica (lavas, pómez) de diversos tamaños, mal seleccionada, localmente con alteración hidrotermal, matriz tobácea, dura, densa y con supuestas coladas de lava intercaladas, que perfectamente podrían ser megabloques. Su espesor máximo en perforaciones es de 178 m, pero en general varía entre 5 y 50 m.

### 2.5.3 Aspectos regionales

Según Fernández (1969), aflora principalmente en la zona de Ciruelas, La Guácima y en los cortes de los ríos Ciruelas y Segundo; inmediatamente debajo de las lavas de la Formación Barva.

Echandi (1981) señala que se encuentra principalmente al oeste de la cuenca del río Virilla, especialmente en los cauces de los ríos, en particular, en el curso inferior de los ríos Ciruelas y Segundo; en parte de la quebrada Doña Ana y Salitral y en el río Bermúdez, en el área de San Antonio de Belén.

Méndez & Hidalgo (2004) identifican afloramientos de *debris avalanche* a lo largo de la radial del Coyol, que posteriormente Alvarado & Gans (2012) correlacionan con Nuestro Amo; así mismo, la Formación Tivives definida por Madrigal (1970) la reinterpretan como la fase más distal de esta unidad.

Porras et al. (2012) indican la presencia de al menos 4 depósitos de *debris avalanche* a lo largo de la Ruta Nacional N.º 27.

Alvarado & Gans (2012) consideran que el depósito de *debris avalanche/debris flow* de Tivives (Madrigal, 1970), presenta una correlación temporal y espacial con el depósito de *debris avalanche* de Nuestro Amo, mientras que en el Valle Central Occidental, lo correlacionan con la avalancha El Coyol (Méndez & Hidalgo, 2004); el cual está localizado en las inmediaciones del embalse de La Garita y entre el Aeropuerto Juan Santamaría y Manolos.

#### 2.5.4 Edad

Alvarado & Gans (2012) realizan dataciones <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar de los clastos de lava pertenecientes a este miembro, obteniendo edades de 630-610 ka. Así mismo, se datan unas lavas que correlacionan con unas que intruyen y se derraman sobre este miembro a la altura de La Reforma, estas lavas presentan edades entre 610-590 ka, por lo cual se determina una edad para el Miembro Nuestro Amo de ~610 ka.

### 2.5.5 Relaciones Estratigráficas

Brenes (1967) la reporta sobreyaciendo una a una ignimbrita, en las cercanías de Tacares. Alvarado & Gans (2012) reportan que el *debris avalanche* a la altura de La Reforma en el río Virilla está en contacto lateral e inferior de las lavas del Miembro Belén, ya que fue intruído por las mismas, las cuales posteriormente se derramaron sobre dicho *debris avalanche*.

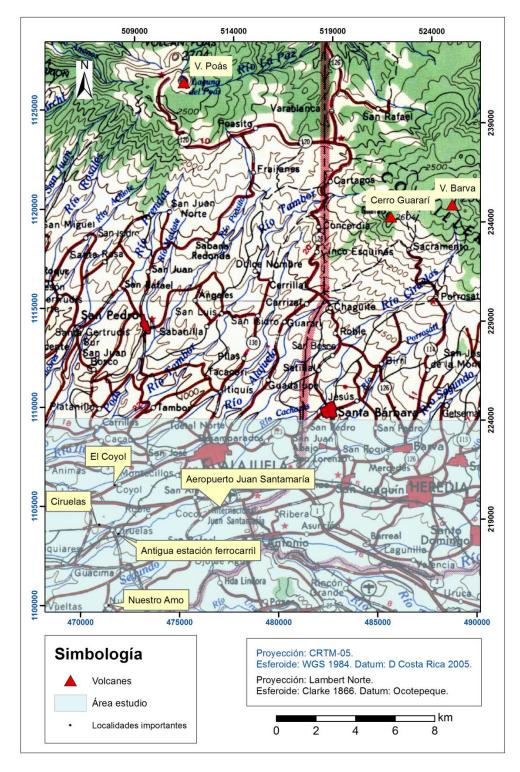


Figura 2.8: Localidades de referencia para el Miembro Nuestro Amo. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968.

#### 2.5.6 Génesis

Según Echandi (1981) la génesis de esta unidad posiblemente corresponde con flujos de fragmentos, que en algunos sitios se debieron de haber depositado aún calientes. Sin embargo, Pérez (2000) propone este miembro como originado por un flujo de detritos o un *debris flow*. Alvarado & Gans (2012) consideran al miembro como un *debris avalanche* el cual evoluciona a un *debris flow* (Fm. Tivives). En el cuadro 2.2 se resumen las génesis propuestas por los principales autores.

Cuadro 2.2: Génesis de eventos asociados a Nuestro Amo, según los principales autores.

Unidad	Madrigal (1970)	Fernández (1969)	Echandi (1981)	Pérez (2000)	Méndez & Hidalgo (2004)	Alvarado & Gans (2012)
Tivives	Depósito de <i>debris</i> flow					Debris avalanche que evoluciona de debris flow. Correlacionable con Nuestro Amo
El Coyol					Depósito de debris avalanche (Fm. Barva)	Correlacionable a Nuestro Amo
Nuestro Amo		Avalancha fría o toba caótica	Flujo de fragmentos caliente	Depósito de debris avalanche o debris flow		Depósito de debris avalanche

#### 2.5.7 Antecedentes

Brenes (1967) define a esta unidad como un conglomerado fino el cual aflora en la base del cañón del río Virilla, casi frente a la "catarata de Despeñe" del río Segundo. Posteriormente, Fernández (1969) indica que este miembro corresponde a la base de las ignimbritas de la Formación Tiribí, por lo que es evidente que existen contradicciones al asociarlo a una formación geológica determinada.

## 2.6 Ignimbrita Puente de Mulas

#### 2.6.1 Localidad tipo

Echandi (1981) ubica la localidad tipo en Puente de Mulas (figura 2.9).

### 2.6.2 Descripción

Echandi (1981) considera que este miembro se encuentra ubicado sobre el Miembro Belén y bajo el Miembro Linda Vista. Consiste en una ignimbrita de color gris oscuro a café

compuesta con muchos fragmentos de lapilli, vidrio colapsado y escoria negra, en una matriz tobácea soldada, algo meteorizada. Presenta disyunción prismática bien desarrollada, con columnas de hasta 10 cm de diámetro. La ignimbrita está limitada por una sección superior y otra inferior de material tobáceo, con lapilli, bombas escoráceas pequeñas, en una matriz de grisácea y muy compacta. ONU (1975) considera esta unidad solamente como un lente.

# 2.6.3 Aspectos Regionales

Echandi (1981) basado en registros de perforación, propone un espesor de hasta 39 m, aunque variable a lo largo del Valle Central.

Ruiz et al. (2010) mencionan la presencia de una ignimbrita de la cual no tienen certeza de su posición estratigráfica hacia el norte del volcán Poás; posteriormente Mana et al. (2015) relacionan a dicha ignimbrita con Puente de Mulas por poseer una edad de 553 ka (40 Ar/39 Ar), P. Ruiz. (com. esc., 2017) realizan análisis geoquímicos que muestran similitud en los elementos K y Si respecto a los de la Formación Colima por Kussmaul & Thorpe (inédito). Por otra parte, Porras et al. (2012) reportan a Puente de Mulas sobreyaciendo a un depósito de la Formación Nuestro Amo. Alvarado & Gans (2012) mencionan que en el cerro Zurquí afloran facies ignimbríticas petrográficamente similares y coetáneas con la Ignimbrita de Puente de Mulas. En el río Colorado (coordenadas 497 000 E/222 250 N, LN) Alvarado & Gans (2012), datan una ignimbrita negra, con una edad radiométrica de 490 ka (muestra CR-057A), por lo cual estos autores la correlacionan con Puente de Mulas.

#### 2.6.4 Edad

Según Alvarado & Gans (2012), por medio de dataciones radiométricas <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, determinan una edad de 440 ka para las Ignimbritas de Puente Mulas. También datan facies ignimbríticas petrográficamente similares, en el cerro Zurquí, con edades entre 500-490 ka, aunque estos autores la asocian a la ignimbrita de Bajo La Hondura.

### 2.6.5 Relaciones Estratigráficas

Echandi (1981) señala que se encuentra sobreyacida por coladas de lava andesíticas densas y lajeadas, que se asocian a la lava de Linda. Además, sobreyace a las lavas de Belén.

#### 2.6.6 Génesis

Alvarado & Gans (2012) y Alvarado (com. Oral, 2017) sugieren que su fuente pueden ser los cerros Zurquí, puesto que las ignimbritas de Puente de Mulas y de Zurquí muestran similitudes en: textura petrográfica, geoquímica y edad.

#### 2.6.7 Antecedentes

Fernández (1969) señala que esta ignimbrita está delimitada tanto superior como inferiormente por lavas de la Formación Colima. Posteriormente, Echandi (1981) la designa como miembro intermedio de la Formación Colima. Bellon & Tournon (1978) reportan dos

dataciones K/Ar en el sector de Puente Mulas con edades de 1000 y 700 ka. Alvarado & Gans (2012) la separa de la Formación Colima, nombrándole Formación Puente de Mulas.

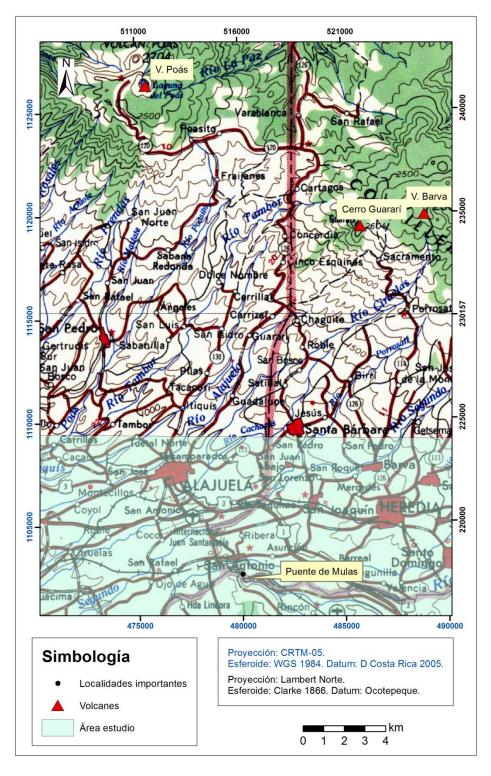


Figura 2.9: Localidades de referencia para la Ignimbrita Puente de Mulas. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968.

#### 2.7 Miembro Linda Vista

### 2.7.1 Localidad tipo

La localidad tipo la constituye el tajo Colima, en Linda Vista; donde se identifican dos coladas de lava, con una sección central densa y brechosa en su parte superior e inferior (Echandi, 1981). En la figura 2.10 se observan las localidades de interés.

# 2.7.2 Descripción

Echandi (1981) describe dos coladas en la localidad tipo. La colada de lava inferior es andesítica-basáltica. La parte superior de la colada es brechosa, constituida por grandes bloques de lava escoriácea negra.

Sobre la colada inferior existe un paleosuelo quemado de color rojo ladrillo ( $\leq 1,1$  m) por la colada superior; formado por cenizas arcillitizadas (Echandi, 1981).

La colada superior es andesítica, con una sección brechosa inferior, muy similar a la colada subyacente, con bloques de lava escoriácea y densa; los bloques son de color negro, de entre 10 y 30 cm de diámetro, producto que se clasifica como autobrecha. El núcleo de la colada es densa y afanítica, color gris verdoso y con estructuras de flujo bien desarrolladas. Presenta diaclasado regular y en algunas partes lajeamiento. La parte superior de la colada es brechosa y termina en una escoria negra. El espesor de la colada superior varía entre 15 y 30 m, y está sobreyacida por una capa de pómez. Se le asigna un espesor promedio es de 25 m. En la planta térmica San Antonio se observan 25 m de lava densa lajeada, con secciones brechosas (Echandi, 1981).

Kussmaul (1988) las clasifica petrográficamente como lavas andesíticas con un máximo de 4% de fenocristales, dentro de una matriz pilotaxítica compuesta por plagioclasa, clinopiroxeno, magnetita y pequeñas cantidades de cristobalita, hornblenda y hematita. Presenta textura fluidal, mostrando una orientación paralela de vesículas muy alargadas. Contradictoriamente, Echandi (1981) la describe como una lava muy porfirítica.

### 2.7.3 Aspectos regionales

Según Echandi (1981) este miembro se extiende ampliamente hacia el este del Valle Central y sus afloramientos se observan en los cauces de los ríos Virilla y Tibás, desde San Luis de Santo Domingo de Heredia hasta Vuelta Virilla, en donde desaparece en el cauce del río, para volver a aflorar en la planta térmica San Antonio.

Echandi (1981) describe que aflora nuevamente en el tajo Zamora (San Antonio de Belén) y en Puente de Mulas. Este miembro parece no extenderse más hacia el oeste de San Antonio de Belén. Por medio de perforaciones, se evidencia la presencia de este miembro entre San Antonio de Belén y Santo Domingo de Heredia. En este último sector se presenta una capa de cenizas en medio de ambas coladas de lava. Se han determinado afloramientos en La Valencia de Heredia, donde brotan los manantiales de La Libertad.

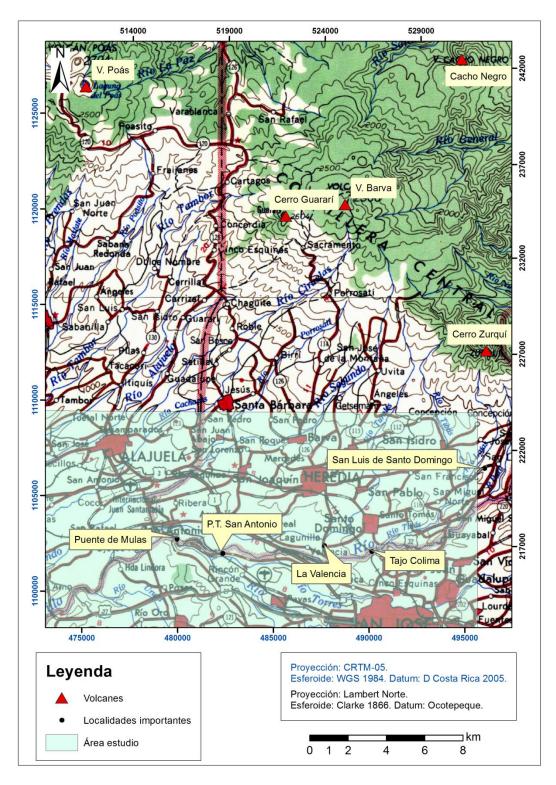


Figura 2.10: Localidades de referencia para el Miembro Linda Vista. Hoja topográfica San José, escala 1:200 000 del IGN, año 1968.

#### 2.7.4 Edad

Pérez et al. (2006) asignan una edad basada en dataciones radiométricas  $Ar^{40}/Ar^{39}$  de 331 ka.

# 2.7.5 Relaciones Estratigráficas

Las lavas de Linda Vista se presentan sobreyacidas por la ignimbrita de Tiribí. Y sobreyacen a Puente de Mulas (Echandi, 1981).

#### 2.7.6 Génesis

Fernández (1969) propone estos materiales como provenientes de la Cordillera Central. Echandi (1981) indica como la fuente de origen a los macizos del volcán Poás, Barva y otros centros de emisión localizados al este del Valle Central.

Kussmaul (1988) indica que la Formación Colima no se originó de los volcanes de la Cordillera Central, sino más bien, desde estructuras fisurales dentro del Valle Central.

### 2.7.7 Antecedentes

Williams (1952) es quien le asigna el nombre Lavas Intracañón, al pensar que estas fueron encauzadas por los valles existentes. Litológicamente las describe como andesitas piroxénicas, algunas de las cuales presentan composición entre andesitas y basaltos.

Echandi (1981) define dos miembros lávicos (aparte del ignimbrítico propuesto por Fernández, 1969) siendo Linda Vista el superior.

#### 2.8 Formación Tiribí

# 2.8.1 Localidad tipo

Pérez (2000) indica que la ignimbrita de Tiribí presenta localidades tipo distintas, según sus facies, particularmente si se presenta la roca soldada o no, siendo estos la casa de máquinas de la Planta Eléctrica Electriona y el tajo La Lindora, respectivamente.

### 2.8.2 Descripción

Pérez (2000) redefine la estratigrafía de la llamada Formación Ignimbrita Tiribí, conformada por dos unidades de flujo y una capa de pómez de caída que sobreyacen a la Formación Colima. La Capa de Pómez Tibás, se localiza bajo la denominada unidad superior, mostrando espesores de 0,5 - 3 m. La unidad de flujo inferior se caracteriza por ser poco extensa, aflorando únicamente en los alrededores de Santa Ana, mientras que la unidad superior cubre todo el Valle Central. Determina también que los miembros de la Formación Tiribí, denominados La Caja (propuesto por Fernández, 1969) y Electriona (Echandi, 1981), en realidad corresponden con facies de la misma unidad; así mismo descarta al miembro Nuestro Amo como parte de Tiribí.

### 2.8.3 Aspectos regionales

Pérez et al. (2006) describen dos facies principales, facies tipo Valle Central y tipo Orotina. La primera corresponde con un *plateau*, que varía de soldado a no soldado, localizado en la cuenca del Valle Central; mientras que la facies Orotina es una roca de densa a parcialmente soldada de color gris a gris azulado, con fragmentos pumíticos amarillo y negro, aflorando principalmente en la cuenca del río Grande de Tárcoles y la planicie de Orotina.

Pérez (2000) indica la presencia de una unidad de flujo basal para Tiribí, y la asocia con algunos afloramientos en el Valle Central, por ejemplo, en el tajo La Lindora. Alvarado & Gans (2012) datan las muestras CR-102 y CR-108, tomadas de la perforación 4 (PV-4) del PH Virilla y del tajo Pedregal (unidad inferior), determinando edades de 505; 480 y 496 ka, respectivamente. Por ello sugieren que la unidad de flujo basal de Pérez (2000) en realidad corresponde con la ignimbrita de Puente de Mulas, que se interpretó erróneamente debido a la carencia de dataciones de la unidad inferior y a la ausencia de capas guía (p.e.: Miembro Linda Vista y Capa de Pómez Tibás) entre ambas ignimbritas.

Según Hannah et al. (2002), las ignimbritas del Valle Central se formaron de dos cuerpos de magma química, mineralógica y térmicamente distintos, uno de bajo sílice y otro de alto sílice. El magma de bajo sílice representa un fluido mantélico que sufrió cristalización fraccionada, creando un rango continuo de 53 a 63% de SiO<sub>2</sub>. El magma de alto sílice representa una fusión parcial de un fundido mantélico previamente emplazado. Sin embargo, con base en los enriquecimientos uniformes en K y la composición isotópica, concluyeron que ambos tipos de magmas están interrelacionados y tienen una fuente común.

#### 2.8.4 Edad

Pérez et al. (2006) le asignan una edad de 322 ka basados en dataciones <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar.

# 2.8.5 Relaciones Estratigráficas

Pérez (2000) la reporta subyaciendo a las lavas de la Formación Barva cuando no están aflorando.

#### 2.8.6 Antecedentes

Las ignimbritas del Valle Central han sido estudiadas por diversos autores (Crosby, 1945; Dengo & Chaverri, 1951; Williams, 1952; Dengo, 1961; Fernández, 1969; Echandi, 1981; Kussmaul, 1988; entre otros). Sin embargo, Pérez (2000) y Pérez et al. (2006) son los estudios más completos y actualizados, ya que cuentan con insumos como dataciones radiométricas y análisis químicos.

#### 2.9 Formación Barva

## 2.9.1 Localidad Tipo

Fernández (1969) propone que esta se ubica al sureste de la localidad de Barva, en la quebrada del mismo nombre.

# 2.9.2 Descripción

Fernández (1969) define esta formación, que comprende los materiales provenientes de las últimas actividades del volcán Barva, indica que en la localidad tipo se muestra como una lava porfirítica, con secciones escoriaceas con núcleo denso, fracturada y con desarrollo de disyunción columnar. ONU (1975) señala que comprende hasta cuatro coladas de lava, densas, bien cristalizadas, masivas y fracturadas, lavas escoríaceas y brechas. Echandi (1981) indica que las diferentes coladas de lava son petrográficamente similares y son difíciles de distinguir.

Protti (1986) propone 6 miembros pertenecientes a esta formación. Tres de ellos son lávicos: Bermúdez, Los Bambinos y Los Ángeles, mientras que los miembros Carbonal, Porrosatí y Cráter, se componen de material piroclástico, correspondiendo Carbonal a una toba lítica, Porrosatí a piroclastos gruesos (arena media-gruesa) intercalados con capas de ceniza, mientras que Cráter se compone de cenizas y piroclastos gruesos, ubicados, como su nombre lo indica en los alrededores del cráter.

Arredondo & Soto (2006) describen al Miembro Los Bambinos como coladas blocosas de aspecto joven, de composición andesitíca, texturalmente porfiríticas con 30-40% de fenocristales, la mayoría de plagioclasa (25-35%), además de piroxenos (<5%) y olivino aislado (~1%), en una matriz intersertal con microlitos y vidrio gris oscuro.

Méndez & Hidalgo (2004) señalan que la presencia de afloramientos ubicados en los alrededores del Aeropuerto Internacional Juan Santamaria, y las localidades de Ciruelas y Cebadilla, los cuales no corresponden con la definición típica de la Formación Barva. Dichos autores indican la existencia de depósitos de *debris avalanche*, en los cuales han encontrado evidencias de bloques de hasta 10-15 m de diámetro, los cuales, de no realizarse un estudio y correlación detallada, podrían interpretarse erróneamente como coladas de lava. Describen esta unidad como un depósito volcaniclástico polimíctico pobremente seleccionado, con diversos grados de meteorización y alteración hidrotermal. Las principales evidencias por las que se asocia esta unidad con un *debris avalanche* son: diferentes grados de alteración, discontinuidad en los paleosuelos y contactos quemados, alteración hidrotermal no in situ y la presencia de *hummocks*. Alvarado et al. (2004) señalan que este evento cuenta con 60 m de espesor.

### 2.9.3 Aspectos regionales

Arredondo & Soto (2006) sugieren la presencia de coladas de lava correlacionables a esta formación en el flanco norte del volcán Barva. Fernández (1969) señala que las unidades informales colada de San Antonio, colada de San Rafael, colada Ciruelas y colada de Cebadilla se asocian a esta formación

## 2.9.4 Edad

Fernández (1969) indica que su edad es Cuaternaria. Denyer & Arias (1991) le asignan finales del Pleistoceno al Holoceno. Arredondo & Soto (2006) asignan al Miembro Bermúdez edad de 270-40 ka, al Miembro Carbonal de 40-27,4 ka, y el Miembro Porrosatí presenta una edad <15 ka. Alvarado & Gans (2012) indican que las lavas asociadas a la Formación Barva corresponderían, al menos parcialmente, al Neo-Barva, cuya edad es de 260-0 ka,

# 2.9.5 Relaciones Estratigráficas

Alvarado & Gans (2012) las clasifican como lavas post-ignimbríticas, que sobreyacen a la Formación Tiribí.

## 2.9.6 Génesis

Fernández (1969) sugiere que estas rocas son el producto del volcán Barva. Protti (1986) indica que las primeras lavas asociadas a esta formación presentan un origen fisural.

#### 2.9.7 Antecedentes

Schaufelberger (1932) es el primero en describir las rocas asociadas a esta formación, específicamente en el sector de San Antonio de Belén, siendo estas mismas descritas por Crosby (1945). Williams (1952) agrupa las lavas que se depositan sobre la ignimbrita Tiribí con el nombre de lavas post-avalancha.

# 2.10 Problemática estratigráfica y litológica

Como parte de la evolución en las diversas investigaciones geocientíficas realizadas previamente en el área de estudio, son evidentes ciertas problemáticas y discrepancias en algunas unidades, las cuales se exponen a continuación.

2.10.1 La problemática en relación a los distintos depósitos de *debris* avalanche en el Valle Central Occidental.

Desde Brenes (1967) hasta Alvarado & Gans (2012) se han hecho una serie de interpretaciones y correlaciones de las unidades de los depósitos de *debris avalanche* del Valle Central Occidental, dándose variaciones en cuanto a la posición estratigráfica y su nomenclatura. De hecho, antes de Pérez (2000) no existía claridad acerca de la génesis de estos depósitos. En la figura 2.11 se esquematiza las diferentes interpretaciones según los principales autores.

Brenes (1967) indica la presencia de lodos tobáceos y lodos tobáceos y lapillíticos, fragmentos líticos que, fueron incorporados durante el transporte. Esta unidad aflora en varios sitios al oeste y suroeste del Valle Central, en la Quebrada Cortezal, en las cercanías del Puente de Piedras Negras, así como, en las cercanías de la planta de La Garita y en la finca El Rodeo. Esta unidad la encuentra sobre rocas sedimentarias antiguas y las lavas intracañón (Colima). Sugiere que fueron formadas por avalanchas calientes, ya que encuentra pómez colapsadas. Dicho autor, describe además, la presencia de una brecha tobácea compuesta por fragmentos de tobas, lavas oscuras, vidrio, así como algunos cantos rodados ígneos y fragmentos escoriáceos, cuyo grado de redondez es variable, siendo angulares, subangulares y subredondeados; las dimensiones máximas de los bloques son de hasta más de medio metro. Sugiere que su génesis corresponde con un evento de avalancha fría. Esta unidad se encuentra sobreyaciendo una ignimbrita, en las cercanías de Tacares.

Posteriormente, Fernández (1969) indica la existencia de avalanchas frías o "tobas caóticas", localizadas principalmente en la zona de Ciruelas y La Guácima, cuya sección tipo se encuentra en la zona de Nuestro Amo, por lo que las denomina con este nombre. Esta unidad se encuentra inmediatamente debajo las lavas de la Formación Barva. Sugiere que esta unidad es parte de la Formación Tiribí. Litológicamente, la describe como una toba con fragmentos de composición heterogénea (lavas, escoria) de granulometría variable, desde redondeados hasta subangulares, soportados en una matriz tobácea y lapillítica, densa, masiva y con algo de arcillificación.

Echandi (1981) es quien señala que las unidades que describen Brenes (1967) y Fernández (1969) son la misma, y conserva el nombre de Nuestro Amo, así como la posición estratigráfica como Miembro de la Formación Tiribí, como señala Fernández (1969). Más adelante, Pérez (2000) excluye a Nuestro Amo como parte de la Formación Tiribí e indica que corresponde a un depósito de *debris avalanche*.

Por otra parte, Méndez & Hidalgo (2004) señalan la presencia de afloramientos ubicados en los alrededores del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, y las localidades de Ciruelas y Cebadilla, que corresponden con depósitos de *debris avalanche*, con bloques de hasta 10-15 m de diámetro, los cuales, de no realizarse un estudio y correlación detallada podrían interpretarse erróneamente como coladas de lava. Litológicamente, corresponde con un depósito volcaniclástico polimíctico pobremente seleccionado, con diversos grados de meteorización y alteración hidrotermal. Las principales evidencias por las que se asocia esta unidad con un *debris avalanche* son: diferentes grados de alteración hidrotermal y meteorización, discontinuidad en los paleosuelos y contactos quemados, alteración hidrotermal no in situ, la presencia de *hummocks*, estructura en mosaico, bloques de lava triturados, mezcla de litologías. Denominan a esta unidad El Coyol, asociándolo a la Formación Barva, aunque en el cuerpo del texto sugieren correlacionarlo con el Paleo-Barva.

Finalmente, Alvarado & Gans (2012) señalan que Nuestro Amo es en parte contemporáneo con las lavas de Belén, ya que observan una mesobrecha, que es intruída por unas lavas datadas en 610-590 ka. Asimismo, sugieren que Nuestro Amo, El Coyol y Tivives son correlacionables espacial y temporalmente. Tanto Alvarado & Gans (2012) como Porras et al. (2012) indican la presencia de varios afloramientos de *debris avalanche* y *debris flow* a lo largo de la Ruta Nacional N.° 27.

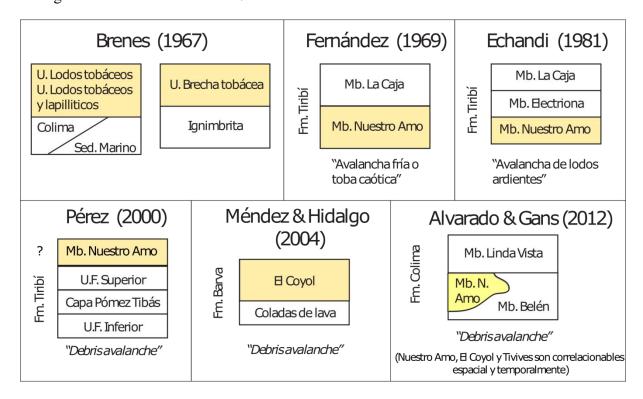


Figura 2.11: Posición estratigráfica, génesis y nomenclatura utilizada según los principales autores de los debris avalanche (en amarillo) del Valle Central Occidental.

2.10.2 La discrepancia entre Echandi (1981) y Kussmaul (1988) respecto a los miembros Linda Vista y Belén.

Estos autores han realizado análisis petrográficos de las lavas de Belén y Linda Vista. Sin embargo, se han encontrado varias divergencias e incongruencias entre estos, por lo que basándose en sus características físicas se dificulta su identificación, especialmente cuando no se encuentra la ignimbrita de Puente Mulas entre ambas lavas.

En el cuadro de 2.3 se detalla la ubicación de cada una de las secciones delgadas, así como de los análisis geoquímicos recolectados, mostrando las unidades con las fueron correlacionadas por cada autor. En la figura 2.12 se muestra la ubicación de las mismas.

Cuadro 2.3: Ubicación de datos petrográficos y geoquímicos recolectados

Referencia	Código	Longitud	Latitud	Correlación	
	EE-1	516150	217400	Puente Mulas	
	EE-25	516250	219130	Barva	
	EE-14	516610	217680	Belén	
	EE-15	516610	217680	Belén	
	EE-16	516610	217680	Belén	
	EE-17	516610	217680	Belén	
	EE-3	512261	216383	Belén	
Echandi (1981)	EE-6	512261	216383	Belén	
	EE-23	529300	214340	Belén	
	EE-2	518980	216972	Linda Vista	
	EE-5	527128	216874	Linda Vista	
	EE-13	516610	217680	Linda Vista	
	EE-8	527128	216874	Linda Vista	
	EE-7	527128	216874	Linda Vista	
	EE-21	529300	214340	Linda Vista	
	COL 5	497058	212718	Belén	
	COL 7	503317	211656	Belén	
Kussmaul	COL 6	507923	212938	Belén	
(1988)	COL 3	513099	215713	Linda Vista	
(1900)	COL 1	527286	216735	Linda Vista	
	COL 2A	527286	216735	Linda Vista	
	COL 8	530149	219037	Linda Vista	
	B-01	516165	217320	Belén	
	B-02	516175	217317	Belén	
	B-03	516232	217264	Belén	
	B-04	516183	217317	Belén	
Bonilla (2012)	E-01	518500	216690	Linda Vista	
	E-02	518510	216680	Linda Vista	
	TM-01	515830	217220	Linda Vista	
	TM-02	515790	217230	Linda Vista	
	TM-03	515800	217120	Linda Vista	

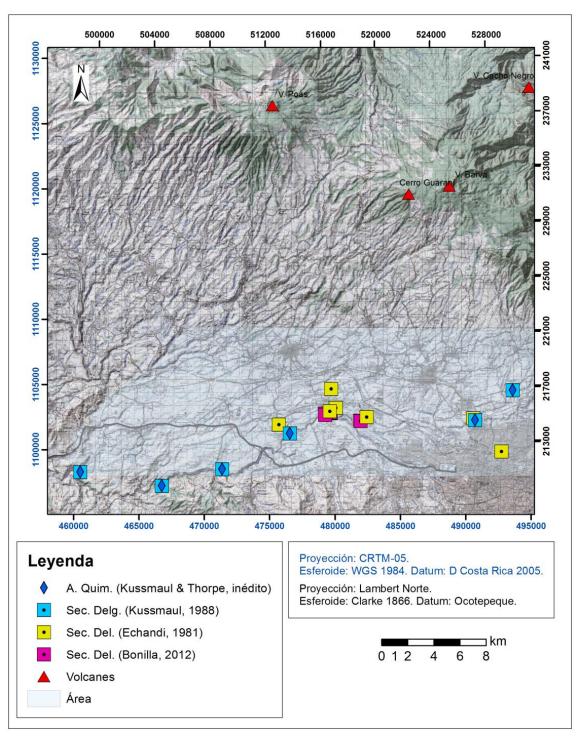


Figura 2.12: Distribución de las secciones delgadas y datos geoquímicos de investigaciones previas.

Son pocas las investigaciones que han ahondado en la descripción petrográfica de los miembros de la Formación Colima, siendo estos, Kussmaul (1988), Kussmaul & Thorpe (inédito), Echandi (1981) y más recientemente Bonilla (2012). En los cuadros 2.4 y 2.5 se

resumen las principales características, en cuanto a la identificación macroscópica y microscópica de Belén y Linda Vista, según los autores mencionados.

Cuadro 2.4: Características macroscópicas y microscópicas del Miembro Belén.

Macroscopía							
Echandi (1981)	Kussmaul (1988) y Kussmaul & Thorpe (inédito)	Bonilla (2012)					
Andesitas piroxénicas, algunas con transición a basalto. Coladas de lava separadas por lentes de tobas, algunas arcillificadas. Contienen mucha plagioclasa y poca augita respecto a Linda Vista. En la localidad tipo es: Afanítica, muy densa, diaclasada, negra. Algunas bastante vidriosas.	Andesitas porfiríticas, afloran hacia el W del Valle Central.	Autobrecha: clastos sub-angulares, coloración morada, textura porfirítica afanítica, con fenocristales de plagioclasa y ferromagnesianos.  Andesita: coloración morada, textura porfirítica afanítica, fenocristales de plagioclasa, escasas vesículas, bandeamiento de ferromagnesianos, textura fluidal.					
E 1 (1001)	Descripción petrográfica Kussmaul (1988) y Kussmaul	D III (2012)					
<b>Echandi (1981)</b>	& Thorpe (inédito)	Bonilla (2012)					
Andesita con augita, andesita porfirítica con augita y olivino, latiandesita afanítica con augita.  El contenido de fenocristales es muy variable (4-55%), constituidos por: plagioclasa 45-96% (An. de 40-73%), clinopiroxenos 4-10%, ortopiroxenos 5%.  La matriz tiene microlitos de: plagioclasa, augita, magnetita, vidrio, hipersteno, olivino.	Andesitas porfiríticas con 2 piroxenos.  Contienen 16-38% de fenocristales constituidos por: plagioclasa 12-30% (An. de 48-75%), clinopiroxenos 1-6%, ortopiroxenos 0,5-3%, olivino 0-5%.  La matriz tiene textura variable: hialopilítica, intersertal e intergranular. Microlitos de plagioclasa, augita, magnetita, vidrio, ocasional hipersteno, cristobalita, hornblenda y hematita.	Andesitas porfiríticas con 2 piroxenos.  Contienen 10-15% de fenocristales constituidos por: plagioclasa 8-12% (An. de 46%), clinopiroxenos 1-2% sanos, ortopiroxenos 1-2% con bordes opacitizados.  La matriz contiene plagioclasa, opacos, óxidos e hidróxidos de hierro y arcillas.					

Cuadro 2.5: Características macroscópicas y microscópicas del Miembro Linda Vista.

Cuadro 2.5: Características macroscopicas y microscopicas del Miembro Linda Vista.  Macroscopía								
Echan Colada Inferior	di (1981) Colada Inferior	Kussmaul (1988) y Kussmaul & Thorpe (inédito)	Bonilla (2012)  Andesita poco vesiculada: textura porfirítica afanítica con fenocristales de plagioclasa, algunas oquedades de plagioclasa están rellenas por secundarios. Andesita: textura porfirítica afanítica con fenocristales de plagioclasa y ferromagnesianos muy alterados.  Andesita bandeada: textura porfirítica afanítica con fenocristales de plagioclasa y textura bandeada por concentración de opacos en forma lenticular y alteración a óxidos de hierro.  Basalto: textura porfirítica afanítica con fenocristales de augita menor a 1 mm, vetas					
Lava porfirítica, muy densa con autobrecha.	Lava densa y afanítica, gris- verdosa, con estructuras de flujo bien desarrolladas, en algunas partes se nota lajeamiento y fracturación.	Andesitas afiricas, contienen máximo 4% de fenocristales.  Afloran hacia el E del Valle Central.						
		Descripción petrográfica	de cuarzo y fracturas rojizas.					
Echan Colada Inferior	di (1981) Colada Superior	Kussmaul (1988) y Kussmaul & Thorpe (inédito)	Bonilla (2012)					
Lava andesítico basáltica con augitas y olivino idingsitizado.  Hipocristalina, hipidiomórfica, porfirítica con matriz intersertal.  Contiene 36-40% de fenocristales, 19-25% de plagioclasa, 10% de augita, 3-4% de olivino automórfico y 1% de magnetita.  La matriz contiene plagioclasa, augita, olivino, magnetita y vidrio.	Latiandesita afanítica con augita y magnetita.  Hipocristalina e hipidiomórfica afanítica, hialopilítica hasta pilotaxítica.  Contiene 3% de fenocristales de plagioclasa y augitas.  La matriz contiene plagioclasa, vidrio, augita, magnetita.	Andesitas afíricas, de 2 a 4 % de fenocristales.  Matriz pilotaxítica, plagioclasa (1,5 a 3%), augita y magnetita, pequeñas cantidades de cristobalita, hornblenda y hematita.	Andesitas porfiríticas con 2 piroxenos.  Contienen 10-15% de fenocristales constituidos por: plagioclasa 8-12% (An. de 46%), clinopiroxenos 1-2% sanos, ortopiroxenos 1-2% con bordes opacitizados.  La matriz contiene plagioclasa, opacos, óxidos – hidróxidos de hierro y arcillas.  Las lavas de Linda Vista se diferencian de Belén porque aunque las dos tienen dos piroxenos, Linda Vista posee mayor densidad de augitas (2-3 %), y un mayor grado de alteración de los hiperstenos (fantasmas). Algunas poseen tendencia a basálticas por fantasmas de olivino.					

Echandi (1981) describe 2 coladas del Miembro Linda Vista, y menciona 4 coladas del Miembro Belén. Si se comparan las descripciones en los cuadros anteriores, se puede observar que, si bien las características petrográficas de las publicaciones mencionadas pueden ser una guía de clasificación de los miembros, también pueden resultar confusas e incluso contradictorias cuando se las compara.

Echandi (1981) propone como localidad tipo del Miembro Belén en la Planta Eléctrica Belén, en la cual describe mediante sección delgada a una lava con apenas 7% de fenocristales. Kussmaul (1988) provee un breve resumen de las características petrográficas de la Fm. Colima, y las clasifica en "Intracañón Superior" e "Intracañón Inferior", basándose principalmente en el porcentaje de fenocristales (identificando "Intracañón Inferior" por su mayor porcentaje); asimismo Alvarado & Gans (2012) mencionan que el vulcanismo de la Paleo-Cordillera Central se caracteriza por lavas muy porfiríticas ricas en fenocristales de plagioclasa.

Kussmaul & Thorpe (inédito) describen en detalle la petrografía, eso sí, sin asociar estas descripciones a los miembros. Las muestras del Miembro Linda Vista en Kussmaul & Thorpe (inédito), corresponden con COL 1, COL 3 y COL 8; mientras que las muestras COL 5, COL 6 y COL 7, son asociadas con el Miembro Belén, dado su mayor abundancia de fenocristales.

En el cuadro 2.6 se observa la gran variabilidad en los porcentajes de cada uno de los componentes de las rocas. A partir de esto, no se encuentra un criterio guía claro, que se pueda seguir para diferenciar en microscopía óptica a los distintos miembros lávicos de la Formación Colima.

Cuadro 2.6: Componentes de las secciones delgadas, según Kussmaul & Thorpe (inédito), Echandi (1981) y Bonilla (2012).

Unidad	Belén			Linda Vista (colada superior)		Linda Vista (colada inferior)		Linda Vista (indiferenciado)		
Autor	Kussmaul & Thorpe (inédito)	Echandi (1981)	Bonilla (2012)	Kussmaul & Thorpe (inédito)	Echandi (1981)	Kussmaul & Thorpe (inédito)	Echandi (1981)	Kussmaul & Thorpe (inédito)	Echandi (1981)	Bonilla (2012)
Muestra	COL 5 COL 6 COL 7	EE-3 EE-6 EE-14 EE-15 EE-16 EE-17 EE-23	B-01 B-02 B-03 B-04	COL 1	EE-5	COL 2A	EE-7 EE-8	COL 3 COL8	EE-2 EE-13 EE-21	E-01 E-02 TM-01 TM-02 TM-03
Fenocristales (F.)	16,8 - 37	0 - 56	10 - 15	2	18	37,3	31 - 32	3,3 - 3,9	5 - 30	10 - 20
F. de Plagioclasa	12,5 - 17	2 - 35	8 - 10	1,5	17	26,4	17	2,3 - 3	3 - 20	7 - 14
Plagioclasa (total)	32,5 - 72	60 - 79		66,5	84	46,4	60 - 62	55,3 - 84,2	62 - 80	
F. de clinopiroxenos	1 - 2,2	2 -16	1 - 2	0,3	1	4,6	10	0,2 - 0,4	2 - 10	2 - 4
F. de ortopiroxenos	0,8 - 1,6	0	1 - 2	0	0	0,9	0	0 - 0,1	0 - 2	1 - 3
Piroxenos (total)	7,5 - 11,6	6 - 22		14,3	6	9,9	15 - 18	4,3 - 15,4	7 - 19	
Olivino	0 - 0,3	0 - 8	_	0	0	4,8	6	0 - 0,2	0	1
Vidrio	0 - 51	0 - 10		0,2	20	35	5 - 10	0,3 - 0,7	7 - 15	

Es importante destacar que la mayoría de las publicaciones relacionadas con la petrografía de las unidades, no contaban con los datos recopilados y suministrados por Alvarado & Gans (2012), los cuales aportan dataciones radiométricas de las lavas, e incluyen muestras de lava que, si bien no están clasificadas formalmente como parte de la Fm. Colima, serían contemporáneas o correlacionables a esta. Es así como Alvarado & Gans (2012) agrupan geocronológicamente junto con las rocas del Miembro Belén, a los cerros de Tacares, a las lavas de Cebadilla y a clastos asociados, en total 10 muestras; les asignan edades de entre 758 y 535 ka. Las dataciones asociadas al Miembro Belén se localizan hacia el oeste de la planta eléctrica homónima.

Por otro lado, 6 muestras de lava pertenecen al Miembro Linda Vista con edad de entre 371 ka y quizás incluso a 290 ka. Estas muestras están restringidas al sector este de la planta eléctrica Belén, en concordancia con Gómez (1987), que señala el mismo límite, determinado por medio del análisis de perforaciones. Aun así, existe una datación anómala, dada su ubicación hacia el oeste, siendo que las lavas de edades similares se ubican hacia el este del Valle Central (muestra CR-039) ubicada en Bolsón de Turrubares, de edad 331 ka, que pudiera correlacionarse con el Miembro Linda Vista.

En la figura 2.13, se muestra que la distribución de las dataciones recopiladas en Alvarado & Gans (2012). Asimismo en el cuadro 2.7 se observa su respectiva descripción.

Cuadro 2.7: Detalle de las dataciones mostradas en la figura 2.10

N.° en mapa	Código	Roca	Edad (ka)	Unidad	Referencia
1	CR94-34	Andesita, autobrecha superior	371	Linda Vista	Marshall, 2000; Marshall et al., 2003.
2	CR94-33	Andesita, autobrecha superior	337	Linda Vista	Marshall, 2000; Marshall et al., 2003.
3	CR-011	Andesita afirica	338	Linda Vista	Pérez et al., 2006.
4	CR-039	Andesita afirica	331	Linda Vista	Pérez et al., 2006.
5	CR-019	Andesita afirica	321-331	Linda Vista	Pérez et al., 2006.
6	BA-100	Lava afanítica gris con estructura de flujo	290	Linda Vista	Soto G.J., 2009

7	CR95-6	Andesita basáltica	758	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Marshall, 2000; Marshall et al., 2003.
8	CR-055C	Bloque de lava infrayaciendo a Tiribí	629	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Alvarado & Gans, 2012.
9	CR-069	Brecha monomíctica de andesitas basálticas	628	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Alvarado & Gans, 2012.
10	CR-219	Basalto olivínico	625	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Alvarado & Gans, 2012.
11	CR-218	Basalto olivínico	622	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Alvarado & Gans, 2012.
12	CR-059	Canto basáltico en aluviones, bajo depósito de flujo de pómez	616	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Alvarado & Gans, 2012.
13	CR-108	Andesita porfirítica	614	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Alvarado & Gans, 2012.
14	CR-103	Andesita porfirítica	594	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Alvarado & Gans, 2012.
15	CR-070	Andesita rica en plagioclasa	535	Cerros de Tacares, Cebadilla, Belén y Clastos asociados	Alvarado & Gans, 2012.

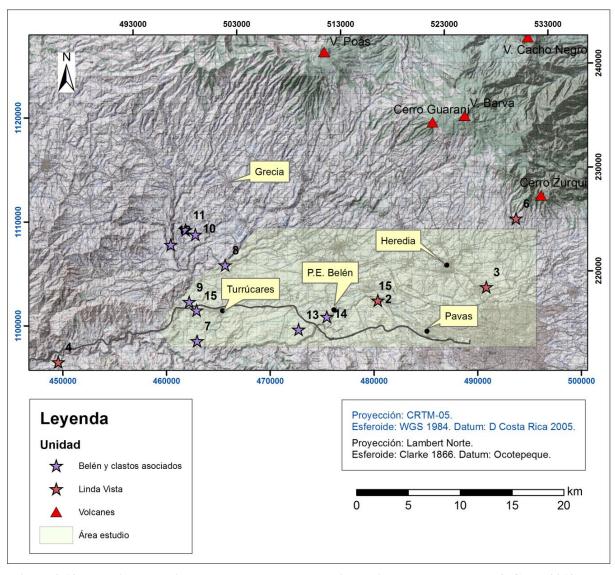


Figura 2.13: Dataciones asociadas a las lavas de Belén y Linda Vista, según Alvarado & Gans (2012). Hojas topográficas Abra, Barva, Poás, Río Grande, Naranjo y Quesada, escala 1:50 000 del IGN, año 1988.

# 2.10.3 Datos geoquímicos asociados

Los únicos análisis químicos disponibles de los miembros lávicos de la Formación Colima se puede hallar en Kussmaul & Thorpe (inédito), en el cuadro 2.8 se observan sus características.

Cuadro 2.8: Características geoquímicas de los miembros Belén y Linda Vista (Kussmaul & Thorpe, inédito).

Muestra	COL 1	COL 2A	COL 3	COL 5	COL 6	COL 7	COL 8
SiO <sub>2</sub>	59,72	54,65	56,51	60,19	59,32	61,03	66,48
TiO <sub>2</sub>	1,04	0,78	1,26	0,98	0,94	0,92	0,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,19	17,09	15,19	15,74	15,56	16,45	15,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,73	8,54	10,67	6,39	6,92	6,99	5,5
MgO	1,39	2,27	1,74	1,12	1,15	1,21	0,69
CaO	4,76	7,98	5,75	4,56	4,75	4,69	1,91
Na <sub>2</sub> O	3,95	2,55	3,14	3,16	3,32	3,81	3,97
K <sub>2</sub> O	3,34	2,14	3,37	3,46	3,43	3,49	4,73
MnO	0,14	0,14	0,15	0,13	0,13	0,13	0,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,56	0,29	0,58	0,39	0,43	0,51	0,17
Total	99,82	96,43	98,36	96,12	95,95	99,23	100,1
	Linda	Linda	Linda				Linda
Interpre-	Vista,	Vista,	Vista,	Belén	Belén	Belén	Vista,
tación	colada	colada	colada	Belell	Delell	Belell	colada
	superior	inferior	superior				superior

Respecto a los aspectos petrográficos y geoquímicos, del total de 7 lavas muestreadas por Kussmaul & Thorpe (inédito) se observa lo siguiente:

- 1. Colima Inferior (Miembro Belén) Muestras COL 5, COL 6, y COL 7
  - Las 3 muestras poseen cantidades similares en la mayoría de sus componentes químicos, excepto en el P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pues la muestra COL 7 tiene mayor porcentaje respecto a las otras 2.
- 2. Colima Superior (Linda Vista) Colada Superior Muestras COL 1, COL 3, COL 8
  - Las muestras COL 1 y COL 3 poseen composiciones químicas muy similares, sin embargo se diferencian de la muestra COL 8, ya que esta última posee: más Si y K, menos Fe y Mg; así como menos, Ca, Mn y P.

¿La muestra COL 8 se relaciona con el Miembro Linda Vista? ¿Es parte de otra colada por su gran diferenciación, o pertenece a otra unidad?

- 3. Colima Superior (Linda Vista) Colada Inferior Muestra COL 2A
  - Respecto a la muestra COL 1, la cual está muy cercana; la muestra COL 2A posee: menos Si y Ti, más Al, Mg y Ca, menos Na, K y P.

En las siguientes figuras se muestran los diagramas de variación K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>, así como el total de alcalí- SiO<sub>2</sub>. Los datos fueron generados por Kussmaul & Thorpe (inédito).

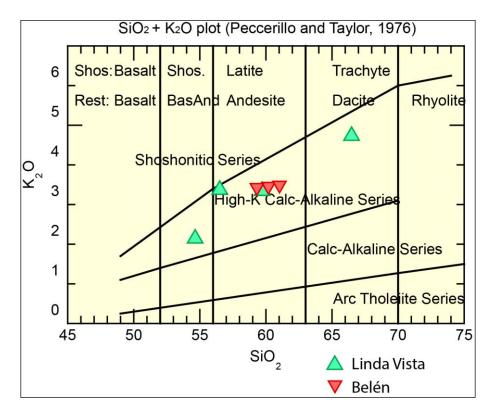


Figura 2.14: Diagrama K2O-SiO2, rocas de Fm. Colima.

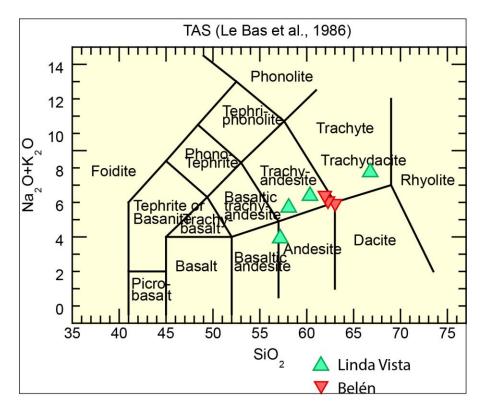


Figura 2.15: Diagrama TAS, rocas de Fm. Colima.

Respecto a los diagramas de variación anteriores, es notable que las lavas varían de basalto andesítico hasta traquidacita, mostrando un patrón en las muestras de Colima Inferior, las cuales se ubican en el límite entre andesita y traquiandesita. En el diagrama TAS se aprecia que todas las rocas de esta Formación son ricas en K.

En la siguiente figura (2.16) se observa el diagrama AFM de las muestras de la Formación Colima, es notable que casi todas ellas muestran tendencia hacia campo toleítico, esto por su enriquecimiento en hierro.

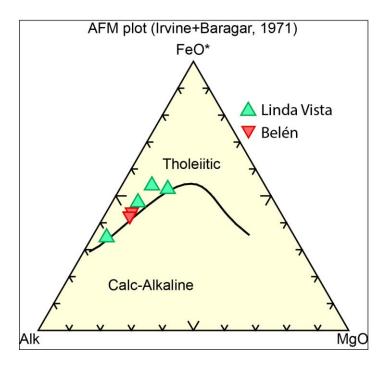


Figura 2.16: Diagrama AFM, rocas de Fm. Colima.

## 2.11 Unidades volcánicas más antiguas que el Miembro Belén en el Valle Central

Alvarado & Gans (2012) agrupan el origen del volcanismo según su rango de edades, limitando la actividad de: la Proto-Cordillera a edades de 1610-850 ka, la Paleo-Cordillera en 740-200 ka, y la Neo-Codillera desde hace 200 ka hasta la actualidad. Identifican y asocian a la Proto-Cordillera a unas lavas en la Estación Biológica La Selva en 1200 ka por datación K/Ar, y mediante dataciones <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, a una colada de lava andesítica en Siquirres de 980 ka, y a otra en Zurquí de 890 ka; asimismo reportan a la Ignimbrita de San Jerónimo al pie del Irazú con una edad de 859 ka (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar).

Por otra parte Schindlbeck et al. (2016) determinan en capas de tefra marinas obtenidas mediante perforaciones, la presencia de hasta once grandes erupciones ignimbríticas asociadas a los complejos volcánicos Proto-Barva y Paleo-Barva en sedimentos marinos del

Pacífico, esto por la firma geoquímica característica "Barva" en elementos mayores y traza; también correlacionan los sedimentos de una ignimbrita antigua de composición dacítica con la Ignimbrita de San Jerónimo.

Todo esto evidencia la existencia de flujos lávicos e ignimbríticos más antiguos que el Miembro Belén, cuya edad más antigua reportada es de 758 ka.

# 3 Análisis de la información de registros de perforación y su correlación con unidades de campo

En este capítulo se expone cómo se manejó la abundante información disponible, así como los resultados previos del análisis realizado en cada una de las perforaciones revisadas y en los afloramientos visitados.

#### 3.1 Metodología del análisis

Como se mencionó en el capítulo 1, la información base del presente estudio fue la obtenida mediante registro de perforaciones, principalmente del SENARA. Posterior a la delimitación del área de trabajo, y luego de excluir de la base de datos las perforaciones que no contaban con registro litológico, se obtuvieron 2583 perforaciones, las cuales se analizaron exhaustivamente descartando un total de 1188 por su pobre información geológica, por la existencia de más de una descripción para una sola perforación, o por el plagio textual evidente de varias de ellas aledañas, lo cual genera desconfianza.

Se obtuvo así un final de 1395 perforaciones, analizando en total 101 169 m lineales, siendo revisadas con detalle una a una, con el fin de identificar y poder correlacionar en cada una de ellas, las unidades volcánicas del Valle Central, inclusive aquellas que no estaban contempladas para los objetivos de este estudio.

En el cuadro 3.1 se observan los insumos utilizados en presente estudio en relación con los anteriores. Es importante hacer hincapié, en que los estudios mencionados no poseen la exactamente la misma área de estudio entre sí, sin embargo sí coinciden al menos en parte.

Cuadro 3.1: Cantidad de perforaciones y afloramientos utilizados previamente para estudios realizados en el área de interés.

Autores	Geología de perforaciones	Afloramientos	
Echandi (1981)	26	16	
Denyer & Arias (1991)	No	?	
Pérez (2000)	20	83	
Presente trabajo	1395	87	

Al finalizar el trabajo de depuración de la base de datos, y para iniciar la clasificación de las unidades en cada perforación, se utilizaron como guía las perforaciones usadas por Echandi (1981) y por Pérez (2000), analizándolas integralmente con la información más reciente, específicamente las dataciones de Alvarado & Gans (2012). Posteriormente, se realizaron varias giras de campo, con el fin de completar toda la información necesaria para construir el modelo geológico para la interpretación final.

#### 3.2 Reinterpretación de pozos guía

Como se mencionó en la sección tras anterior, para llevar a cabo interpretación de cada una de las perforaciones disponibles, fueron substanciales las asociaciones realizadas en Echandi (1981) y Pérez (2000). Por ejemplo, en la figura 3.1 se muestra el mapa de ubicación de un perfil realizado por Pérez (2000) en la margen derecha del río Virilla (figura 3.2), que ha sido reinterpretado (figura 3.3) en el presente trabajo a la luz de las dataciones publicadas por Alvarado & Gans (2012).

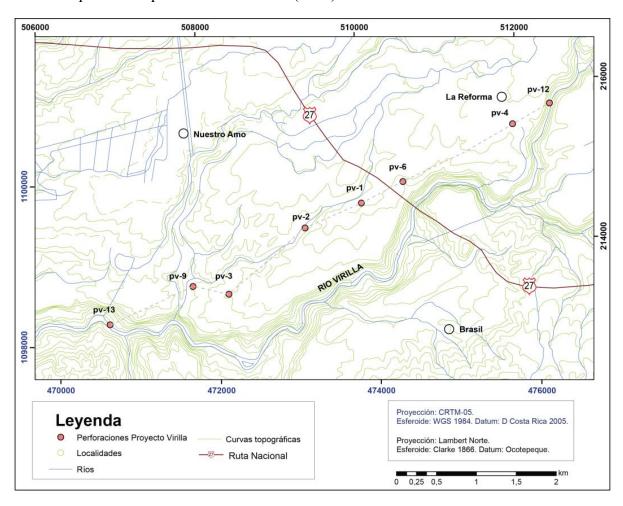


Figura 3.1: Mapa de ubicación de un perfil realizado en Pérez (2000). Hojas topográficas Abra y Río Grande, escala 1: 50 000 del IGN, año 1988.

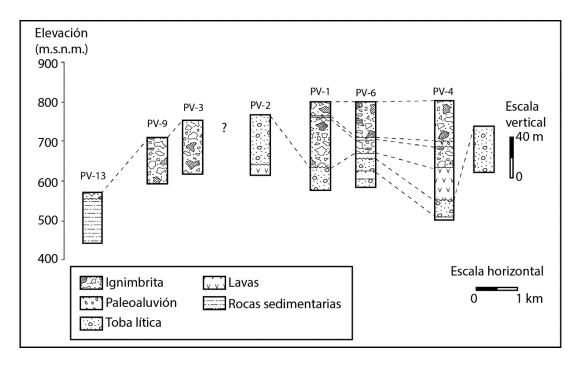


Figura 3.2: Perfil de Pérez (2000)

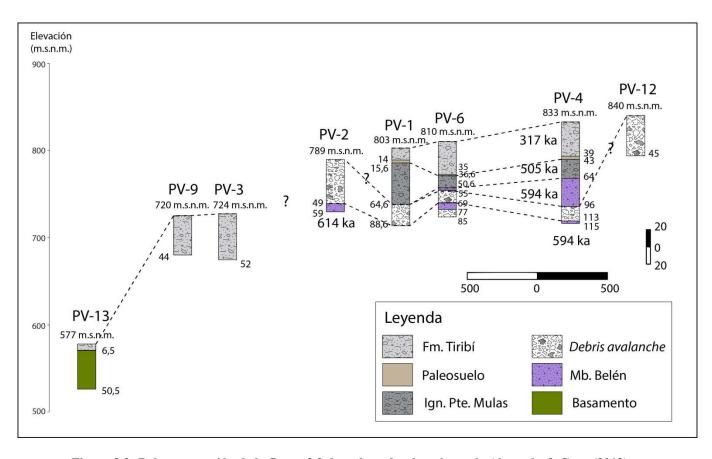


Figura 3.3: Reinterpretación de la figura 3.2, basado en las dataciones de Alvarado & Gans (2012)

Las principales diferencias entre las figuras 3.2 y 3.3, es que en la última se lograron diferenciar las ignimbritas Tiribí (datada en 317 ka <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar) y Puente de Mulas (datada en 505 ka <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar), en las perforaciones PV-4/PV-6 y PV-1; si bien Pérez (2000) reportó un paleosuelo entre las mismas, no tenía en su momento mayor evidencia para asegurar que eran flujos distintos entre sí. Asimismo con base en las edades de las lavas encontradas en las perforaciones PV-2 y PV-4 (614 y 594 ka <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar) se pudo corroborar que el Miembro Belén se muestra en varios flujos lávicos intercalados con varios depósitos de *debris avalanche*.

A continuación en el cuadro 3.2 se muestra la totalidad de perforaciones incluidas en Echandi (1981) y Pérez (2000); en la figura 3.4 se observa su distribución en relación con el área de estudio.

Cuadro 3.2: Ubicación de perforaciones en Echandi (1981) y Pérez (2000), utilizadas como guía en el presente trabajo

te trabajo								
Ec	handi (1981)		Pérez (2000)					
Perforaciones	Longitud	Latitud	Perforaciones	Longitud	Latitud			
AB-454	518600	217850	AB-1133	514750	216300			
AB-471	523950	216050	AB-1157	513800	217000			
AB-490	525300	218300	AB-1165	510825	214900			
AB-500	528350	213600	AB-1722	516420	215210			
AB-505	530350	215250	AB-1776	512375	213300			
AB-520	520689	217387	AB-353	515423	214640			
AB-555	524000	216400	AB-354	515800	214800			
AB-578	524300	216900	AB-708	514100	213050			
AB-635	525900	211600	AB-732	514370	213300			
AB-644	523960	217400	AB-803	514750	213800			
AB-656	525000	217500	AB-875	513900	213350			
AB-667	525220	213180	AB-977	514800	215230			
AB-677	526470	218840	PV-1	510100	214410			
AB-683	531350	214400	PV-12	512450	215680			
AB-711	534921	213776	PV-13	506970	212940			
AB-732	514370	213300	PV-2	509400	214120			
AB-736	516250	219130	PV-3	508390	213270			
AB-738	516610	217680	PV-4	512000	215420			
AB-739	529300	214340	PV-6	510580	214640			
RG-128	507650	215600	PV-9	508000	213430			
BA-88	521400	221300			L			
BA-141	512850	224100						
BA-158	518650	222870						
BA-161	526650	222800						

BA-163

BA-164

522800

516700

222200

222200

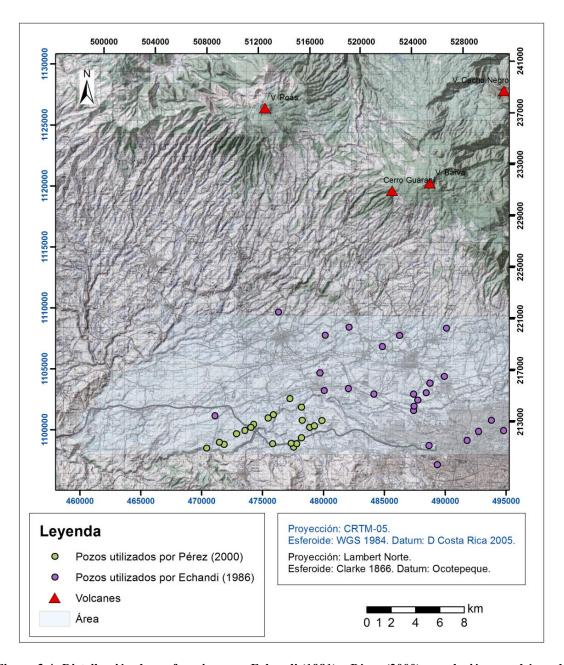


Figura 3.4: Distribución de perforaciones en Echandi (1981) y Pérez (2000) en relación con el área de estudio.

A continuación se muestran 16 de las perforaciones mencionadas en el cuadro 3.2 (AB-353, AB-454, AB-471A, AB-490, AB-500, AB-505, AB-520, AB-555A, AB-578, AB-635, AB-644, AB-656, AB-677, AB-683, AB-732 y AB-736), con base a su relevancia respecto al área de estudio, se observan desde la figura 3.5 a la 3.20, es importante recalcar que ciertas unidades fueron reinterpretadas con base en las dataciones más recientes, sin embargo, en muchas de las ocasiones sí coincidieron las unidades previamente descritas con las identificadas en este trabajo.

En cada una de las perforaciones mencionadas se obtuvo la descripción (primera columna de las figuras de perforaciones) de la base de datos del SENARA, la cual se editó para mejorar su redacción, estilo y nomenclatura. Por otra parte, la columna llamada "Unidad" corresponde específicamente con la interpretación que se da en el presente trabajo. Lo que se describe como "lava compuesta" se define como flujos lávicos que varían de masivos a brechosos, encontrándose intercalados entre sí.

#### POZO AB-353 Sta. Ana

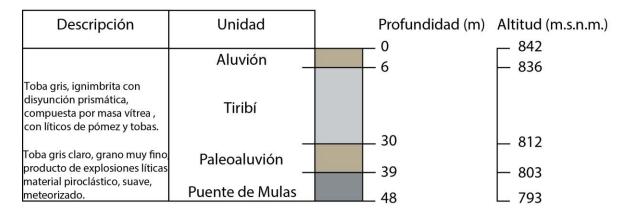


Figura 3.5: Perforación de SENARA AB-353

### POZO AB-454 Cariari

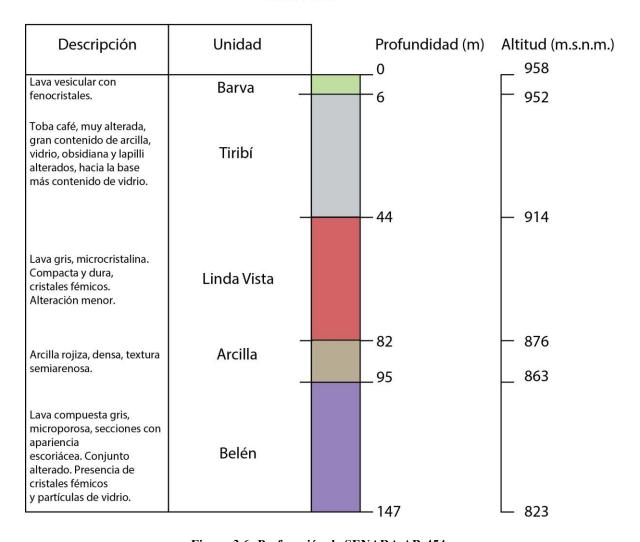


Figura 3.6: Perforación de SENARA AB-454.

### POZO AB-471A Sta. Rosa

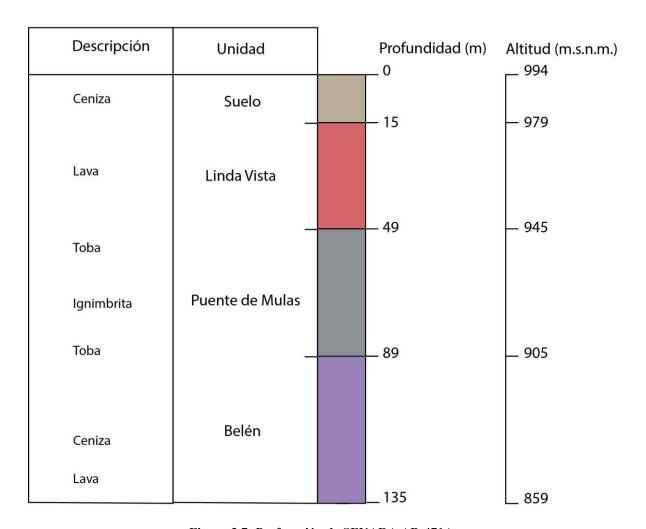


Figura 3.7: Perforación de SENARA AB-471A.

#### POZO AB-490 Sta. Rosa

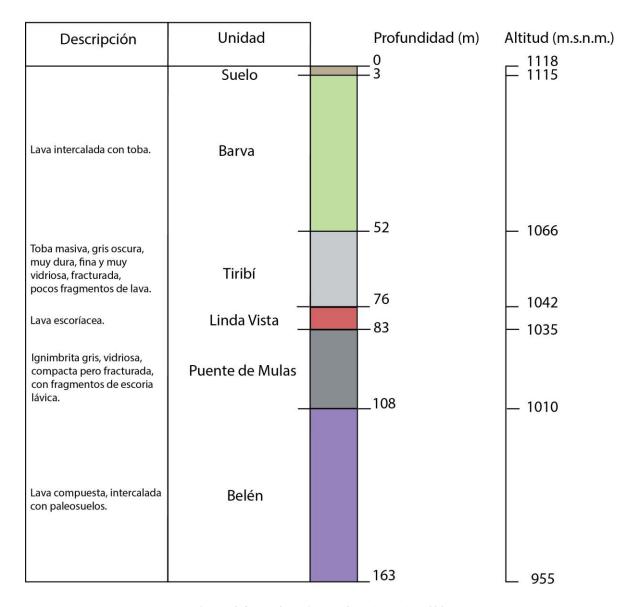


Figura 3.8: Perforación de SENARA AB-490.

#### POZO AB-500 Parque Bolívar

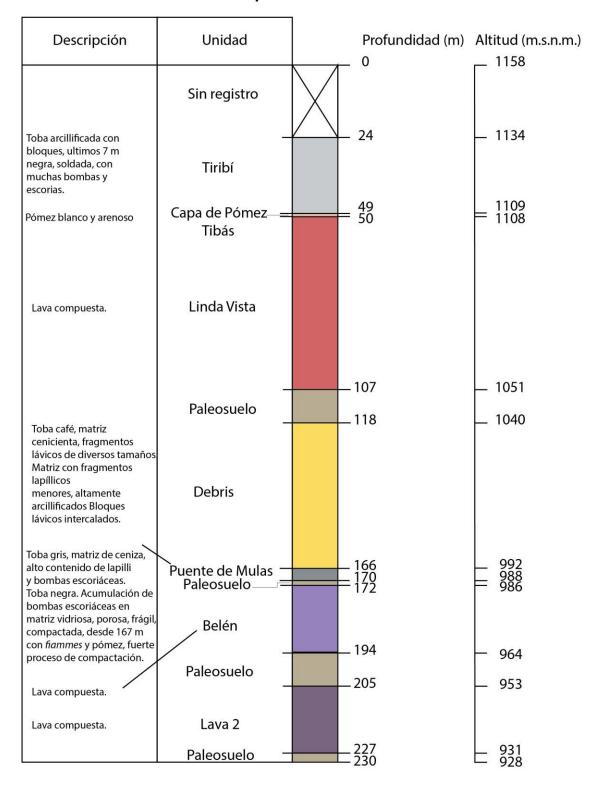


Figura 3.9: Perforación de SENARA AB-500.

#### POZO AB-505 Guadalupe

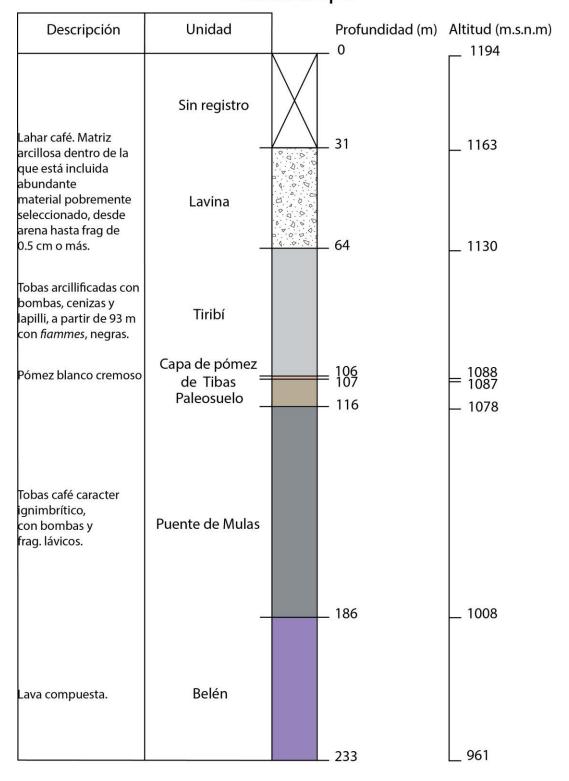


Figura 3.10: Perforación de SENARA AB-505.

#### POZO AB-520 Barreal

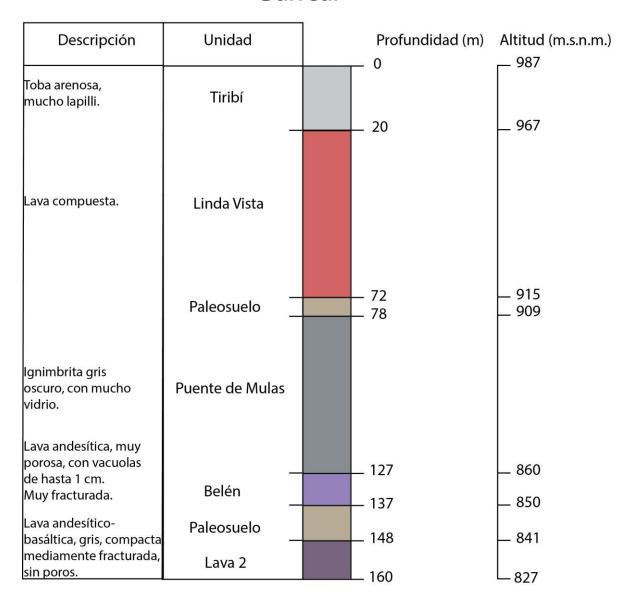


Figura 3.11: Perforación de SENARA AB-520.

### POZO AB-555A Jardines del Recuerdo

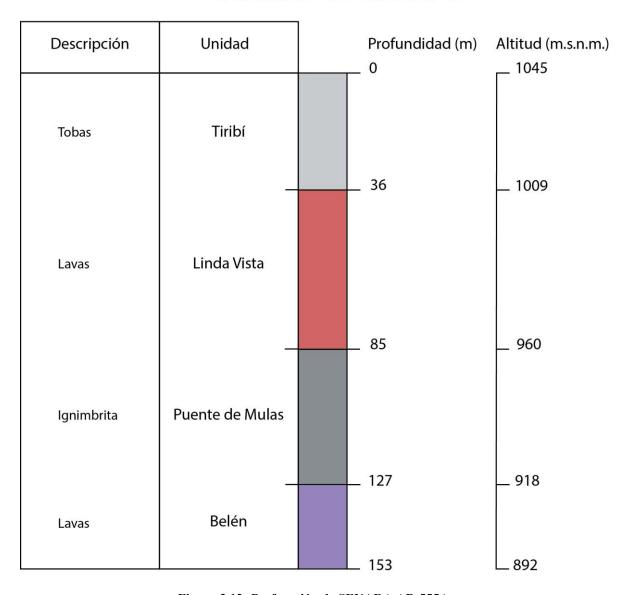


Figura 3.12: Perforación de SENARA AB-555A.

#### POZO AB-578 Sta. Rosa

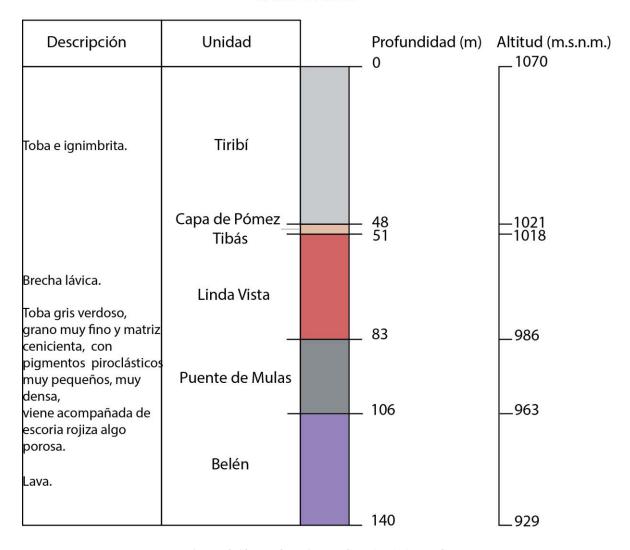


Figura 3.13: Perforación de SENARA AB-578.

#### POZO AB-635 Hatillo

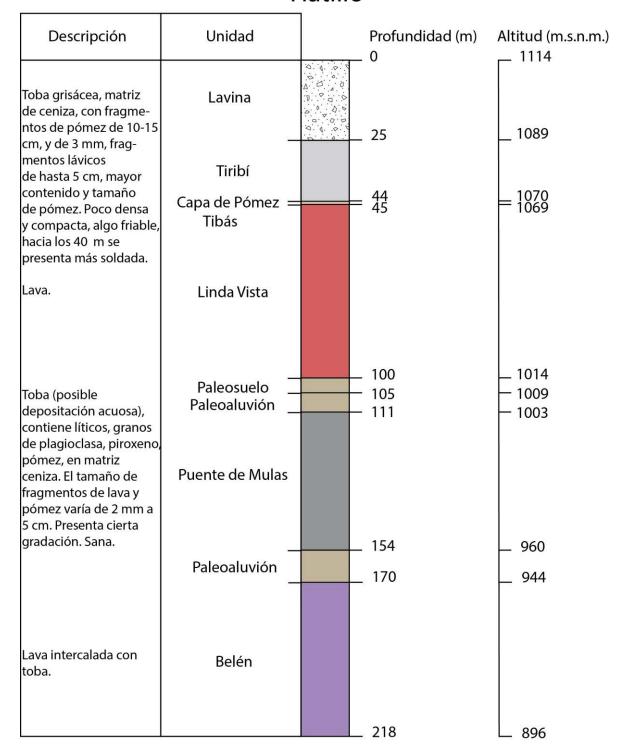


Figura 3.14: Perforación de SENARA AB-635.

#### POZO AB-644 Atlas

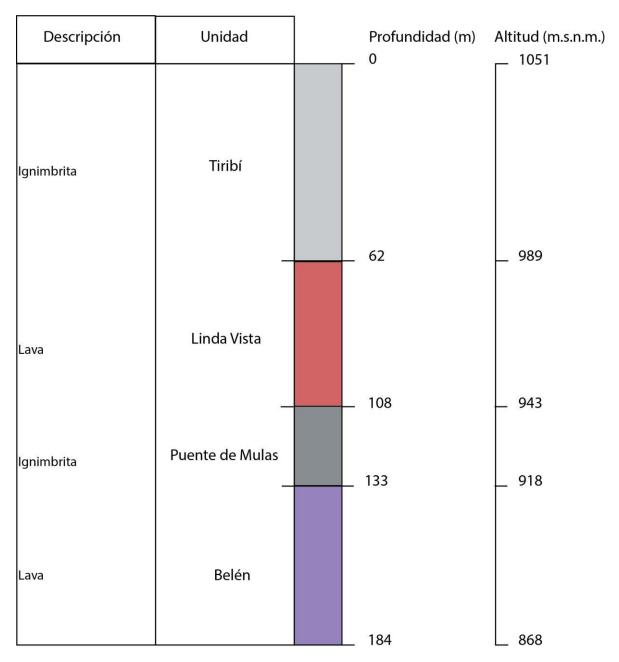


Figura 3.15: Perforación de SENARA AB-644.

#### POZO AB-656 Sta. Rosa

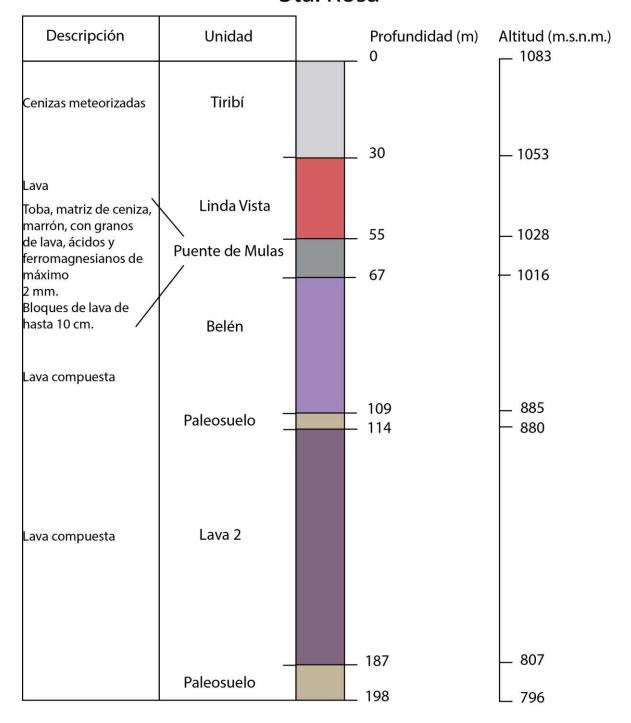


Figura 3.16: Perforación de SENARA AB-656.

### POZO AB-677 Sto. Domingo

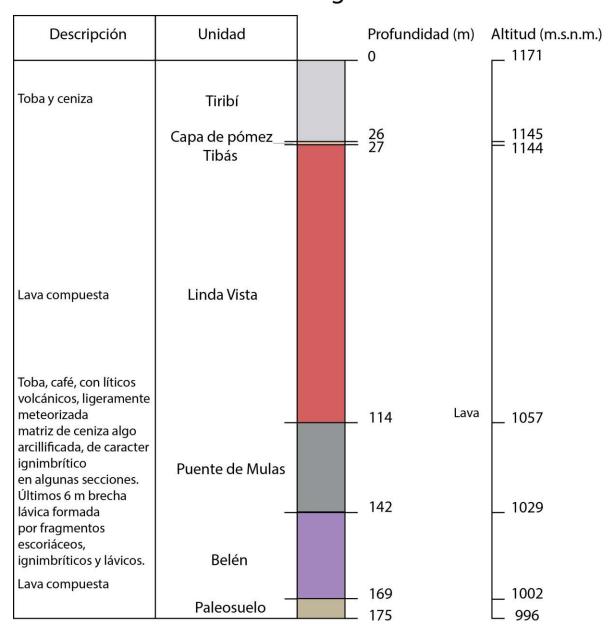


Figura 3.17: Perforación de SENARA AB-677.

#### POZO AB-683 Montes de Oca

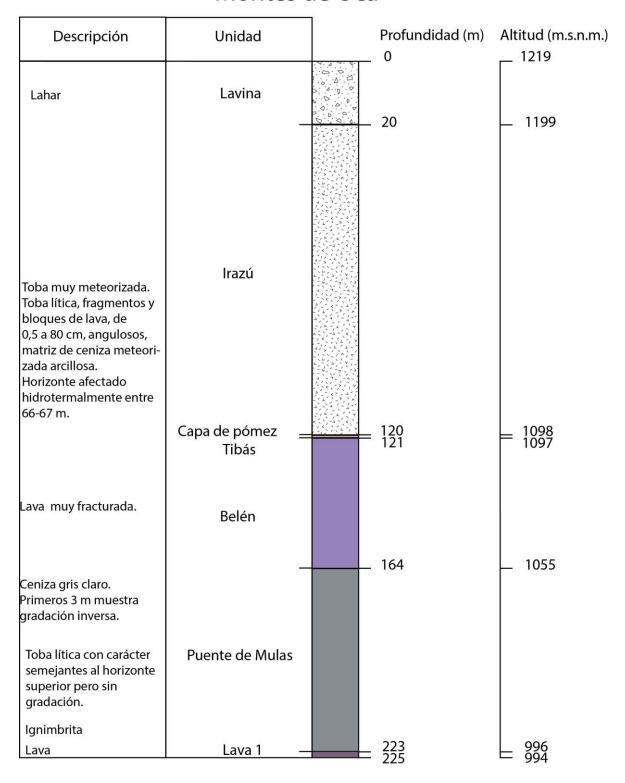


Figura 3.18: Perforación de SENARA AB-683.

### POZO AB-732 Sta. Ana

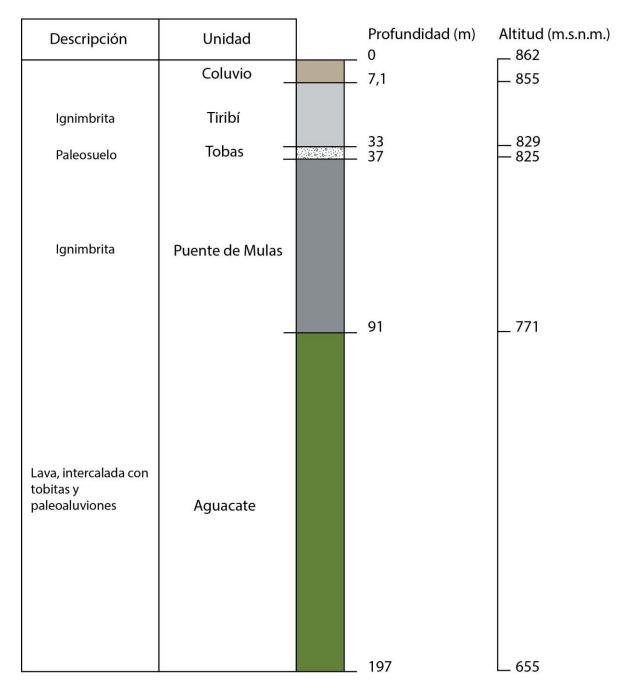


Figura 3.19: Perforación de SENARA AB-732.

### POZO AB-736 Rivera de Belén

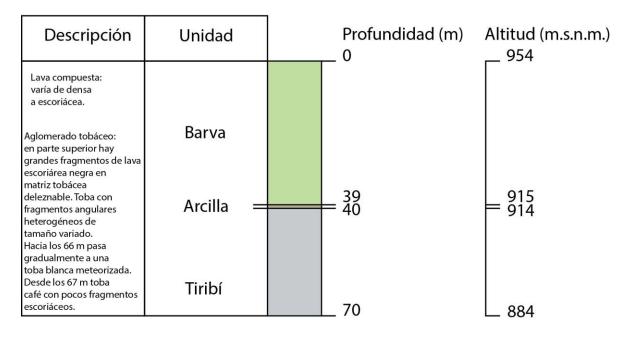


Figura 3.20: Perforación de SENARA AB-736.

Como se pudo observar en las figuras anteriores, la correlación entre los techos de la unidades volcánicas, puede ser una tarea algo confusa, porque las descripciones pueden ser muy diferentes entre sí, dado los cambios de facies que se encuentran a lo largo de área, o debido a las descripciones escuetas; la labor se vuelve un poco más ardua cuando no se reportan capas guía fundamentales como la Capa de Pómez Tibás o los paleosuelos separando las unidades más potentes de lavas e ignimbritas.

Los registros de perforación del SENARA cuentan con un expediente donde se incluye la descripción realizada al pie de la perforación y la interpretación posterior a esta. Es una práctica común que sean distintas personas las que hagan estas dos descripciones. Por ello, es común encontrar divergencias en los registros de perforación. Además, se han identificado abundantes interpretaciones erróneas en dichos registros, se ejemplifica el caso de una perforación cuyo código se reserva, dónde se asocia erróneamente a la Formación Tiribí, unidades como lahares, lavas y tobas, con un total de 55 m de espesor.

#### 3.3 Afloramientos de unidades de interés y localidades de referencia.

A continuación se exponen las unidades que son objeto de investigación en el presente estudio, así como otras que se visitaron a lo largo de la investigación.

En la figura 3.21 se muestran los sitios visitados durante el presente trabajo. En la figura 3.22 se observa la distribución de muestras recolectadas para el análisis petrográfico.

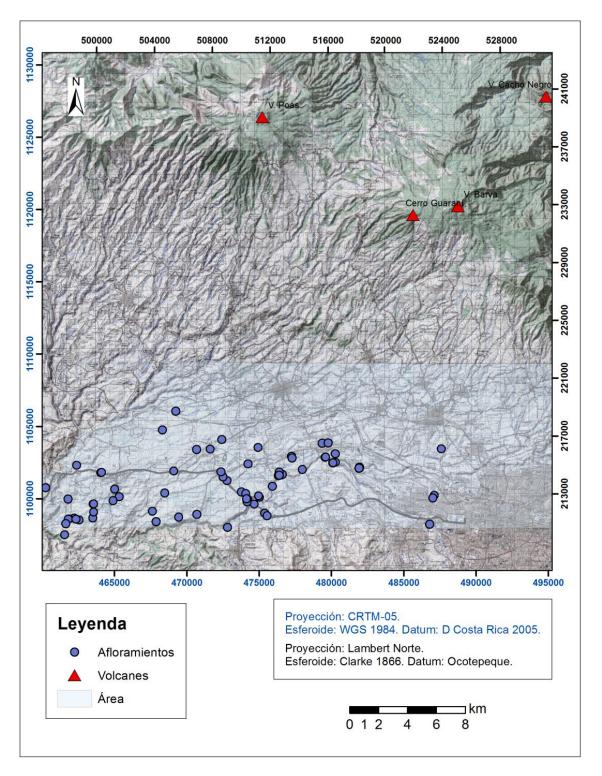


Figura 3.21: Ubicación de afloramientos visitados

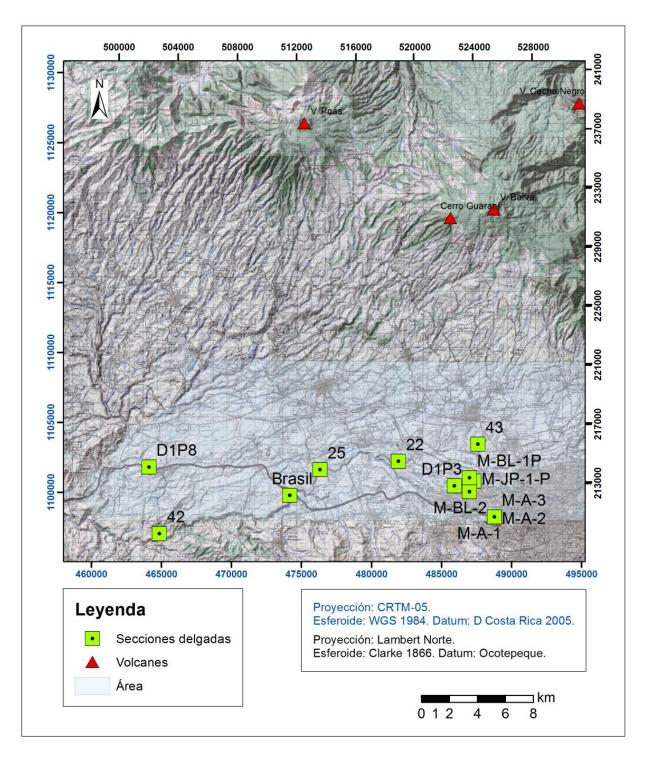


Figura 3.22: Ubicación de muestras para secciones delgadas.

#### 3.3.1 Hipoabisal de Piedras Negras ¿Fuente de las lavas de Belén?

Como se mencionó en el capítulo anterior, Kussmaul (1988) propone que las fisuras que generaron las lavas de Colima se ubican: en Piedras Negras y en las cercanías de La Reforma. En el presente estudio se visitó uno de los lugares propuestos por el autor, en puente de la localidad de Piedras Negras, hacia el Sur de Turrúcares (510 578 E/213890 N LN).

En dicho puente se observó el denominado "dique de Piedras Negras" que en realidad corresponde con un sill (figura 3.23), ya que aprovecha el buzamiento de las rocas de la Formación Peña Negra para intruirlas. Se midió el contacto superior e inferior: N88°W/27° y N60°W/26°, respectivamente. El sill muestra composición muy variable a lo largo del afloramiento, principalmente gabros y en menor medida diabasas (Kussmaul, 1988); estas últimas se encuentran a lo largo de las diaclasas principales (de orientación 120,54 NE), se muestran rellenas de calcita. Respecto a estas diaclasas el intrusivo presenta un color rosado, posiblemente debido a la alteración hidrotermal. Diaclasas de menor dimensión, pero siempre pervasivas, presenta rumbo 10°, 86° E y 350°, 52° SE, afectando únicamente a las rocas de la Formación Peña Negra.



Figura 3.23: Diaclasas afectando únicamente a la Formación Peña Negra. Nótese que el contacto entre Peña Negra y el intrusivo es controlado por la dirección de buzamiento de las primeras.

Si bien Kussmaul (1988) indica que este sill, sería uno de los sitios desde donde se emitieron las rocas de la Formación Colima, se desconoce la edad de dicha intrusión, ya que únicamente se sabe que afecta rocas de la Formación Peña Negra, del Mioceno-medio y no se tienen evidencias de que intruya rocas más jóvenes. Esto, aunado al hecho de que el intrusivo se encuentra sumamente alterado a clorita y con vetas de calcita, lo cual dificulta su datación. En el presente estudio se descarta la posibilidad de que sea contemporáneo a Colima, y más bien se le relaciona con el Grupo Aguacate, unidad de la cual se tiene registro en las cercanías. Por ejemplo, Denyer & Arias (1991) lo reportan aflorando ampliamente 2 km al norte del mencionado puente, además muestra un alto de piroxenos (15%) en comparación con las lavas de Belén (5 a 10%). Se realizó una sección delgada (Muestra 42), clasificándose la roca como una diabasa, holocristalina porfirítica con textura subofítica, es evidente la alteración a clorita. En la figura 3.24 se muestran la caracterización de este afloramiento.



Figura 3.24: Sill (diabasa) de Piedras Negras (coordenadas 510 578 E/213890 N LN).

Por otra parte, existe un afloramiento bastante meteorizado en Rohrmoser (522 474 E/ 214 935 N LN), en un parque público donde se encuentran unos bloques métricos de lava (Muestra D1 P3), en la sección delgada se clasifica como andesita con un piroxeno (figura 3.25), muestra ceolitas rellenando vesículas, y presenta plagioclasa con texura cribosa. Dichos bloques no se correlacionan con las lavas de Linda Vista; se sugiere que pueden corresponder con las fases volcánicas de Pacacua, puesto que la elevación del afloramiento coincide con la de los techos de las lavas de perforaciones que en el área circundante son correlacionables con la Formación Pacacua, asimismo se encuentra cerca de los afloramientos de rocas sedimentarias en las colindancias del aeropuerto Tobías Bolaños.



Figura 3.25: Andesita con augita en parque al sur del boulevard Ernesto Rohrmoser.

De hecho, a lo largo del Valle Central se cuenta con altos y bajos topográficos originados previamente a la depositación de las unidades de interés. Entre estos se identifican el cerro Palomas (Alto de las Palomas) en Santa Ana, el cual está compuesto por rocas sedimentarias de la Formación Pacacua. Así mismo, los Montes del Aguacate, al oeste del Valle Central, correspondientes con el vulcanismo del Grupo Aguacate, que actualmente es atravesado en algunos sectores por la Ruta Nacional N.º27. Dichos altos topográficos fueron (y siguen siendo) barreras para la depositación de rocas más jóvenes, principalmente aquellas cuya depositación se realiza por medio de flujos (lahares, debris avalanche, ignimbritas y coladas de lava).

#### 3.3.2 Lavas Belén

Se observaron afloramientos de las lavas de Belén en siete distintas localidades: en Sitio Presa Belén (516 156E/ 217 341N LN), Planta Eléctrica Belén (512 875E/ 216 079N LN), Tajo La Lindora (512 456E/ 215 316N LN), Sitio Presa Brasil (511 565E/ 214 560N LN), Planta Eléctrica Brasil (510 687E/ 214 458 LN), Ruta Nacional N.°27 al oeste de la ciudad de Turrúcares (500 658E/ 216 259 LN) y en Cebadilla (498 357E/ 213 032N LN). Estos últimos dos constituyen nuevos afloramientos asociados a estas lavas.

Se presentan distintas facies en los afloramientos, por lo que no es posible definir una característica macroscópica típica que se pueda asociar a Belén. Sin embargo, es factible correlacionarla con la lava datada en 614 ka en la perforación PV-2 por Alvarado & Gans (2012), la cual aflora en el cauce del río Virilla: desde Planta Eléctrica Brasil, pasando por el puente de la Ruta Nacional N.º 27 y hasta el Sitio Presa Belén. Mientras que la muestra datada en 594 ka por Alvarado & Gans (2012) en la perforación PV-4, se puede correlacionar con la que aflora en la localidad tipo, la Planta Eléctrica Belén, esto por la similar elevación de sus techos. Por lo tanto los dos flujos lávicos asociados a Belén en las cercanías de La Reforma tienen 20 ka de diferencia.

Tanto en el Sitio Presa Belén como en Planta Eléctrica Belén, la lava se muestra aflorando en la base del río Virilla, cuyo techo está definido por una autobrecha lávica (figura 3.26), siendo la lava afanítica, color gris oscuro, con cristales de piroxenos menores a 1 cm, de forma tabular (Muestra 25).

En lámina delgada se describe como una andesita hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y dos piroxenos; matriz hiaolopilítica con microlitos de feldespato, piroxenos y opacos.

En la Planta Eléctrica Belén no fue posible visualizar el contacto superior, pero se sabe por registros de perforación cercanos, que la sobreyace la Ignimbrita Puente de Mulas, se observa también el contacto en las márgenes del río Virilla. Mientras que en el Sitio Presa Belén si se observó a dicha ignimbrita sobre la lava.



Figura 3.26: Autobrecha al costado de Planta Eléctrica Belén y sección delgada.

En el tajo La Lindora (figura 3.27) también fue posible observar la autobrecha lávica superior, sobreyacida por un paleosuelo de ~5 m máximo de espesor. La lava de Belén en este sitio se presenta de color gris oscuro, afanítica, sana, con incipiente diaclasado circular

y presencia de vesículas y en tramos buzando hacia el noreste. La lava se ubica en la base de la explotación y posee un espesor visible de 10 m.

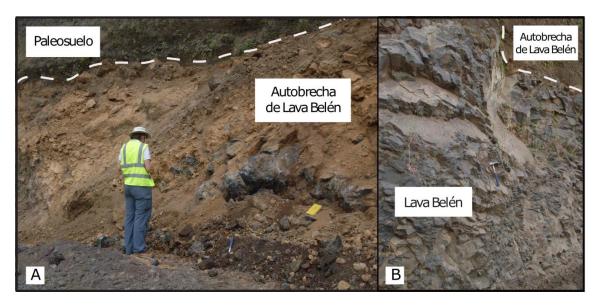


Figura 3.27: A. Contacto de Belén con paleosuelo sup. B. Contacto de autobrecha con parte masiva, tajo La Lindora.

Desde el Sitio Presa Brasil, pasando por el puente de la Ruta Nacional N.º 27, sobre el río Virilla y hasta la Planta Eléctrica Brasil (1,5 km de longitud) la lava Belén se caracteriza por mostrar una textura afanítica-porfirítica con un 20% de fenocristales. Se observaron muy densas y sanas, presentan un color gris, levemente morado, con fenocristales de plagioclasa, piroxenos, así como vesículas milimétricas.

En la margen izquierda del río Virilla, aguas arriba de la Planta Eléctrica Brasil, se observan 3 coladas de lava claramente diferenciadas. El nivel inferior se muestra una brecha lávica rojiza, de espesor máximo de 2 m, seguido de una lava masiva de 2 m de espesor, cubierta por otra sección brechosa de 1 m de espesor, otra sección masiva de 3 m con 5 metros de sección brechosa al techo y la colada superior muestra un espesor mínimo de 25 m.

Justo bajo el puente del río Virilla de la Ruta Nacional N.º 27, se ubican dos coladas de lava con diaclasado métrico de forma circular o semicircular, separando dichas coladas se muestra una sección brechosa. Así mismo, tanto en el margen derecho frente a la Planta Brasil como aguas abajo de la Presa Brasil se observan lavas con ese característico diacalasado circular. En el caso de la figura 3.28 se observa el contacto lateral con depósitos asociados al basamento sedimentario sobre la que se emplazó la lava de Belén.



Figura 3.28: Lava de Belén emplazada sobre el basamento sedimentario.

En sección delgada (Muestra: Brasil) se aprecia como una andesita con textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y dos piroxenos; matriz intergranular con microlitos de feldespato, piroxenos, vidrio y opacos. Se observan algunos agregados glomeroporfiríticos (figura 3.29). Algunos fenocristales de feldespato muestran zonación, lo cual podría reflejar variaciones en la serie albita-anortita cuando este magma se encontraba en la cámara magmática.



Figura 3.29: A: Lámina delgada "Brasil". B: Lava en Planta Eléctrica Brasil

Con base en lo expuesto anteriormente se concluye que las lavas de las secciones delgadas "25" (fig.3.26) y "Brasil" (fig.3.29), tienen 20 ka de diferencia y que corresponden a las datadas por Alvarado & Gans (2012) en 594 y 614 ka, respectivamente, mostrando ambas secciones delgadas idénticas composiciones y texturas.

Sobre la Ruta Nacional N.° 27, 2 km al oeste de Turrúcares, aflora una lava, con unos 2 m de espesor visible, color gris con vesículas, en contacto lateral con un depósito de *debris avalanche*, que al parecer correspondería con El Coyol, esto debido la presencia del mismo en perforaciones cercanas. Es posible que esta lava se correlacione con alguna de las lavas datadas por Alvarado & Gans (2012) en Cebadilla de Turrúcares, cuyas edades abarcan desde 758 hasta 535 ka. No se tiene criterio estratigráfico alguno para predecir a cuál correspondería, pero sí se le correlaciona con Belén debido a una datación (muestra CR95-6). La muestra "D1P8" corresponde con una andesita con dos piroxenos con textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y dos piroxenos; matriz intersertal con microlitos de feldespato, piroxenos y opacos. Se observan algunos agregados glomeroporfiríticos de feldespato y piroxeno, en la lámina delgada se observan también cristales de hipersteno con bordes e inclusiones de augita

dentro de los mismos, lo que podría evidenciar un desequilibrio en la cámara magmática, por la inyección de magma con diferente composición al inicial (figura 3.30).

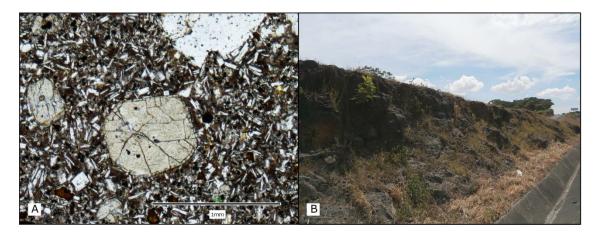


Figura 3.30: A. Lámina delgada "D1P8" (nótese la corona de augita alrededor del cristal de hipersteno). B. Lava en Turrúcares, hacia el norte de la Ruta Nacional N.º 27.

#### 3.3.3 Ignimbrita Puente Mulas

Desde que Fernández (1969) identifica esta unidad, se ha restringido la definición de la Ignimbrita de Puente de Mulas a la facies que se presenta en la localidad tipo, esto es, una ignimbrita color negro, muy dura, con disyunción columnar, que contiene abundancia de vidrio colapsado y escorias con diámetros centimétricos. No obstante, esta unidad se caracteriza por su heterogeneidad litológica, tanto en las perforaciones como en los pocos sitios en donde aflora; por ejemplo en el registro de perforaciones, se le define, desde una toba sana (con gradación que contiene líticos, vidrio y pómez de 2 mm a 5 cm  $\Phi$ , inmersos en matriz de ceniza), hasta una toba (color gris con abundancia de bombas y lapilli), y al igual que en su localidad tipo, como una toba soldada (color gris oscuro, contiene cenizas cementadas con vidrio negro, fragmentos de lava y vidrio).

La manera de identificar a esta ignimbrita en las perforaciones ha sido su ubicación entre los dos miembros lávicos de la Formación Colima. Sin embargo, puesto que la lava de Linda Vista está restringida en un área menor que la ocupada por la Ignimbrita de Puente de Mulas, y aunado al hecho de que la Ignimbrita Tiribí sobreyace a toda la secuencia anterior; como consecuencia, en el área en donde no se emplazó la lava de Linda Vista, se ubican los dos flujos de ignimbritas (Tiribí y Puente de Mulas), sin más separación que un paleosuelo o en pocas ocasiones la Capa de Pómez Tibás, por lo que, tanto en publicaciones anteriores como en registros de perforación, la ignimbrita se ha clasificado como Tiribí, dejando de lado la presencia de Puente de Mulas.

Esto hace imposible distinguir las diferentes unidades de flujos de ignimbritas entre sí cuando no se reporta en el registro de perforación algo similar a un paleosuelo, a pesar de que se infiere la presencia de varios flujos ignimbríticos por el espesor anómalo reportado.

En el área de estudio, los pocos afloramientos de las distintas facies de la Ignimbrita Puente Mulas se observan principalmente en las cercanías del cañón del río Virilla. Se descarta que el afloramiento reportado por Porras et al. (2012) en la Ruta Nacional N.º 27 en las cercanías de Turrúcares corresponda con la ignimbrita de Puente de Mulas sobreyaciendo al depósito de *debris avalanche* de Nuestro Amo. Sin embargo, luego del análisis de las perforaciones cercanas se les correlaciona con el flujo ignimbrítico que subyace a la lava de Belén, y con un depósito de *debris avalanche* posiblemente del Grupo Aguacate, respectivamente; esto porque no se observa en perforaciones cercanas la presencia de la Ignimbrita Puente de Mulas, y es la unidad de *debris avalanche* El Coyol, la que se encuentra sobreyaciendo a toda la secuencia en el área cercana.

Los pocos lugares con afloramientos de la Ignimbrita Puente de Mulas, se encuentran a lo largo del río Virilla, tanto en su cauce como en tajos cercanos, así como en las cercanías del peaje de Ciudad Colón en la Ruta Nacional N.º 27.

En las cercanías de la Planta Eléctrica Electriona (516 655E/ 216 942N LN), en la confluencia de los ríos Torres y Virilla, en la base del cauce de este último río, aflora la ignimbrita sana, color gris, con disyunción columnar (figura 3.31) de diámetros centimétricos hasta casi métricos, con *fiammes* y litofisas (10 cm x 2 cm), la facies soldada tiene un espesor visible de ~15 m; sin embargo, si se toman en cuenta las facies menos consolidadas y más tobáceas y lapilíticas que la sobreyacen aguas arriba, el espesor total en ese sector sería de ~70 m.



Figura 3.31: Base de la Ignimbrita Puente Mulas en el río Virilla

Estas facies menos consolidadas, se caracterizan por presentar un alto grado de meteorización, con una facies blocosa de matriz lapillítica la cual contiene bloques de lavas y escorias de diámetros centimétricos con estructuras de flujo, también se presenta una facies más tobácea. Esta pauta en la distribución espacial de esta ignimbrita, en donde las facies más soldadas afloran en el cauce y las menos consolidadas se encuentran hacia los márgenes, se observa también en la localidad tipo de la Ignimbrita Puente de Mulas, en el Sitio de Presa Belén, en donde se ubica el puente que le dio el nombre a la Ignimbrita.

La ignimbrita se presenta en una facies con matriz tobácea, sumamente soldada la cual contiene bloques polimícticos de subangulares a subredondeados de ~30 cm de diámetro. Así como bloques con disyunción columnar de dimensiones centimétricas.

La Ignimbrita Puente de Mulas se encuentra sobreyacida por la Ignimbrita Tiribí, en varios lugares: en las márgenes del río Virilla a la altura de la Planta Eléctrica Belén, en el tajo La Lindora ubicado hacia la margen izquierda del río Virilla, así como en las cercanías del peaje de Ciudad Colón. Las lavas de Linda Vista no se emplazaron en esta área, por lo que la separación entre ellas se evidencia mediante paleosuelos o la capa de pómez basal de Tiribí. Dicha aseveración se hace luego de analizar y comparar la elevación de los techos de

cada unidad en los registros de perforación cercanos con las elevaciones de los afloramientos.

En la margen derecha del río Virilla, camino hacia la Planta Eléctrica Belén (512 932E/ 216 298N LN) se observa una facie tobácea correlacionable con Puente de Mulas (figura 3.32), consiste en una toba café meteorizada con pómez de tamaño milimétrico, que contiene líticos subangulares de lava de hasta 50 cm de diámetro; no se observaron *fiammes*. Sobre esta se encuentra un paleosuelo café rojizo arcilloso de espesor variable ~50 cm a 60 cm; a su vez este paleosuelo es sobreyacido por una ignimbrita gris, dura, densa, que contiene pómez de colores blanco, gris y amarillo, así como *fiammes* de 20 cm Φ; el contacto entre el paleosuelo y la ignimbrita de Tiribí, posee un desarrollo columnar leve, como paralelepípedos rectangulares.



Figura 3.32: A. Paleosuelo, separando a las unidades Tiribí y Puente Mulas. B. Detalle de paleosuelo.

Entre tanto, en la margen izquierda del río Virilla, luego del puente de la Planta Eléctrica Belén (513 160 E/ 216 137N LN), se observa (figura 3.33) en la base del camino una ignimbrita columnar con espesor visible de ~2 m, con fracturas verticales y horizontales,

contiene clastos sumamente duros en una matriz de gris a morada con clastos de pómez de color amarillo y blancuzco, se le correlaciona con la Ignimbrita Puente Mulas. La sobreyace un depósito de 1,5 m de espesor de bloques polimícticos angulosos de 20 cm x 10 cm dentro de una matriz de ceniza negra, que se interpreta como un depósito de retrabajo, a su vez está sobreyaciendo a este depósito una ignimbrita de matriz fina color gris, con disyunción columnar de dimensiones métricas, la cual se interpreta como Tiribí.



Figura 3.33: Depósito de retrabajo, separando a las unidades Tiribí y Puente Mulas.

En el tajo La Lindora es posible observar dispuesta de forma casi horizontal la siguiente secuencia: en la base de la explotación actual la lava de Belén, sobreyaciendo un paleosuelo de ~5 m máximo de espesor, sobre el cual se presentan distintas facies de la Ingimbrita Puente de Mulas ~30 m de espesor (figura 3.34), luego un paleosuelo ~1 m máximo de espesor, y sobreyaciendo a toda la secuencia la Ignimbrita Tiribí ~20 m de espesor. La Ignimbrita Puente de Mulas en este tajo, en su base consiste en una toba soldada color negro con disyunción columnar incipiente, de matriz muy fina, de ~1 m de espesor.

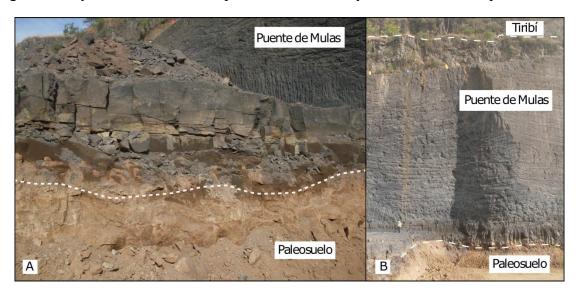


Figura 3.34: A. Detalle de la base de la ignimbrita Puente de Mulas B. Ignimbrita Puente de Mulas, limitada arriba y abajo por paleosuelos.

En la figura 3.35 se muestra que hacia el techo el flujo es masivo y consolidado, se caracteriza por presentar chimeneas de desgasificación. El contacto de los dos distintos flujos de ignimbritas se da en este sitio, mediante un paleosuelo.

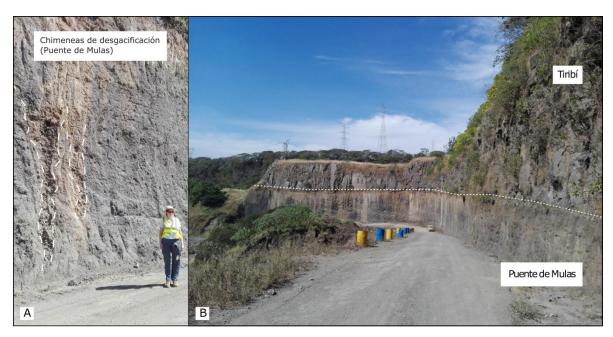


Figura 3.35: A. Chimenea de desgasificación B. Ignimbritas separadas por un paleosuelo.

En el sector cercano al peaje de Ciudad Colón (512 108E-213 285N LN), se presentan las ignimbritas de Tiribí y Puente Mulas (~3 m y ~8 m de espesor visible, respectivamente), separadas por la Capa de Pómez Tibás ~1 m de espesor, presentando una dirección de buzamiento N50°E/12°, por lo que se infiere que los flujos de ignimbrita ubicados hacia el sur de este punto no corresponderían con la Ignimbrita Tiribí, más bien estarían correlacionados con Puente de Mulas o incluso con las ignimbritas más antiguas reportadas bajo las lavas de Belén. El buzamiento de estas capas se explica debido a que se depositaron sobre un basamento basculado y cubrieron además una breve porción del frente de montaña asociado a las rocas de la Formación Pacacua. Se muestra su afloramiento en la figura 3.36.

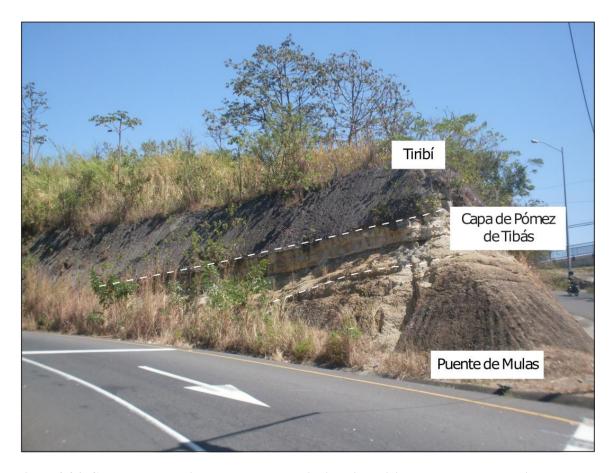


Figura 3.36: Capa de Pómez Tibás separando a las ignimbritas Tiribí y Puente Mulas hacia el oeste del peaje a Ciudad Colón.

### 3.3.4 Lava Linda Vista

Una de las mejores exposiciones de esta lava se encuentra en el Sitio Presa Electriona (figura 3.37), donde se muestra una lava sana, rojiza en la superficie y gris en su interior. Su espesor es de al menos 15 m y presenta altísima dureza. Su aspecto muestra sectores brechosos, masivos y con texturas de flujo, todos estos muy cercanos entre sí, con transiciones fuertes. Las secciones masivas muestran textura afanítica-porfirítica y grandes cristales de plagioclasa (30% - 40%). Microscópicamente, corresponde a una andesita con un piroxeno, presentando texturas variadas, principalmente hipocristalina, se compone de un 30% de fenocristales, 20% de plagioclasa, 10% de augita y su matriz está compuesta vidrio y microlitos de plagioclasa, piroxeno, vidrio y opacos (muestra 22).



Figura 3.37: A. Lámina delgada 22. B. Lava en Sitio Presa Electriona.

En el tajo Pedregal, específicamente en el túnel, se observa un afloramiento que muestra 15 m de la ignimbrita de Tiribí, bajo esta se presenta la Capa de Pómez Tibás con espesor entre 2 y 3 m. En la parte inferior se presenta una lava brechosa, cuyo espesor observado en este sitio es de 5 m. La lava es muy dura y algo escoriácea en superficie (figura 3.38). Alvarado & Gans (2012) datan en este tajo una lava (muestra CR019) de edad 331 ka, lo que confirma su correlación con la unidad Linda Vista.

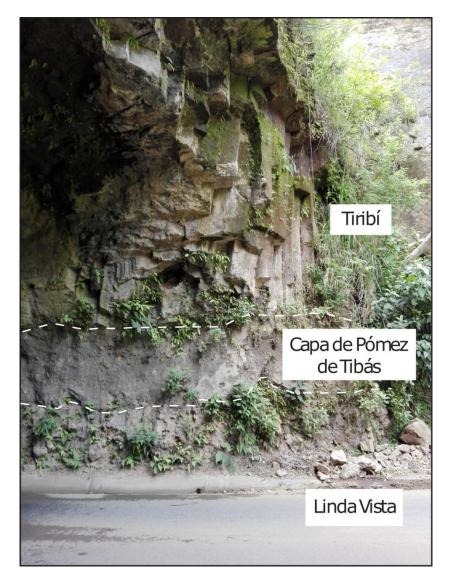


Figura 3.38 : Ignimbrita de Tiribí (nótese la disyunción columnar) sobreyaciendo a Linda Vista, en medio se observa la Capa de Pómez Tibás.

En el antiguo tajo Colima que fue propuesto por Echandi (1981) como la localidad tipo de esta unidad, se encuentran dos coladas de lava sobreyacidas por la Capa de Pómez Tibás. Las coladas de lava, de composición andesítica-basáltica se caracterizan por presentarse brechosas a nivel del techo y piso, y masivas y lajeadas en su núcleo.

En Alvarado & Gans (2012) se menciona la datación de una lava (BA-100) en quebrada Turú (Soto, com. oral, 2009), cuya edad es de 290 ka. Echandi (1981), correlaciona lavas localizadas en el río Tibás, a poco más de 1 km de la datación mencionada, con Linda Vista. Sin embargo, si estas lavas fueran correlacionables entre sí, pertenecerían a la Formación Barva, ya que son más jóvenes que la ignimbrita de Tiribí (322 ka).

Se reportan nuevos afloramientos asociados hasta ahora a esta unidad. En las cercanías de la subestación de Anonos, sobreyacida por la ignimbrita de Tiribí. El contacto entre las unidades es irregular. El espesor observado de la lava es de 10 m, y se presenta sana y muy dura, su aspecto es brechoso en su techo y piso, mientras que su núcleo es masivo, y muestra secciones lajeadas. Además, se caracteriza por su estructura de flujo bien desarrollada y vesiculas alargadas, ambas sugieren que (al menos localmente) esta colada presentó una dirección de flujo hacia el SW. Estas rocas en microscopía corresponden con andesitas de textura hipocristalina, la matriz varia entre 95-98% y los fenocristales entre 2-5%, correspondiendo con plagioclasas y en menor medida augitas (muestras M-A-1, M-A-2 y M-A-3), la matriz de la muestra M-A-1 contiene un 40% de vesículas (figura 3.39).

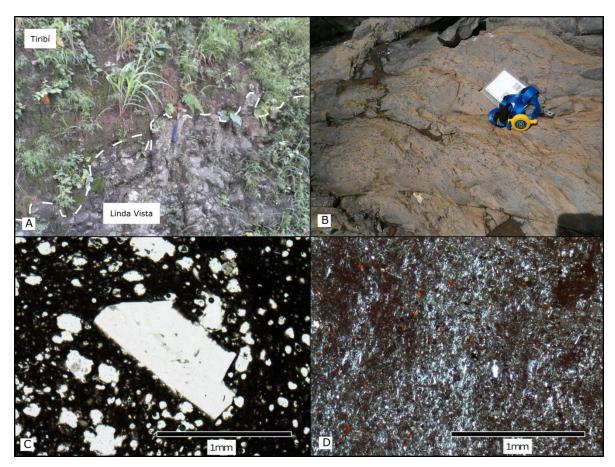


Figura 3.39: A. Contacto irregular entre Linda Vista y Tiribí. B. Estructuras de flujo orientadas en lavas de Linda Vista. C. Lámina delgada "M-A-1". D. Lámina delgada "M-A-3".

Asimismo, en el Bajo de los Ledezma, específicamente en el río Torres, se observa una lava gris, de al menos 6 m de espesor. La roca es de alta dureza (con dificultad se fractura con mazo), de carácter vesicular y composición andesítica, con fenocristales de plagioclasa y piroxenos (figura 3.40). Hacia el techo de la unidad se muestra meteorizada y está cubierta por un depósito de *debris flow* (Lavina?). Microscópicamente, se describe como una

andesita con dos piroxenos, de textura porfirítca, compuesta en 50% de fenocristales, de estos, 30% son plagioclasa, 10% augita y 10% hipersteno. La matriz se compone de microlitos de plagioclasa, piroxeno, olivino y opacos (muestras M-BL-2 y M-BL-1P).



Figura 3.40 : A. Lavas de Linda Vista en Bajo de los Ledezma. B. Lámina delgada "M-BL-1P". C. Lámina delgada "M-BL-2".

En La Uruca, en una perforación a 25 m de profundidad se encuentra una lava andesítica porfirítica muy vesicular. Microscópicamente, corresponde con una andesita con dos piroxenos, con textura porfirítica. Compuesta de 45% de fenocristales, de los cuales 25% corresponde a plagioclasa, 10% augita, 5% hipersteno y 5% olivino. La matriz (55%) se compone de microlitos de plagioclasa, piroxeno, olivino y opacos (muestra 44).

La correlación esquemática de estos afloramientos se muestra en la figura 3.41.

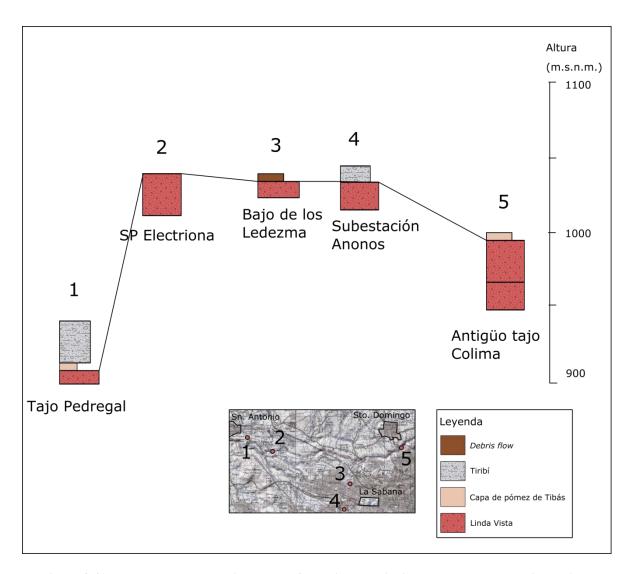


Figura 3.41: Esquema de correlación de los afloramientos principales de las lavas de Linda Vista.

### 3.3.5 Depósito de debris avalanche El Coyol

La exclusión por parte de Pérez (2000) de Nuestro Amo como un miembro de la Formación Tiribí, deja abierta la pregunta de a cuál formación se puede correlacionar esta unidad. Alvarado & Gans (2012) sugieren que pertenece, o al menos se intercala con lavas de Belén. Le asigna una edad de ~621 ka, basándose en la edad de un dique que corta esta unidad en las cercanías del centro penitenciario La Reforma. Los depósitos a los que se refirieren estos autores, han sido difíciles de trazar e identificar en perforaciones distintas a las del P. H. Virilla. Por lo que no se ha podido delimitar su extensión, ni área fuente.

Sin embargo, se ha evidenciado por medio del análisis regional de los registros de perforación que existe una unidad de *debris avalanche* superficial diferente a Nuestro Amo y que se extiende hacia el oeste del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, aflorando en las localidades de Ciruelas, Nuestro Amo y Turrúcares. Por lo que en realidad, este

depósito superficial sí sería correlacionable con las unidades descritas por Brenes (1967) y Méndez & Hidalgo (2004).

Se propone llamar a este depósito superficial debris avalanche El Coyol, respetando el nombre asignado por Méndez & Hidalgo (2004).

Existen múltiples afloramientos asociados a esta unidad, estos se presentan a lo largo de las Rutas Nacionales N. °1 y N. °27, además en la calle Guácima, y en las localidades de Turrúcares y Cebadilla. A continuación se describen brevemente las principales características de estos.

En la Ruta Nacional N. °27, en las cercanías de la salida a La Guácima, se encuentra uno de los mejores afloramientos de El Coyol. Donde se evidencian las variaciones de facies que pueden presentar este tipo de depósitos. Se observan bloques métricos subangulares de lavas, así como bloques de menores dimensiones <60 cm, subangulares soportados en una matriz arenosa. La morfología del afloramiento (figura 3.42) sugiere que se trata de un hummock.



Figura 3.42: Morfología de hummock, Ruta Nacional N.º 27, en las cercanías la salida a La Guácima.

A 1 km al oeste de la salida a Turrúcares se encuentran al menos 4 depósitos, que tanto Porras et al (2012) como Alvarado & Gans (2012) sugieren que pueden corresponder con facies en las que el evento incorporó agua y evolucionaron a *debris flow*. Según lo observado en el afloramiento se logran distinguir tres depósitos (figura 3.43), que por sus características como la redondez y esfericidad de los bloques y el contenido de arcilla apoyan esta propuesta. Existen otros afloramientos al este del peaje de San Rafael, donde se observan dos depósitos. La ocurrencia de *debris flow*, asociados a estos eventos es bastante común. Se puede dar una evolución del depósito al interactuar con un cuerpo de agua, o generarse eventos secundarios, asociados a efectos meteorológicos.



Figura 3.43: Tres depósitos que pueden corresponder con la evolución del debris avalanche a debris flow.

En la Ruta Nacional N.º 1, a 6 km al oeste del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría se encuentra un afloramiento con 4 m de espesor, compuesto por bloques angulares, polimícticos de hasta 1,5 m, normalmente <10 cm. Los bloques son de lavas sanas, meteorizadas y con alteración hidrotermal, se presentan andesitas negras sanas, con fenocristales de piroxenos; lavas hidrotermalizadas multicolores (roja, morada y blanca), así como lavas escoriáceas con vesículas menores a 1 cm. La matriz es arcillosa café, suelta y deleznable. En este sitio se identifican zonas alteración hidrotermal, pero sin continuidad a lo largo del afloramiento.

En Turrúcares y Cebadilla se presentan varios afloramientos de esta unidad. En general, se encuentran bloques subredondeados sobresaliendo en los potreros (figura 3.44), que han sido interpretado anteriormente por Williams (1952) como coladas de lavas blocosas, sin

embargo, al analizar estos bloques se evidencia el carácter polimíctico de estos, incluyendo lavas andesíticas y dacíticas, areniscas y areniscas brechosas.

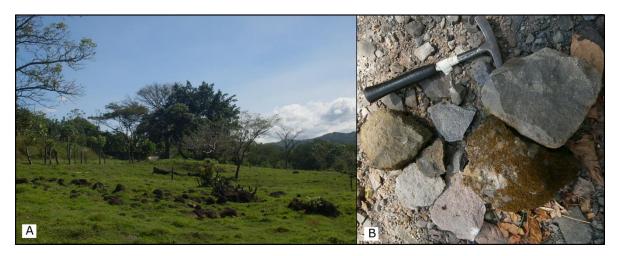


Figura 3.44: Bloques subredondeados en un potrero en Turrúcares.

En las cercanías de calle Tamarindo, se presenta un afloramiento de 25 m de largo por 4 m de alto, este presenta una matriz tobácea, que contiene bloques de hasta 1 m de lavas basálticas sanas. Se observa además lavas hidrotermalizadas (figura 3.45).

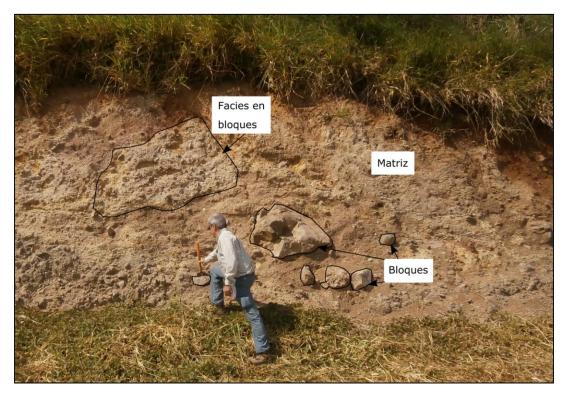


Figura 3.45: Debris avalanche en Turrúcares. Nótese los bloques de casi 1 m de diámetro.

Al sur de Cebadilla, se presenta un bloque de 4 m de diámetro que sobresale del nivel del terreno (figura 3.46), pudiendo corresponder con un *hummock*. Este presenta una matriz limosa gris con plagioclasas, que contiene bloques desde subredondeados a angulares, algunos de estos presentan meteorización esferoidal. Los bloques suelen ser menores a 15 cm, pudiendo medir hasta medio metro.

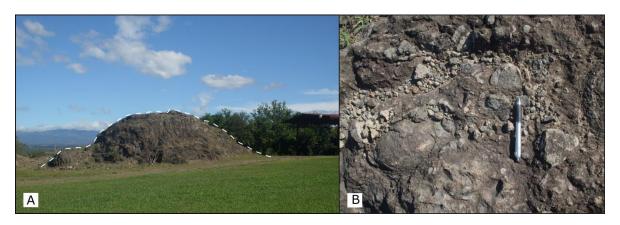


Figura 3.46: A. Posible hummock al sur de Cebadilla. B. Bloques presentes en el depósito.

En la calle que comunica la Ruta Nacional N.° 27 con La Guácima también muestran varios afloramientos, que presentan una serie de bloques flotando en una matriz arcillosa café clara. Predominan los bloques centimétricos, aunque hay bloques de hasta 1,3 m. Estos son polimicticos, subredondeados a subangulares, se presentan hidrotermalizados, lavas andesíticas sanas masivas y lavas vesiculares (figura 3.47).



Figura 3.47: A. Afloramiento de El Coyol en La Guácima. B. Bloques polimícticos conformando el depósito de *debris avalanche* de El Coyol.

### 3.3.6 Otros depósitos de debris avalanche no relacionados

## 3.3.6.1 Depósitos relacionados al Grupo Aguacate

Se ha encontrado un depósito de *debris avalanche* ubicado en la Ruta Nacional N.º 27, después de la salida a Escobal (489 100 E/214 000 N LN). En este sitio se muestra un afloramiento (figura 3.49) de 5 m de altura por 40 m de largo. Se caracteriza por la presencia de una fuerte alteración hidrotermal, con bloques de hasta 2,4 m de diámetro, con bordes deformados, contenidos en una matriz de textura arenosa con algunos bloques decimétricos poligenéticos.



Figura 3.48: Depósito de debris avalanche en la salida a Escobal Ruta Nacional N.º 27.

#### 3.3.6.2 Interestratificados en Colima

Como se mencionó al inicio del presente capítulo, Alvarado & Gans (2012) indican la presencia de eventos de *debris avalanche* intercalados entre las lavas de la Formación Colima. Estos se han detectado en pocas perforaciones, debido a la dificultad de identificar este tipo de depósitos, especialmente mediante una perforación de percusión o rotación.

Específicamente el depósito de *debris avalanche* de ~621 ka que mencionan Alvarado & Gans (2012), solo se ha podido rastrearse en las perforaciones del antiguo P. H. Virilla, donde se muestran al menos dos depósitos de este tipo, intercalados entre las lavas de Belén (perforación PV-6).

# 3.4 Perfiles Geológicos

Para el proceso de ajuste del modelo volcano-estratigráfico, ha sido fundamental realizar perfiles geológicos a lo largo de toda el área. Se muestran a continuación de la figura 3.49 a la 3.53, cinco perfiles geológicos, trazados tanto en dirección noroeste-sureste (dos en total) como en dirección noreste-suroeste (tres en total). A continuación se describen sus aspectos más relevantes.

En el perfil A-A' (figura 3.49), dirección noroeste-sureste, que va de La Garita de Alajuela a Brasil de Mora; se observan ciertas relaciones estratigráficas que vale la pena mencionar: 1) el *debris avalanche* El Coyol sobreyace en varias perforaciones (en cinco) a la Formación Barva; 2) en la margen izquierda del río Virilla la Ignimbrita Puente de Mulas subyace a un *debris avalanche* indeterminado, nombrado en este trabajo "*debris avalanche* 2"; 3) en la margen derecha del río Virilla hay otro *debris avalanche* indeterminado, nombrado en este trabajo "*debris avalanche I*", mas este yace en bajo las Lavas Belén, y se le asocia con el denominado por Alvarado & Gans (2012) como Miembro Nuestro Amo, 4) en el extremo sureste del perfil se empiezan a notar variaciones de los espesores aparentes de las unidades superficiales, ya que las rocas volcánicas del Mioceno y sedimentarias del Neógeno están mucho más superficiales, las cuales conforman un alto topográfico que dificultó la depositación de los flujos volcánicos de menor edad; y 5) se identificaron subyaciendo a la Lava Belén, una ignimbrita (llamada Ignimbrita 3) y a la vez por debajo de dicha ignimbrita, una lava denominada aquí como Lava 2.

En el perfil B-B' (figura 3.50), dirección noroeste-sureste, que va desde la ciudad de Alajuela hasta Anonos; es notable que el orden en profundidad de las unidades es el más conocido, el definido por Echandi; encontrándose en la base las unidades definidas en su momento como Formación Colima, seguida por la Formación Tiribí y sobreyaciendo la secuencia la Formación Barva. Los datos "anómalos" el modelo anterior se muestran en el noroeste en donde el *debris avalanche* El Coyol sobreyace a la Formación Barva, así como en la margen izquierda del río Torres en donde se logra perforar la ya denominada Ignimbrita 3.

El perfil 1-1' (figura 3.51), tiene dirección suroeste-noreste, desde Vuelta Coyoles en la margen izquierda del río Grande hasta Tuetal Sur cerca de Grecia; y se muestra al *debris avalanche* El Coyol sobreyaciendo a la Formación Barva, y a su vez esta última sobre la Formación Tiribí.

Con dirección suroeste-noreste, el perfil 2-2′, muestra (figura 3.52), desde Ventanas (hacia la margen derecha del río Virilla) y hasta Desamparados de Alajuela; al *debris avalanche* El Coyol sobreyaciendo a la Formación Barva, y esta a su vez sobre la Formación Tiribí; además de perforar bajo Belén a la Ignimbrita 3 y a la Lava 2.

Por último el perfil 3-3' con dirección suroeste-noreste, va desde Brasil de Mora hasta San Rafael de Heredia (figura 3.53), se aprecia como el basamento (que corresponde con el Grupo Aguacate y con las formaciones sedimentarias del Neógeno), dificulta el flujo de las lavas e ignimbritas más superficiales, también se observa hacia la margen derecha del río Virilla el sitio en donde frena su avance la lava de la Formación Barva, a lo largo de este perfil la lava más profunda encontrada fue la Lava Belén.

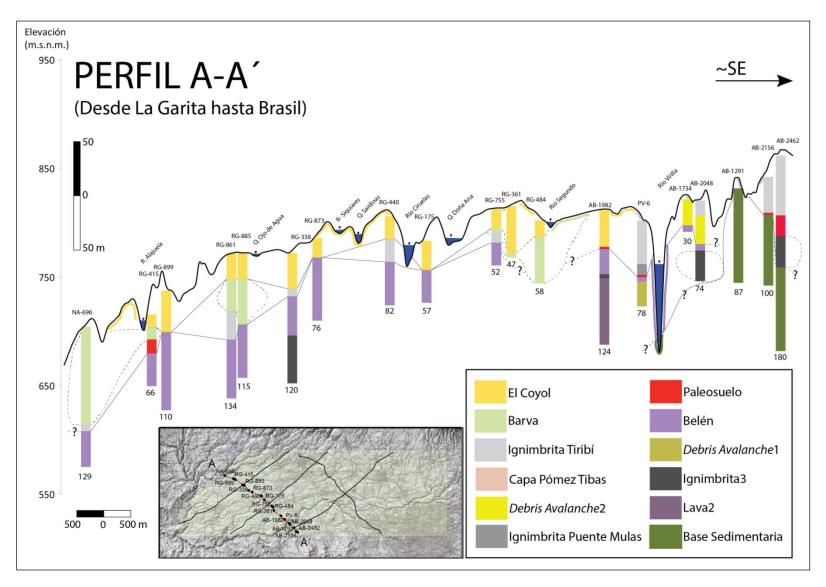


Figura 3.49: Perfil Geológico A-A'

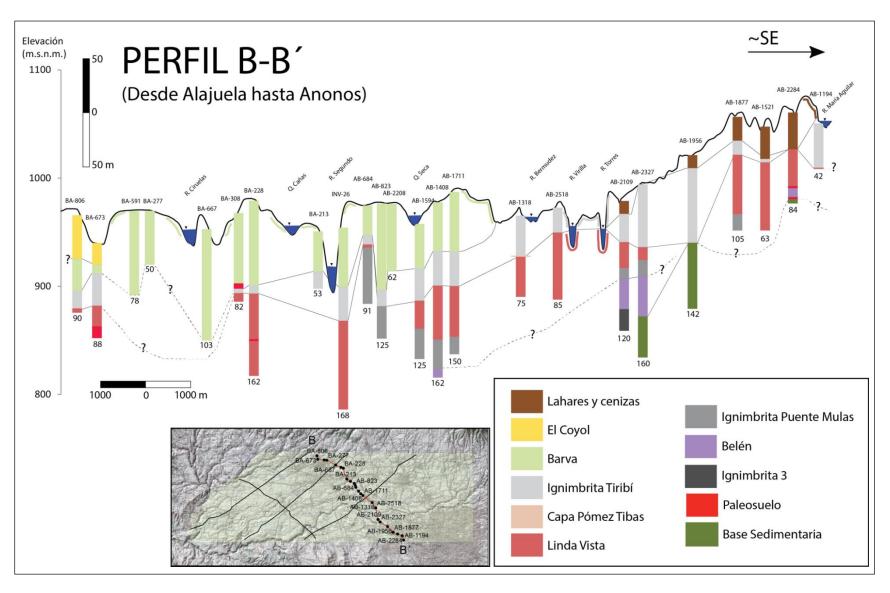


Figura 3.50: Perfil Geológico B-B'

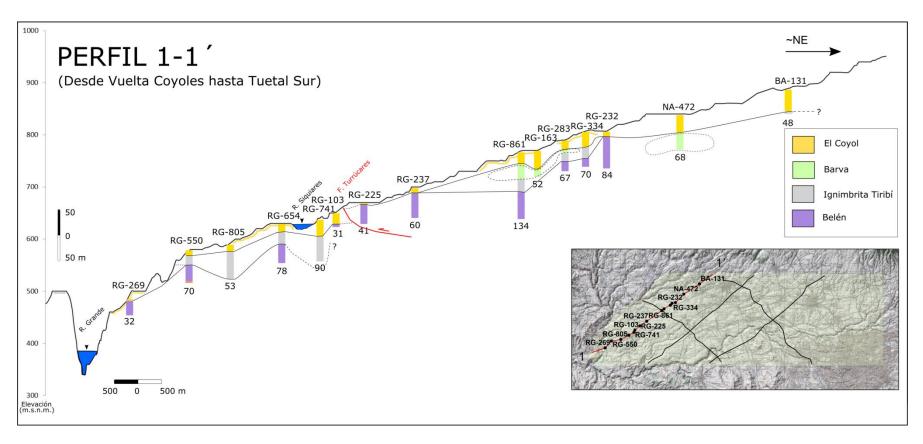


Figura 3.51: Perfil Geológico 1-1'

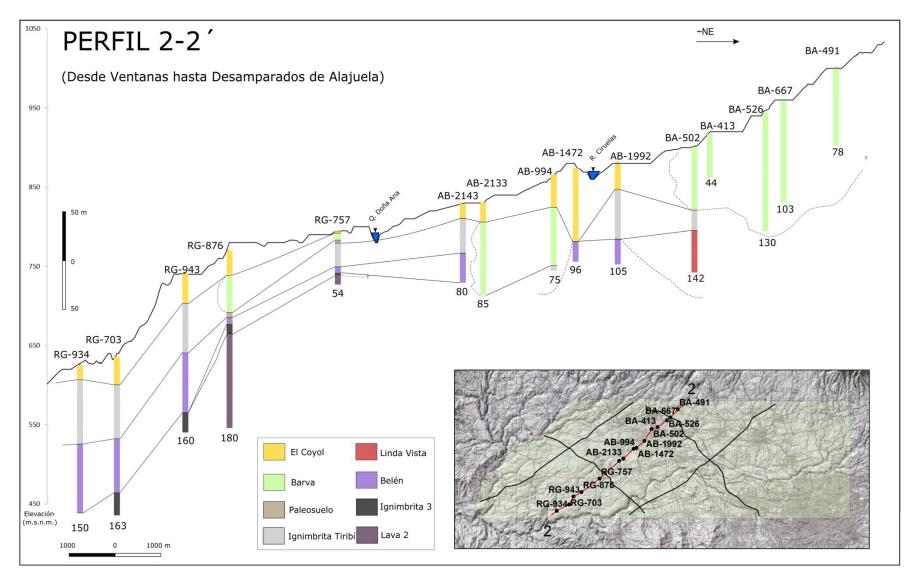


Figura 3.52: Perfil Geológico 2-2'

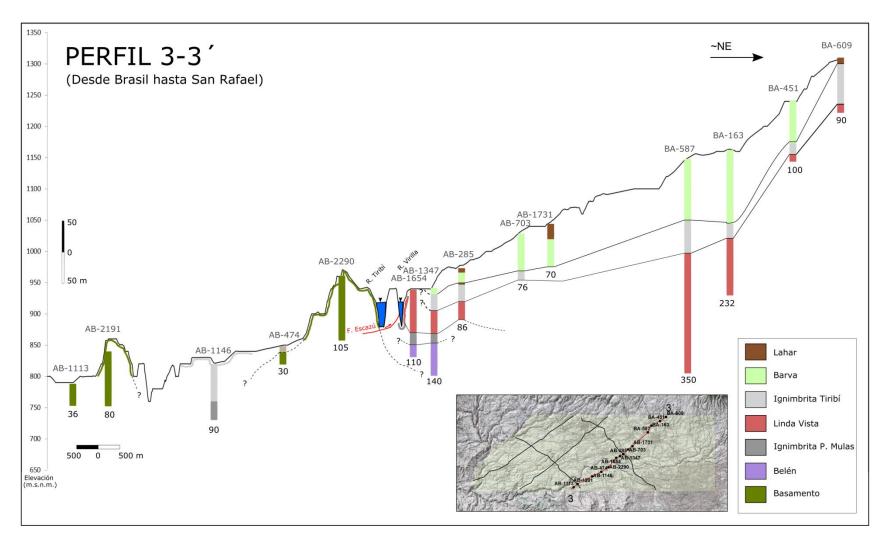


Figura 3.53: Perfil Geológico 3-3'

## 3.5 Mapa Geológico

Con base en la información de la interpretación de la litología superficial de las distintas perforaciones, aunado con lo observado durante las giras de campo, se presenta el mapa geológico del área de estudio en la figura 3.54.

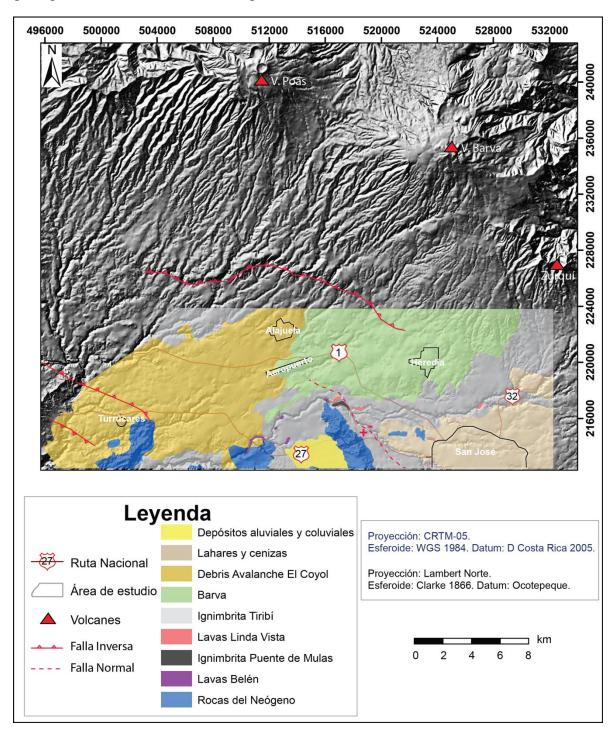


Figura 3.54: Mapa Geológico basado en la interpretación del registro de perforación. Fallas tomadas de Denyer & Arias (1991) y de Porras et al. (2012).

# 4 Modelado paleotopográfico de unidades geológicas

En este apartado se presentan los resultados del proceso de investigación detallado en el capítulo anterior para las unidades geológicas de interés Lavas Belén, Ignimbrita Puente de Mulas, Lava Linda Vista, así como para el *debris avalanche* superficial El Coyol y la secuencia de lavas e ignimbritas más antiguas que Lavas Belén: Ignimbrita 1, Lava 1, Ignimbrita 2, Lava 2 e Ignimbrita 3. Asimismo, se discuten los aspectos utilizados para determinar el origen y la distribución de las mencionadas unidades.

#### 4.1 Base teórica del modelado

Se realizaron a modo de prueba dos diferentes métodos de interpolación (método triangulación y método spline), para trazo de las isohipsas e isopacas de las diferentes unidades que se lograron delimitar en profundidad en relación al registro de perforaciones, ambas llevadas a cabo mediante el software ArcGis 10,0. De acuerdo con Terzopoulos (1988) se presenta la base de cómo funciona cada uno de los citados métodos:

Método triangulación (se le denomina TIN en algunos programas como ArcGis): Los TIN son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos. Existen diversos métodos de interpolación para formar estos triángulos, como la triangulación de Delaunay o el orden de distancias. ArcGis es compatible con el método de triangulación de Delaunay. La triangulación resultante cumple el criterio de triángulo de Delaunay, que afirma que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo. Si se cumple el criterio de Delaunay en todo el TIN, se maximizará el ángulo interior mínimo de todos los triángulos. El resultado es que los triángulos finos y largos se evitan en lo posible. Los modelos de TIN son mucho menos generalizados que los modelos de superficie ráster y tienden a ser más caros de construir y procesar. El coste de obtener buenos datos de origen puede ser elevado y el procesamiento de las TIN tiende a ser menos eficaz que el procesamiento de datos ráster debido a la compleja estructura de datos. Las TIN se suelen utilizar para el modelado de alta precisión de áreas más pequeñas, como en aplicaciones de ingeniería, donde resultan útiles porque permiten realizar cálculos de área planimétrica, área de superficie y volumen.

Método spline: Se emplea el método de curvatura mínima, el cual, mediante una técnica multicuadrícula unidireccional que va desde una cuadrícula inicial gruesa que usa como promedio los datos de entrada, y a través de cuadrículas más pequeñas, produce una aproximación de una superficie de curvatura mínima en el espaciado de fila y columna deseadas. Así el modelo de superficie basado en cuadrícula se trata como una membrana elástica, cuya deformación en cada celda se calcula en función de una suma molecular, la

cual compara la suma ponderada de las doce celdas vecinas con el valor actual de una celda de destino central, calculando así un nuevo valor para la celda de destino.

#### 4.1.1 Justificación para escoger el método de interpolación

Para la creación del modelo por triangulación en el programa ArcGis, existen varios inconvenientes: 1. Las etiquetas de elevación el programa no las ingresa de manera automática, 2. El trazo de las isohipsas queda muy tosco y no hay manera de suavizarlo, y 3. Por la naturaleza de TIN en ArcGis (más que una interpolación es una creación) se pueden integrar en el cálculo la variable de las barreras paleotopográficas, tampoco se puede crear una máscara para que despliegue los datos sólo en el área donde con certeza se sabe que está presente la unidad de interés.

Por otra parte, el método de interpolación *Spline with Barriers* se ajusta a los objetivos de esta investigación porque: 1) Por su técnica de multicuadrícula unidireccional es adecuado para mostrar gradaciones variables de superficies (por ejemplo: elevaciones); y 2) Las rocas que afloran en el área utilizada como "barrera", son justamente las que hace cientos miles de años actuaron como una barrera natural que influyó en la trayectoria de las rocas volcánicas del piso del Valle Central. Por lo que las isohipsas e isopacas de las diferentes unidades se trazaron usando este método.

# 4.2 Mapas de ubicación, isohipsas de los techos, isopacas, líneas de flujo, volúmenes, áreas y espesores

Antes de exponer los resultados obtenidos mediante la interpolación de las isohipsas de los techos y de las isopacas, es necesario aclarar que se pudo calcular las áreas y volúmenes para las siguientes unidades: Lavas Belén, Ignimbrita Puente de Mulas, Lava Linda Vista, así como para el *debris avalanche* superficial El Coyol y la secuencia de lavas e ignimbritas más antiguas que Lavas Belén: Ignimbrita 3 y Lava 2; sin embargo no fue posible determinar dichos datos para las unidades: Ignimbrita 1, Lava 1 e Ignimbrita 2, porque son identificadas en pocas perforaciones (2, 6 y 9, respectivamente), sin embargo sí se trazaron las isohipsas e isopacas de manera inferida para las unidades Ignimbrita 1 y Lava 1.

# 4.2.1 Unidades de mayor edad: Ignimbrita 1, Lava 1, Ignimbrita 2, Lava 2 e Ignimbrita 3

A continuación se muestran los mapas de ubicación, isohipsas de los techos e isopacas, de las unidades identificadas Lava 1, Ignimbrita 2, Lava 2 e Ignimbrita 3; en la unidad Ignimbrita 1 solamente se muestra la ubicación de las perforaciones (figuras 4.1 a 4.15). Cabe destacar a modo de resumen (esto será expuesto con más detalle adelante), que la secuencia se compone de la siguiente manera: la unidad Ignimbrita 1 es la más antigua y se estima sobreyace a las rocas del Neógeno, sobreyaciendo sobre Ignimbrita 1 se encuentra la Lava 1, a su vez sobre esta descansa la Ignimbrita 2, la cual es sobreyacida por la unidad

Lava 2, y sobre esta lava descansa la Ignimbrita 3, esta última ignimbrita es la que subyace a la Lava Belén en cierta parte del área de estudio.

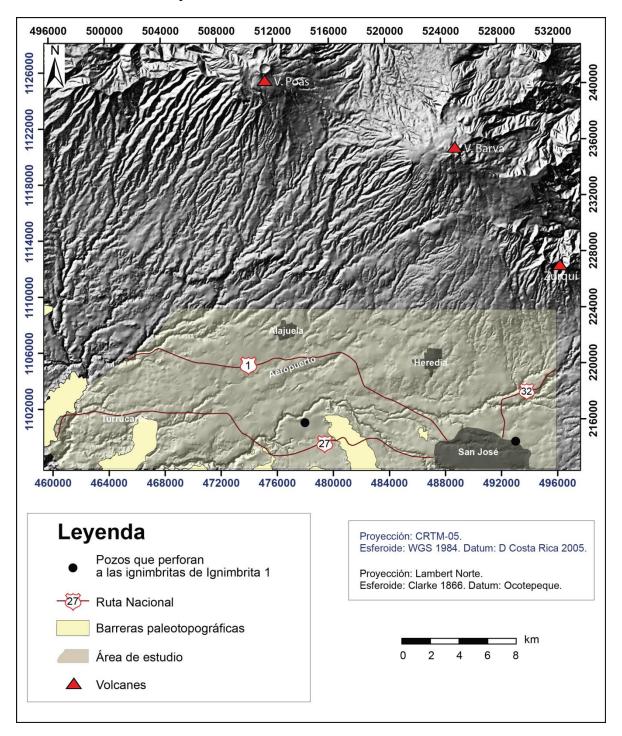


Figura 4.1: Perforaciones que muestran a la unidad Ignimbrita 1.

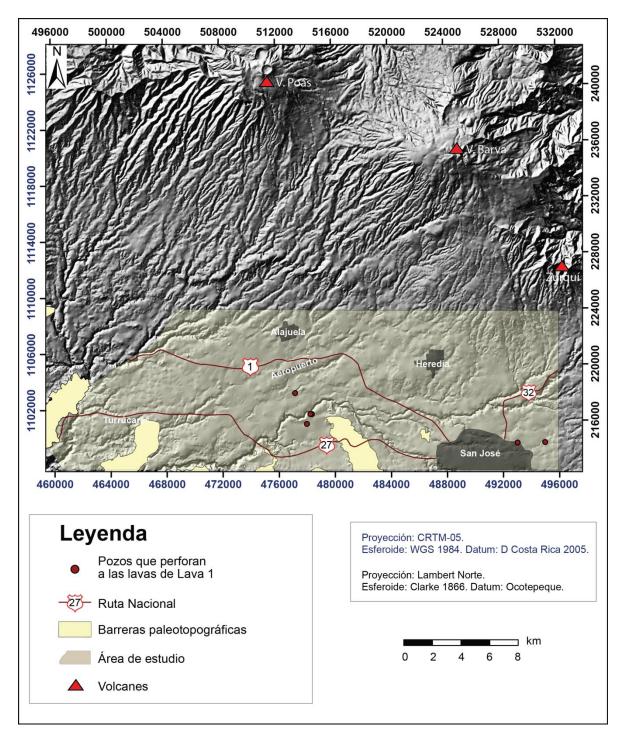


Figura 4.2: Perforaciones que muestran a la unidad Lava 1.

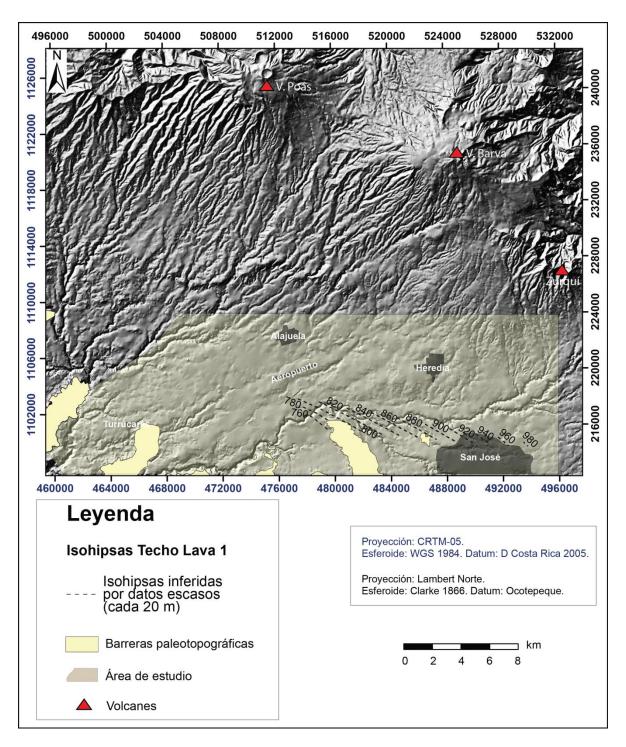


Figura 4.3: Isohipsas de Lava 1.

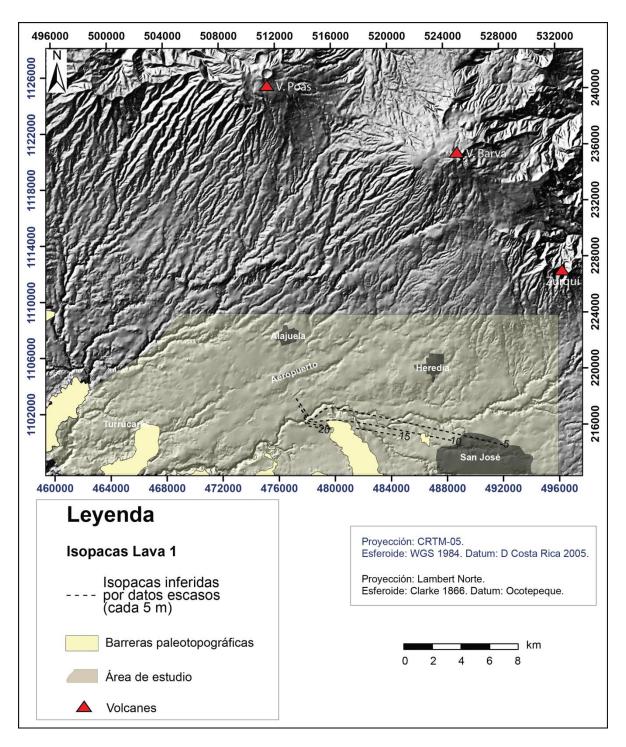


Figura 4.4: Isopacas de Lava 1.

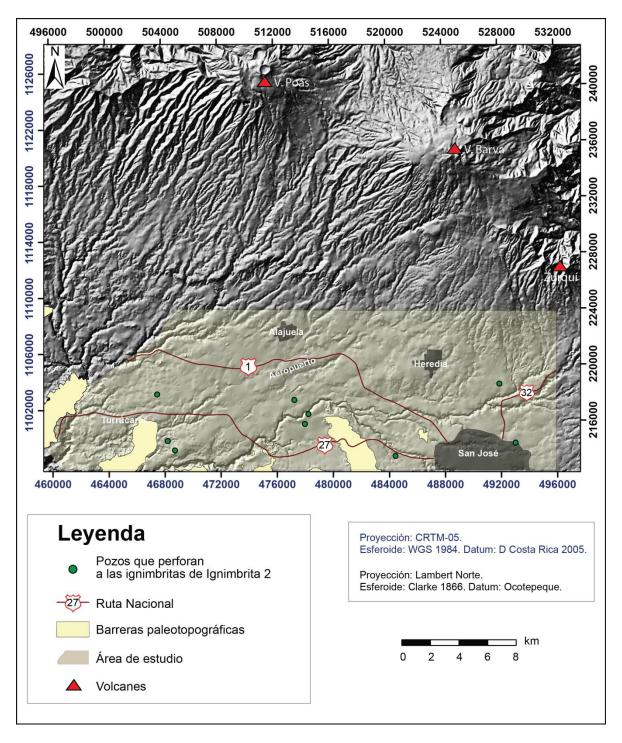


Figura 4.5: Perforaciones que muestran a la unidad Ignimbrita 2.

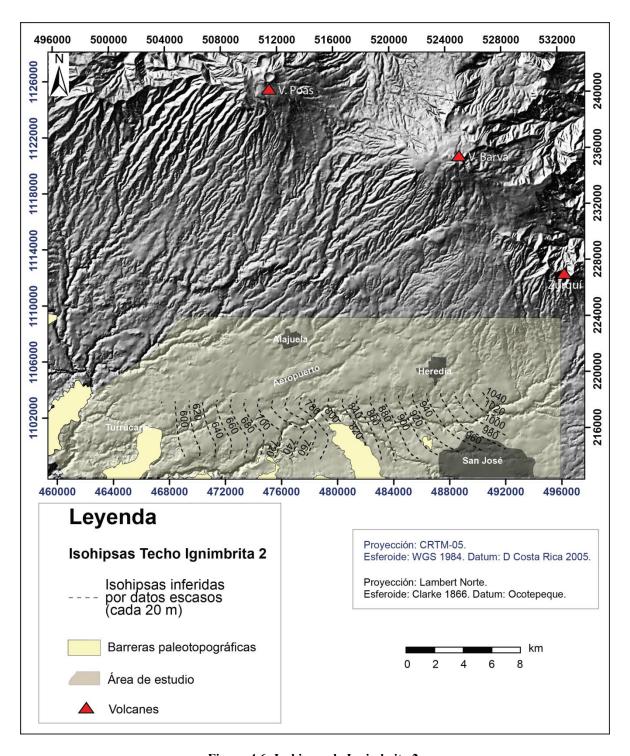


Figura 4.6: Isohipsas de Ignimbrita 2.

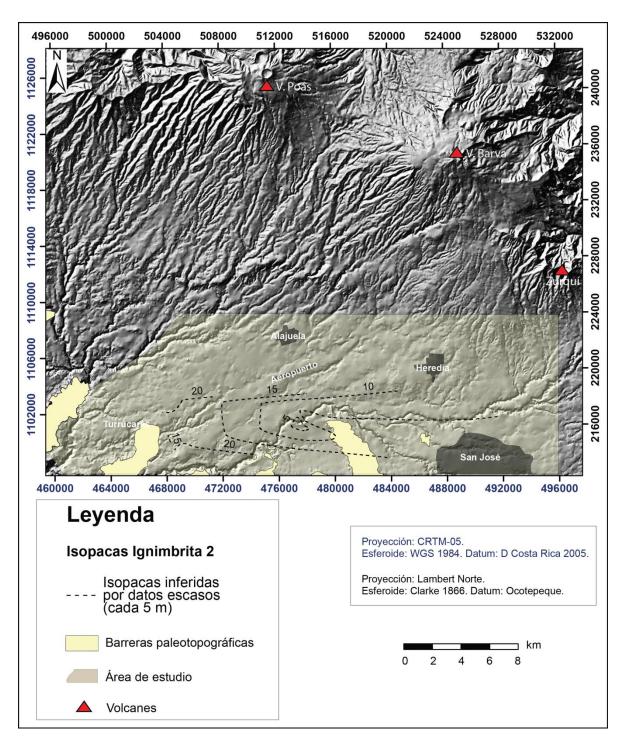


Figura 4.7: Isopacas de Ignimbrita 2.

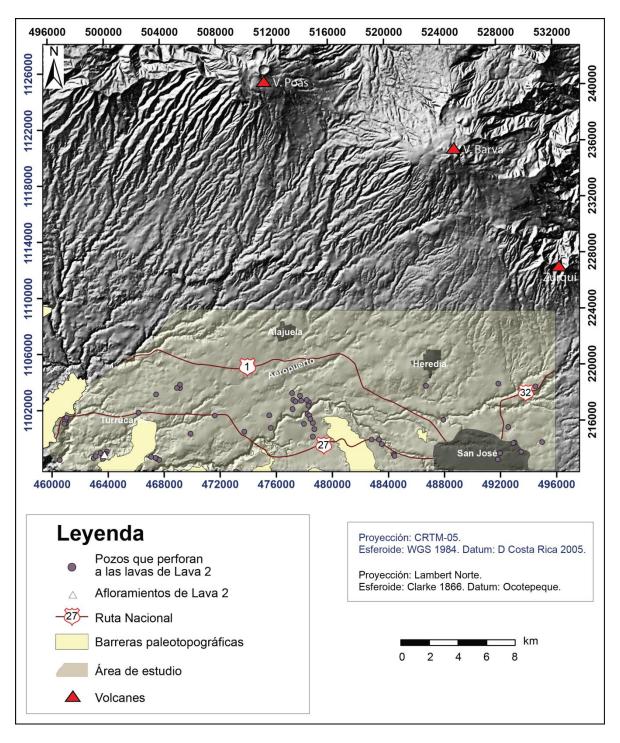


Figura 4.8: Perforaciones que muestran a la unidad Lava 2.

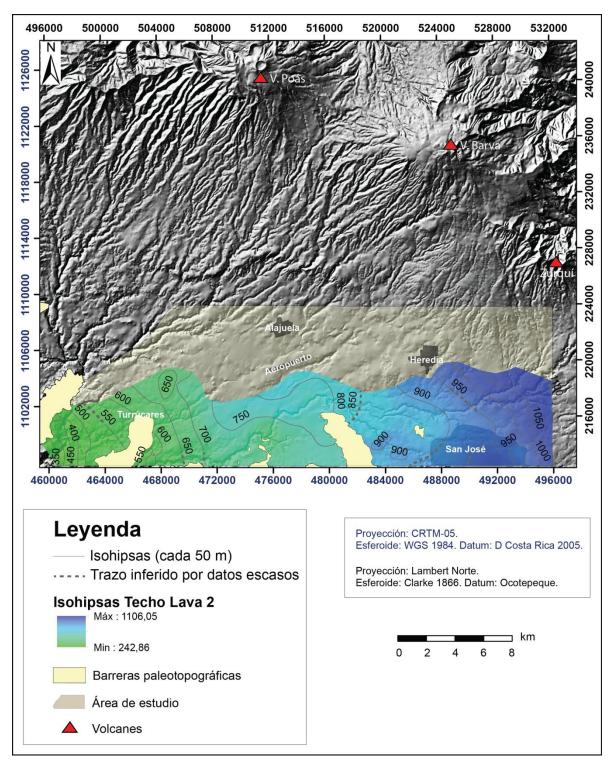


Figura 4.9: Isohipsas de Lava 2.

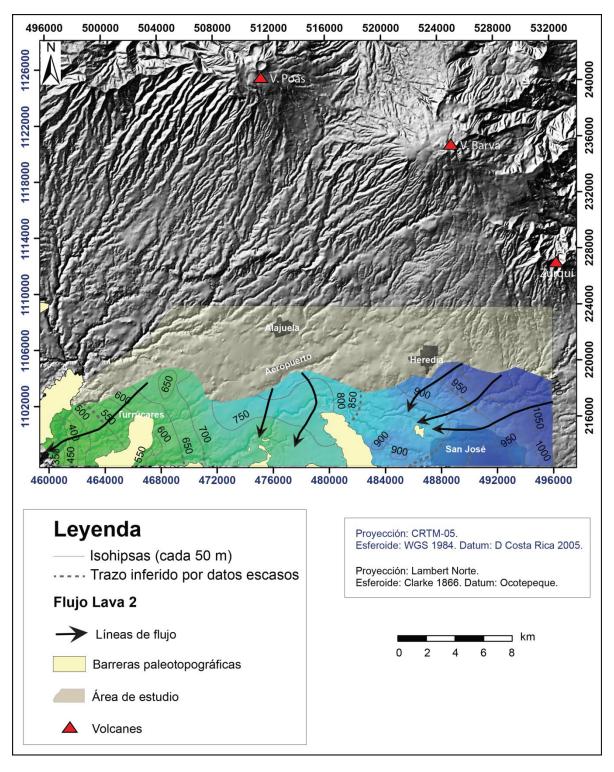


Figura 4.10: Líneas de flujo de Lava 2.

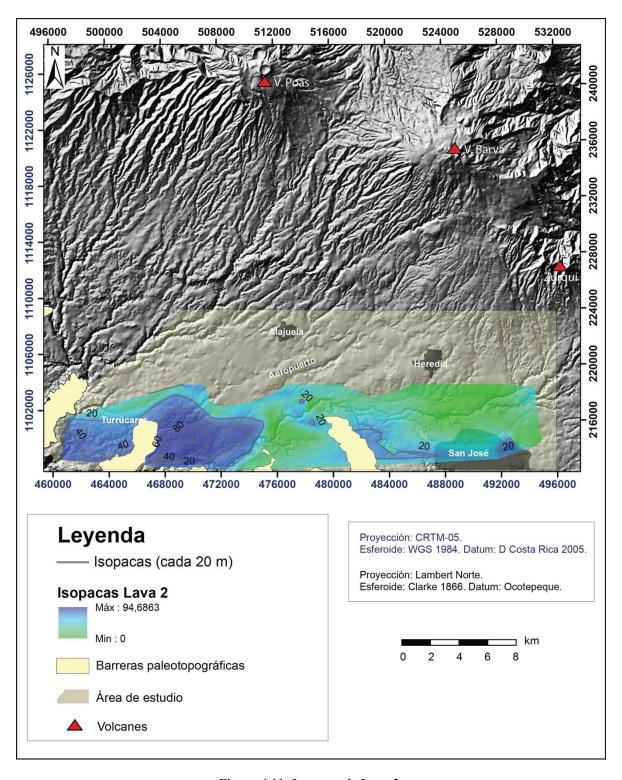


Figura 4.11: Isopacas de Lava 2.

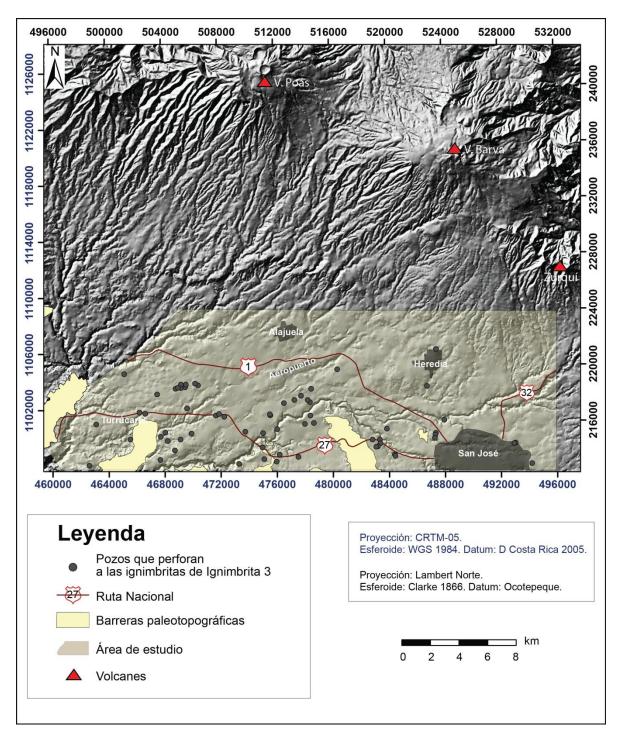


Figura 4.12: Perforaciones que muestran a la unidad Ignimbrita 3.

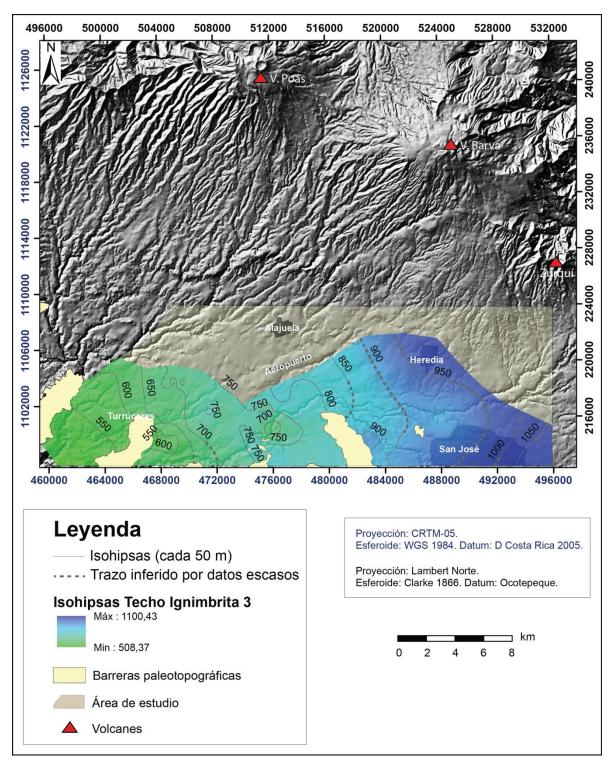


Figura 4.13: Isohipsas de Ignimbrita 3.

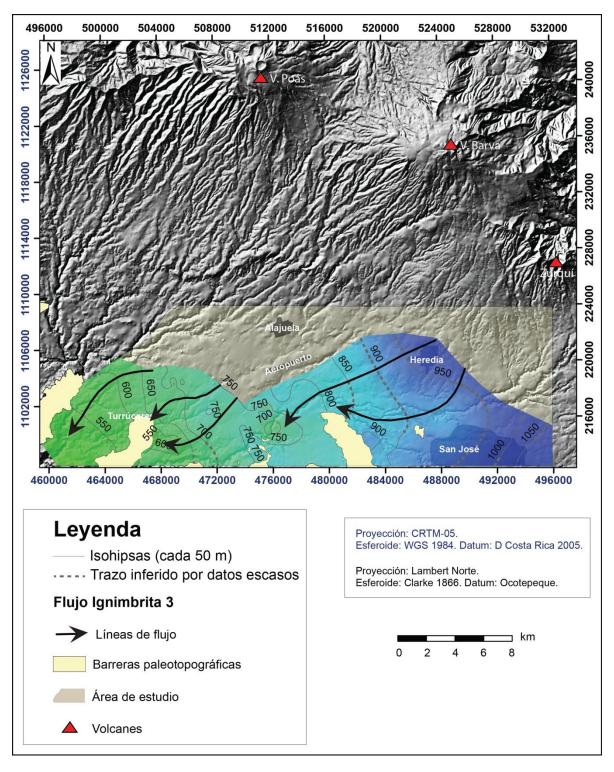


Figura 4.14: Líneas de flujo de Ignimbrita 3.

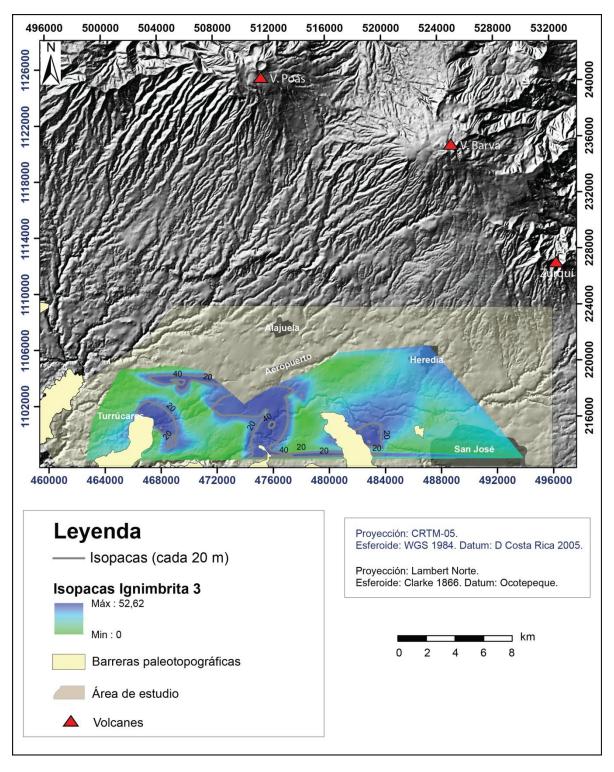


Figura 4.15: Isopacas de Ignimbrita 3.

En el siguiente cuadro (4.1) se exponen los datos de área y volumen de las unidades anteriores, así como su espesor aparente promedio y máximo, y las perforaciones en donde se reportó su espesor aparente máximo. Los volúmenes (aparentes y acotados al área de estudio) fueron calculados de dos formas, la primera respecto a los espesores aparentes promedio (en perforaciones que cruzan el techo y piso de la unidad); la segunda manera es respecto a una cuadrícula de 1000 m de lado, en donde mediante integrales se calcula el espesor aparente de la unidad en cada cuadrícula con el programa ArcGis 10.0, el cual al final suma cada una de ellas, obteniendo así un volumen más realista respecto al primero.

Cuadro 4.1: Características de las unidades más antiguas que la Lava Belén

Unidad	Cantidad de perforaciones	Espesor promedio (m)	Espesor máximo (m)	Área (km²)	Volumen con espesor promedio (km³)	Volumen con integrales (km³)	Edad (ka)
Ignimbrita 1	2	16,5	22 (AB-1735)	?	?	?	≥758
Lava 1	6	6,6	24 (AB-2513)	?	?	?	≥758
Ignimbrita 2	9	13	23 (RG-703 y RG-472)	?	?	?	≥758
Lava 2	61	22	95 (RG-876)	196,8	4,3	4,3	≥758
Ignimbrita 3	65	17,7	54 (RG-547)	223	3,9	3,6	≥758

### 4.2.2 Lava Belén

A continuación se detallan los mapas realizados para la unidad identificada como Lava Belén, asimismo se exponen sus datos más relevantes.

Para generar los mapas de isopacas e isohipsas del techo de la Lava Belén se utilizó la información de 7 localidades y de 474 registros de perforación (figura 4.16), correspondiendo la mayoría a datos del SENARA y en menor medida del proyecto hidroeléctrico Virilla y Ventanas Garita. Estas perforaciones se ubican principalmente en las hojas topográficas Abra, Barva, Naranjo y Río Grande. En la figura 4.17 se aprecia la distribución las isohipsas del techo de la Lava Belén, la cual abarca toda el área de estudio de 356 km² delimitada por San Isidro al E, Ciudad Colón al S, Turrúcares al W y Alajuela al N.

La elevación de los techos varía entre 1143 y 441 m.s.n.m. El flujo de las lavas se aprecia en la figura 4.18.

Las isopacas de la lava Belén se observan en la figura 4.19, se reporta en la información de perforaciones un espesor máximo de 140 m en el pozo AB-656.

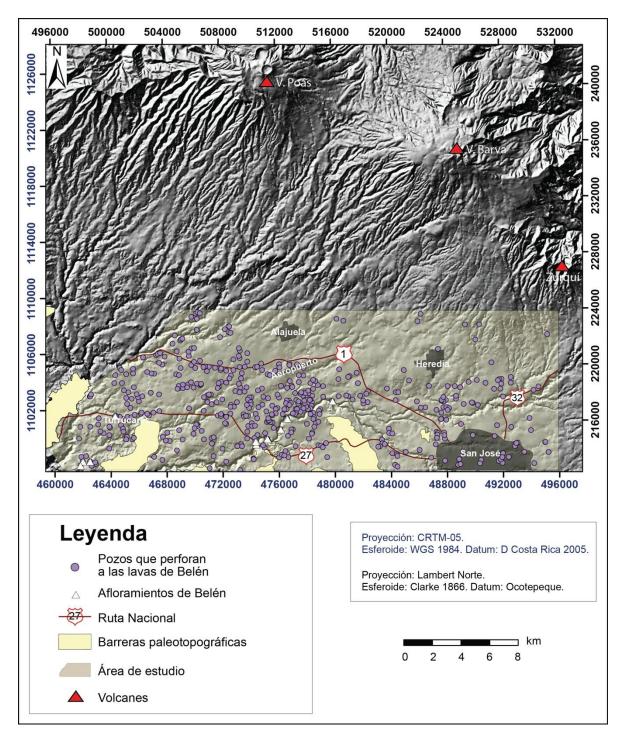


Figura 4.16: Perforaciones que muestran a la unidad Lava Belén.

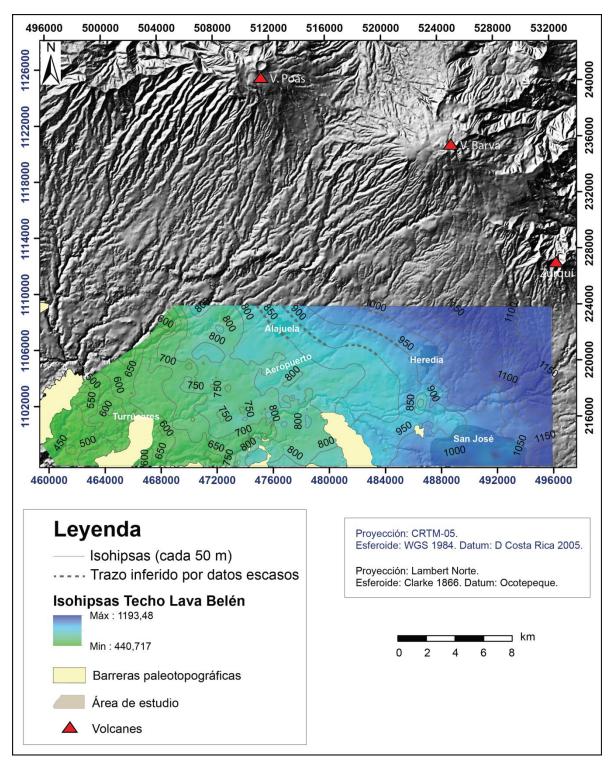


Figura 4.17: Isohipsas de la unidad Lava Belén.

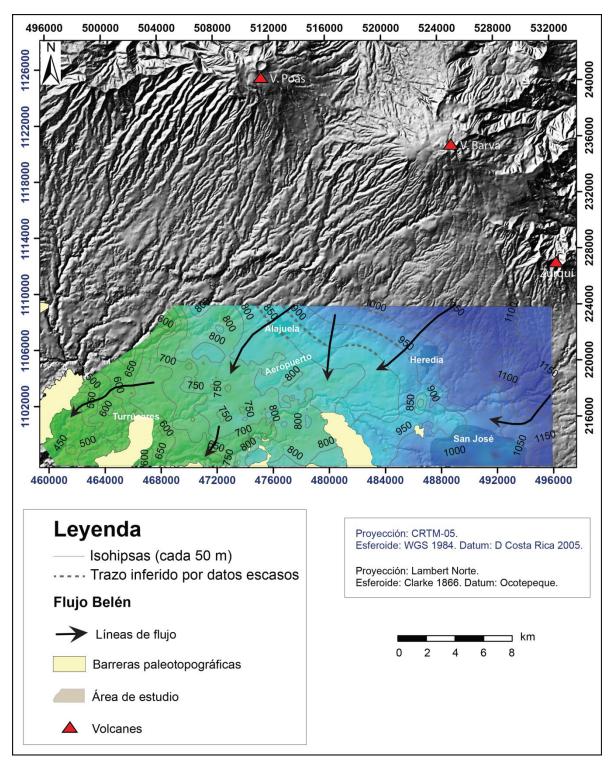


Figura 4.18: Líneas de flujo de la unidad Lava Belén.

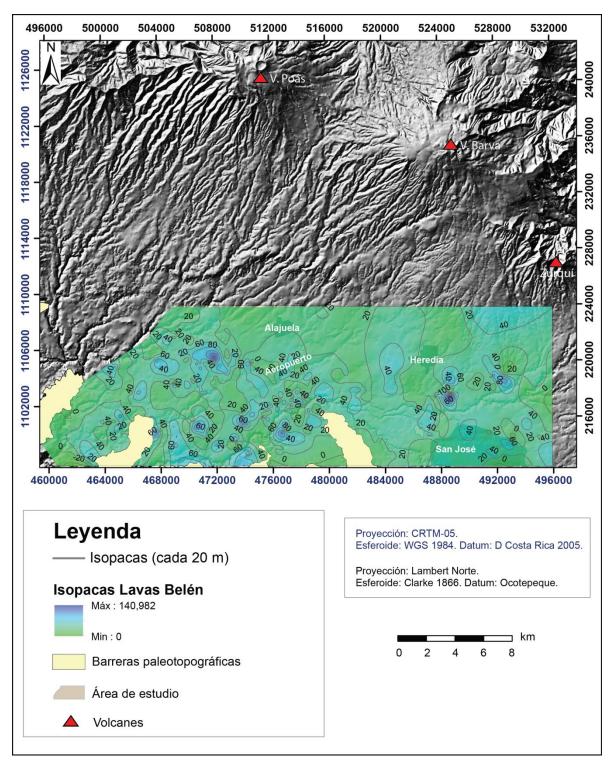


Figura 4.19: Isopacas de la unidad Lava Belén.

En el siguiente cuadro (4.2) se aprecian las características de la Lava Belén, la edad <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar se reporta en Alvarado & Gans (2012) de 758-535.

Cuadro 4.2: Características de la unidad Lava Belén

Cantidad de perforaciones	Espesor promedio (m)	Espesor máximo (m)	Área (km²)	Volumen con espesor promedio (km³)	Volumen con integrales (km³)	Edad (ka)
474	29	140 (AB- 656)	356	10,3	18,4	758 – 535

Las lavas de Belén tienen la particularidad de que a lo largo del tiempo se han interpretado como la base de los depósitos volcánicos del piso del Valle Central, por lo que se muestra un bloque diagrama con su distribución en los alrededores de San Antonio de Belén, en donde es posible hallar perforaciones que profundizan en su totalidad dentro de esta unidad en un área de 7 km² aproximadamente, dicha lava se encuentra confinada en su contacto inferior por la unidad Ignimbrita 3. El espesor medido específicamente en dicha área con la información de diez perforaciones equivale a 18 m. El siguiente cuadro (4.3) muestra el cálculo de volumen para las lavas Belén en el área mencionada, así mismo se observa el volumen extrapolado en el área estudio total, dicho volumen (6,6 km³) es menor que el calculado con 474 perforaciones (10,3 km³), también es menor respecto al calculado con la suma de integrales en cuadrículas de 1000 m de lado (18,4 km³), puesto que el espesor promedio de esta unidad es menor (18 m) en el área de San Antonio de Belén respecto al área total de estudio (29 m).

Cuadro 4.3: Características de la unidad Lava Belén en San Antonio

Cantidad de perforaciones	Espesor (m)	Espesor máximo (m)	Área (km²)	Volumen (km³)	Volumen extrapolado en el área total (km³)
10	18	48 (AB- 1908)	7	0,13	6,6

En la figura 4.20 se observa la ubicación en superficie del bloque diagrama. Se muestra en la figura 4.21 la proyección en profundidad de las perforaciones AB-1982, PV-5, AB-2319, AB-2305, AB-604, AB-1908, AB-1534, AB-2336, AB-1192 y AB-1930. Se recalca que la figura es de carácter ilustrativa, para observar las relaciones de las unidades; dada la pequeña densidad de datos (10 perforaciones) existen algunos errores en la vertical y las capas no se terminan de acoplar, dejando lo que pareciera ser espacios vacíos.

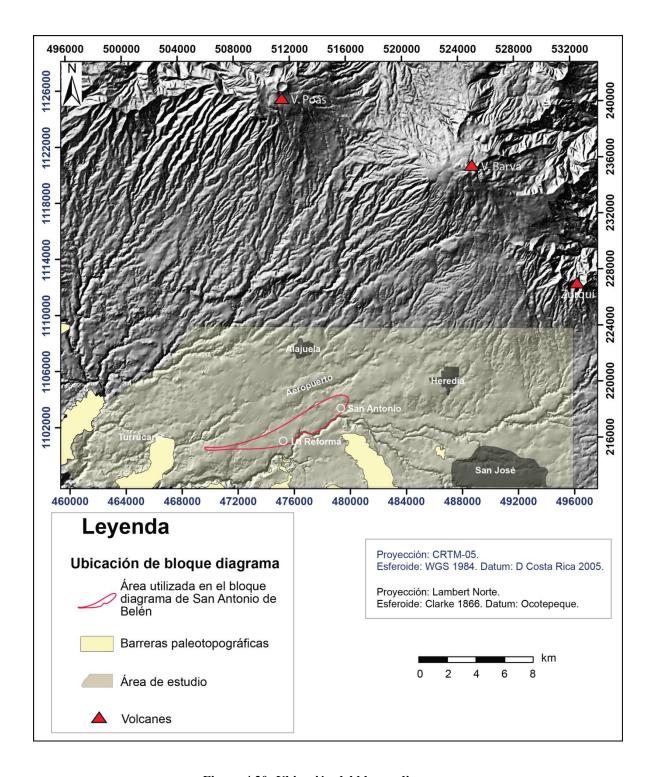


Figura 4.20: Ubicación del bloque diagrama

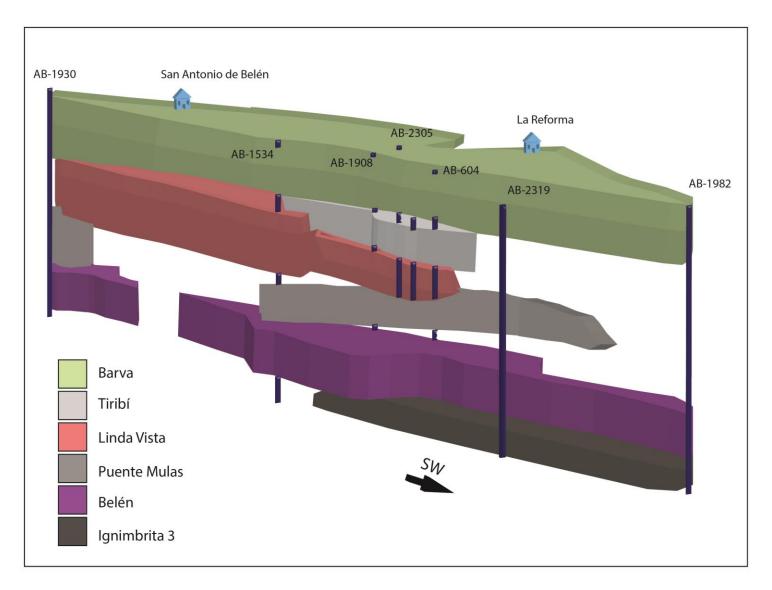


Figura 4.21: Bloque diagrama del sector de San Antonio de Belén

## 4.2.3 Ignimbrita Puente de Mulas

Para generar los mapas de isopacas e isohipsas del techo de la Ignimbrita Puente de Mulas de utilizó la información de 12 localidades y de 270 registros de perforación (figura 4.22), correspondiendo la mayoría a datos del SENARA y en menor medida del proyecto hidroeléctrico Virilla. Estas perforaciones se ubican principalmente en las hojas topográficas Abra y Barva, y en menor medida en las hojas Naranjo y Río Grande. En el cuadro 4.4 se muestran las dimensiones de esta unidad y sus características, la edad  $^{40}$ Ar/ $^{39}$ Ar es de Alvarado & Gans (2012).

Cuadro 4.4: Características de la unidad Ignimbrita de Puente de Mulas.

Cantidad de perforaciones	Espesor promedio (m)	Espesor máximo (m)	Área (km²)	Volumen con espesor promedio (km³)	Volumen con integrales (km³)	Edad (ka)
270	25	75 (AB- 1726)	264	6,6	5,7	440

En la figura 4.23 se aprecia la distribución las isohipsas del techo de la Ignimbrita Puente de Mulas, la cual abarca un área de 264 km² delimitada por San Isidro al NE, San José casco central al SE, Ciudad Colón al SW y El Roble de Alajuela al NW. Como se mencionó en la primera sección de este capítulo, existe un área en la que no se pueden distinguir las unidades ignimbritas, dado que no se tiene la lava de Linda Vista que fungiría como capa guía, ni se cuenta con dataciones cercanas. En este sector posiblemente se están emplazados varios flujos ignimbríticos hacia el oeste del área de estudio, donde se muestran espesores anómalos, por ejemplo el pozo RG-276 reporta un espesor de ignimbritas de 117 m. En el área en donde sí se puede delimitar la ignimbrita de Puente de Mulas, la elevación de los techos varía entre 1198 y 709 m.s.n.m. Se muestra en la figura 4.24 las líneas de flujo. Las isopacas de la Ignimbrita Puente de Mulas se observan en la figura 4.25, se reporta en la información de perforaciones un espesor máximo de 75 m, dato que se asemeja al espesor visible calculado en aproximadamente 70 m en la Planta Eléctrica Electriona.

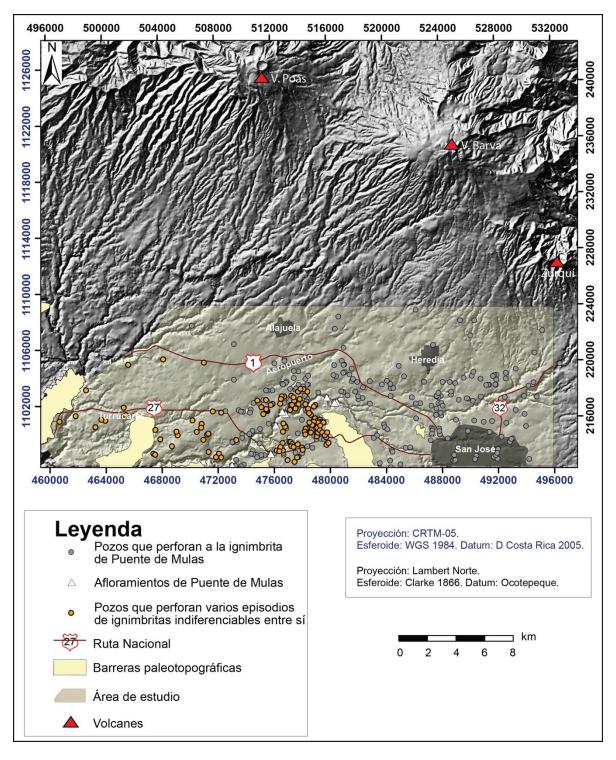


Figura 4.22: Perforaciones y afloramientos que muestran a la unidad Ignimbrita Puente de Mulas.

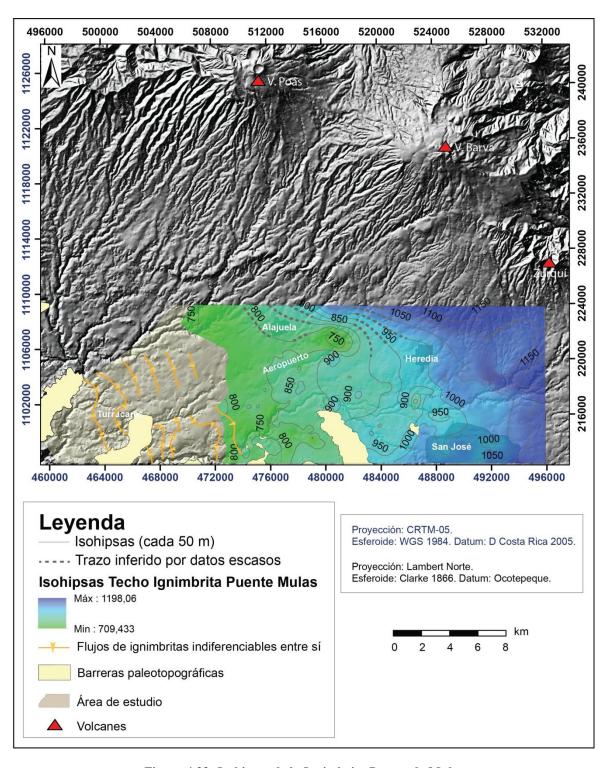


Figura 4.23: Isohipsas de la Ignimbrita Puente de Mulas

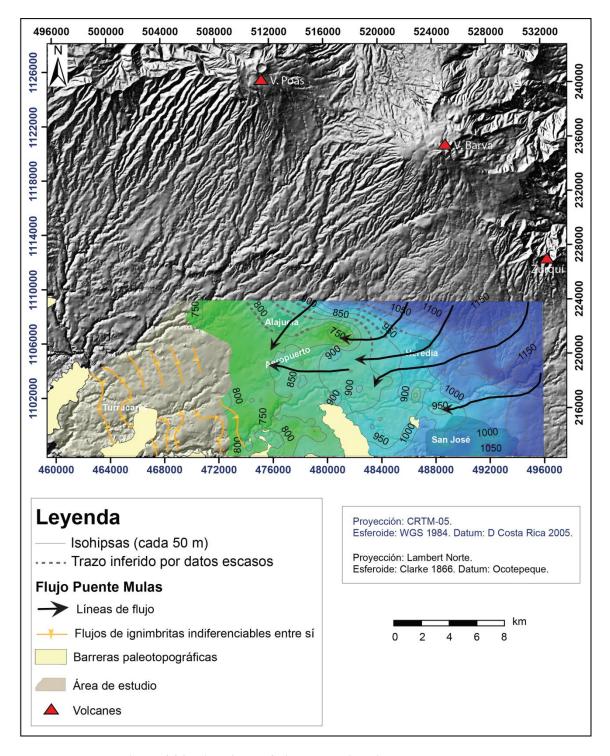


Figura 4.24: Dirección de flujo de la Ignimbrita Puente de Mulas

138

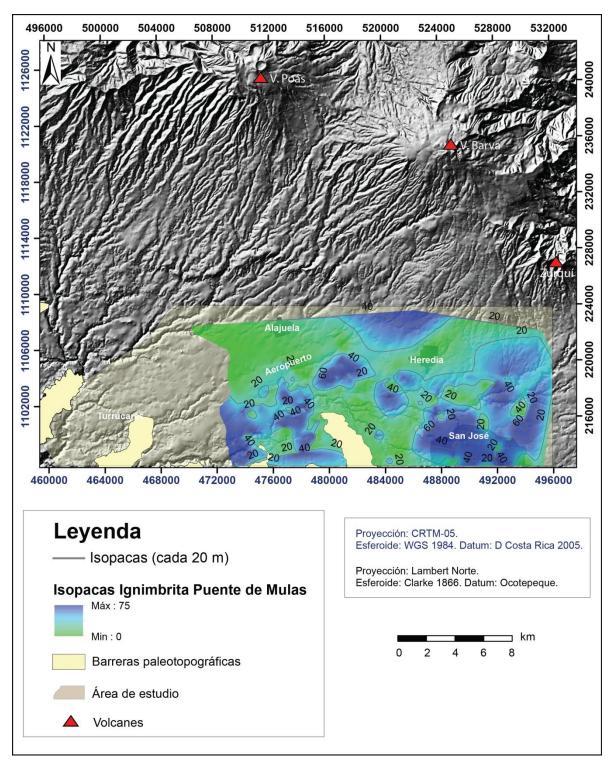


Figura 4.25: Isopacas de la Ignimbrita Puente de Mulas.

#### 4.2.4 Lavas Linda Vista

Integrando las evidencias encontradas en los afloramiento y el análisis de los registros de perforaciones, se plotearon las isohipsas de la lava de Linda Vista. Para lo cual se utilizaron datos de 406 registros de perforación, correspondiendo únicamente a la base de datos del SENARA. En la figura 4.26 se muestran la distribución de las perforaciones y afloramientos utilizados. Esta unidad se encuentra en localidades como Alajuela, Heredia, Tibás, Santo Domingo de Heredia y Anonos.

En la figura 4.27 se muestran las isohipsas de la lava de Linda Vista. Estas lavas se extienden en un área superficial de 219 km<sup>2</sup>. El espesor promedio es de 43,28 m, mientras que su espesor máximo es de 219 m, en el pozo AB-1966, localizado en La Florida de Tibás. Su volumen respecto al espesor aparente promedio es de 9,4 km<sup>3</sup>, mientras que con base en la suma de las integrales de las cuadrículas de 1000 m de lado es de 12,3 km<sup>3</sup>.

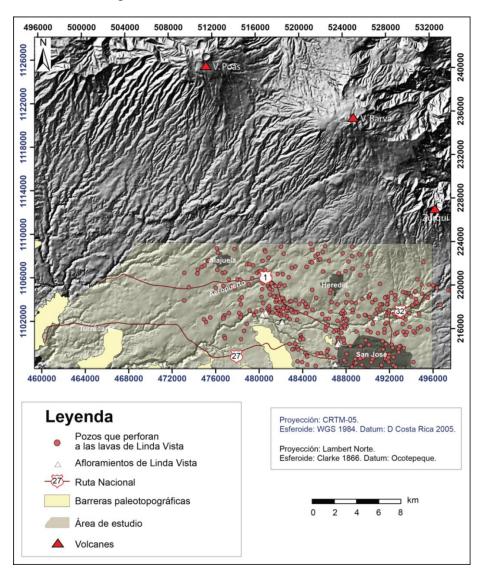


Figura 4.26: Perforaciones y afloramientos utilizados para el ploteo de las Lavas Linda Vista

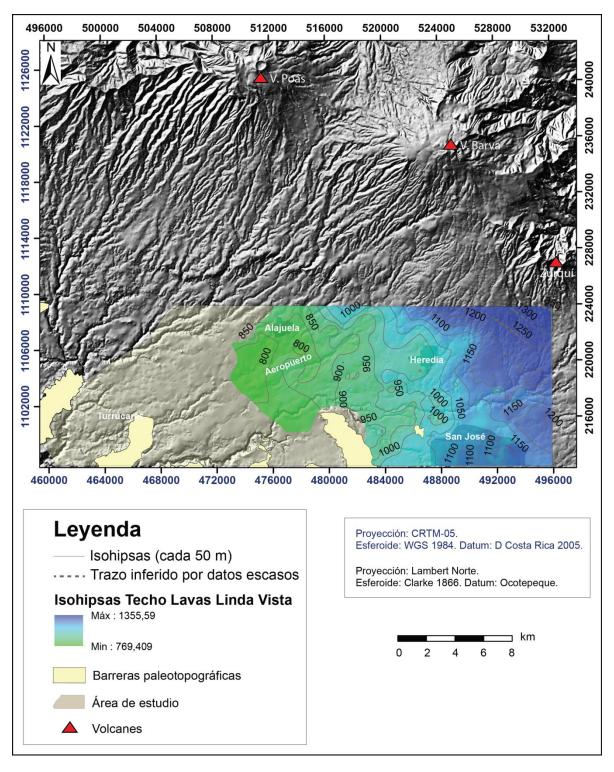


Figura 4.27: Isohipsas de las Lavas Linda Vista

En el cuadro 4.5 se muestran los datos de esta unidad y sus características, la edad <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar es reportada en Alvarado & Gans (2012).

Cuadro 4.5: Características de Lava Linda Vista.

Cantidad de perforaciones	Espesor promedio (m)	Espesor máximo (m)	Área (km²)	Volumen con espesor promedio (km³)	Volumen con integrales (km³)	Edad (ka)
406	43,28	219 (AB- 1966)	219	9,4	12,3	371 – 331

La distribución de estas lavas es más uniforme hacia el este, mientras que su sector oeste correspondería con los frentes de las coladas lávicas, este límite es muy similar al señalado por Gómez (1987) para esta unidad. A partir de las isohipsas se determina su dirección de flujo, que corresponde con SW y WSW (figura 4.28).

El espesor máximo de esta unidad se muestra en el sector NE del área de estudio, cerca de San Isidro de Heredia y disminuye conforme se aleja de la cordillera. Bajo la ciudad de San José su espesor oscila entre 20 y 100 m, en Heredia, entre 20 y 60 m. Esta unidad se adelgaza hacia el oeste y deja de presentarse a pocos kilómetros al oeste del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. Existen sitios en los cuales su espesor incrementa, como en Vuelta Virilla, esto posiblemente se debe a efectos de la topografía preexistente. También se observa hacia el este de Alajuela dirigiéndose hacia Santa Bárbara, donde se presentan espesores mayores, con una dirección aproximada ESE, lo cual corresponde aproximadamente con el escarpe de la falla de Alajuela. Borgia et al. (1990) indican que esta estructura es de tipo inversa y muestra hacia el sur un pliegue asociado. Se sugiere que el engrosamiento de las lavas en dicho sector pueda deberse a un efecto de repetición de las capas por efectos de la falla-pliegue de Alajuela.

En la figura 4.29 se aprecia la distribución de las isopacas para las Lavas Linda Vista.

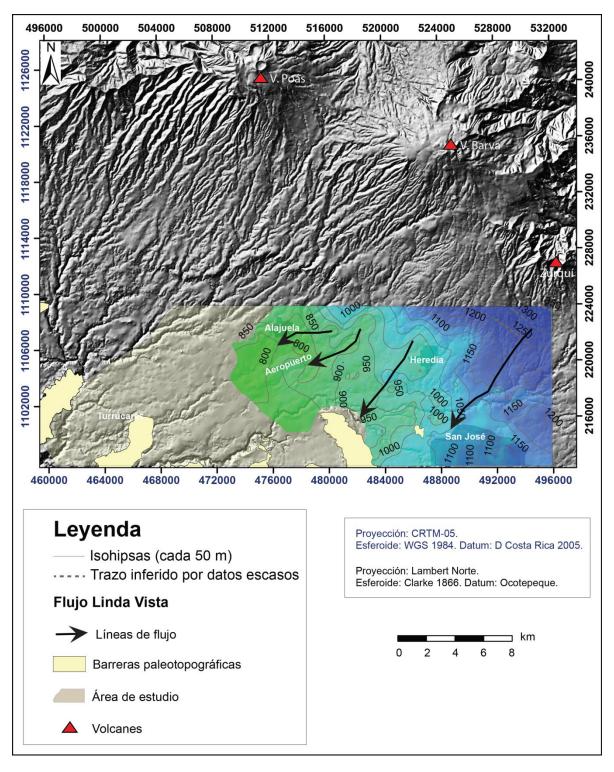


Figura 4.28: Líneas de flujo de las Lavas Linda Vista.

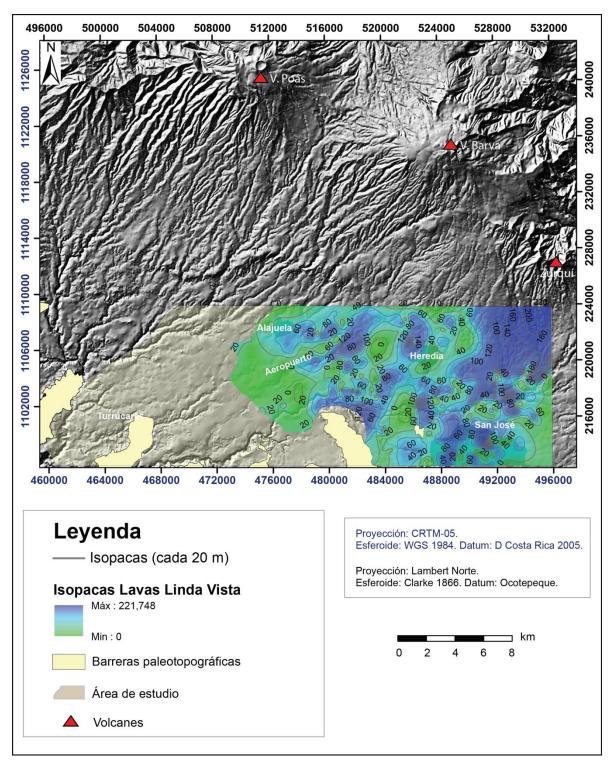


Figura 4.29: Isopacas de las Lavas Linda Vista.

## 4.2.5 Debris Avalanche El Coyol

Integrando las evidencias encontradas en los afloramiento mencionados anteriormente y el análisis de los registros de perforaciones se plotearon las isohipsas del *debris avalanche* El Coyol. Para lo cual se utilizaron datos de 353 registros de perforación, correspondiendo la mayoría a datos del SENARA y en menor medida a los proyectos hidroeléctricos Virilla y Garita. Estas perforaciones se ubican en las hojas topográficas Abra, Barva, Naranjo y Río Grande. Además, se utilizan datos de 21 localidades (figura 4.30).

En la figura 4.31 se muestran las isohipsas del *debris avalanche*, así como su extensión superficial (dentro del área de estudio), que corresponde con 121 km<sup>2</sup>. Su espesor máximo se observa en la localidad de Ánimas (al oeste de El Coyol), donde muestra 152 m de espesor en el pozo NA-196. Su espesor promedio es 27,25 m. En el cuadro 4.6 se muestran sus características.

Esta unidad se ubica en el sector occidental del Valle Central, desde el norte del área de estudio, en Alajuela y continua hacia el suroeste, cubriendo parcialmente el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, así como las localidades de Ciruelas, La Guácima, Nuestro Amo, Siquiares, Turrúcares y Cebadilla. Existen altos topográficos que fungieron como barreras, limitando el desplazamiento y depositación de esta unidad, como en el caso del cerro Candelaria (Fm. Peña Negra, Fm. Turrúcares y Grupo Aguacate). Además, los cerros de Macho Chingo (Grupo Aguacate) que delimitan el área de estudio al oeste, también son una barrera topográfica.

En las figuras 4.32 y 4.33 se muestran sus líneas de flujo y la distribución de sus isopacas respectivamente.

Cuadro 4.6: Características de la unidad debris avalanche de El Coyol.

Cantidad de perforaciones	Espesor promedio (m)	Espesor máximo (m)	Área (km²)	Volumen con espesor promedio (km³)	Volumen con integrales (km³)	Edad (ka)
353	27,25	152 (NA- 196)	121	3,3	3,1	?

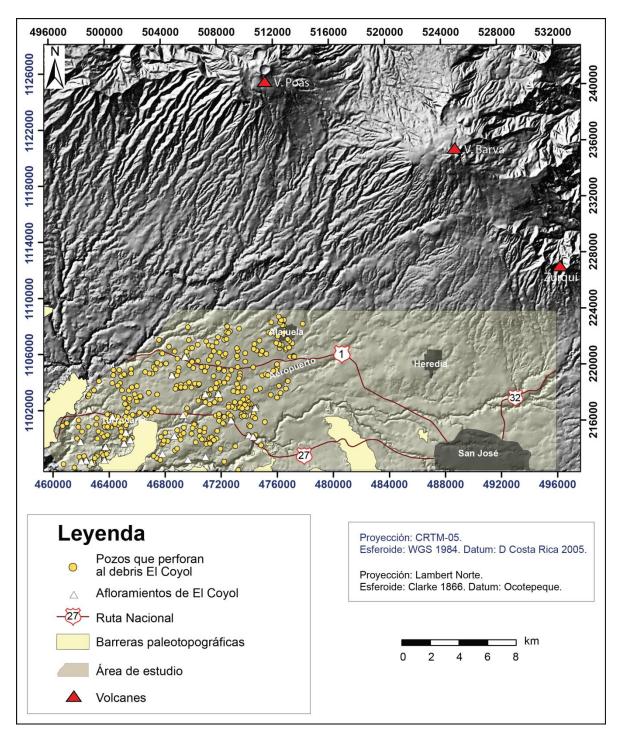


Figura 4.30: Perforaciones y afloramientos del depósito de debris avalanche El Coyol.

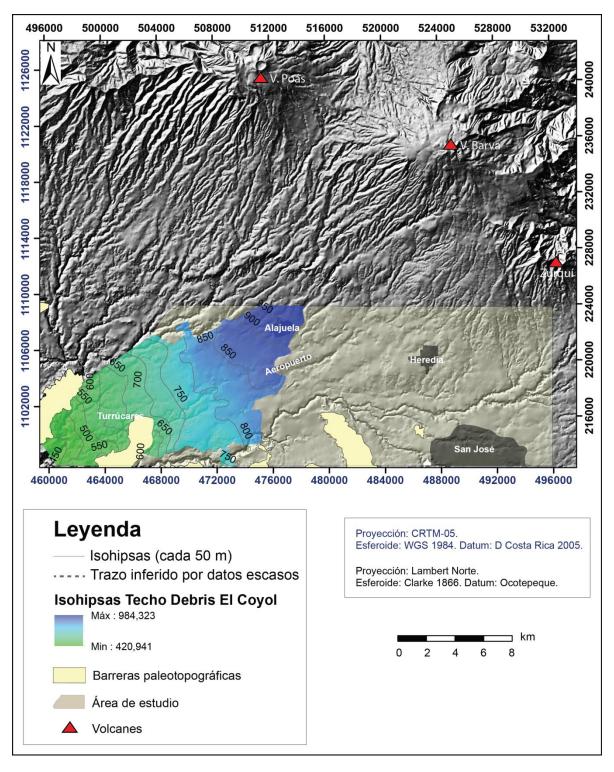


Figura 4.31: Isohipsas del depósito de debris avalanche El Coyol.

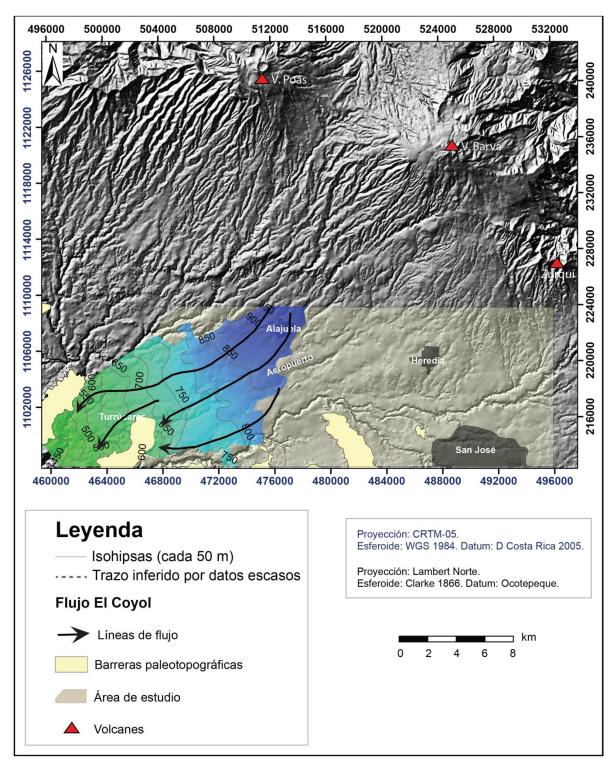


Figura 4.32: Líneas de flujo de depósito de debris avalanche El Coyol.

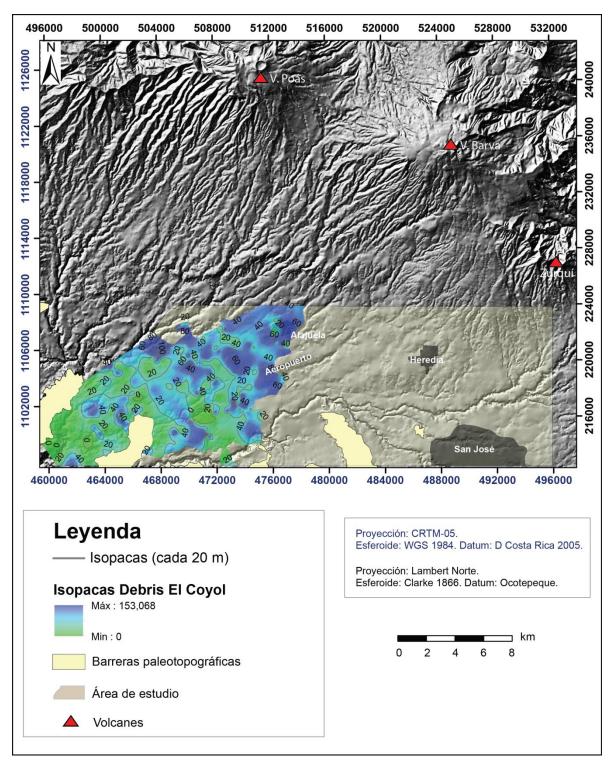


Figura 4.33: Isopacas del depósito de debris avalanche El Coyol.

## 4.3 Modelo vulcanoestratigráfico

Después del análisis exhaustivo de los registros de perforación, su correlación con las dataciones radiométricas y el modelado de las isohipsas, líneas de flujo e isopacas de las unidades de interés, en esta sección se propone un modelo vulcanoestratigráfico que se ajusta a los datos e información observada.

La génesis de las lavas de Belén y Linda Vista, se asocia con dos fracturas volcanotectónicas. La primera (de este a oeste) se ubica al pie del Zurquí, cuya orientación es ~N18°W, de la cual se emiten coladas de lava asociadas a las lavas de Belén y Linda Vista, correspondiendo con esta dirección se muestra una serie de conos piroclásticos alineados (Rojas et al., 2017). La segunda fractura ubicada en el piso del Valle Central, muestra una orientación ~N40°W y se logra determinar por medio del modelado de las isohipsas de la lava de Belén, dicha estructura se ubica hacia el oeste del Cerro Palomas en las cercanías del centro penitenciario La Reforma. Como se señaló con anterioridad, se han logrado determinar una serie de coladas de lava asociadas a estas unidades, 5 para Belén y 6 para Linda Vista, sin embargo, debido a que estas se logran determinar únicamente por medio de la presencia de paleosuelos o tobas, se considera un número mínimo de coladas de lava. El resto de las unidades Belén y Linda Vista corresponde con lavas compuestas, es decir, varias coladas de lava sobrepuestas que no se logran identificar una de la otra. Por lo que el término adecuado para referirse a estas es campo de lava.

En la siguiente figura (4.34) se muestran los lugares sugeridos de donde pudieron haber emergido las lavas de Belén y Linda Vista.

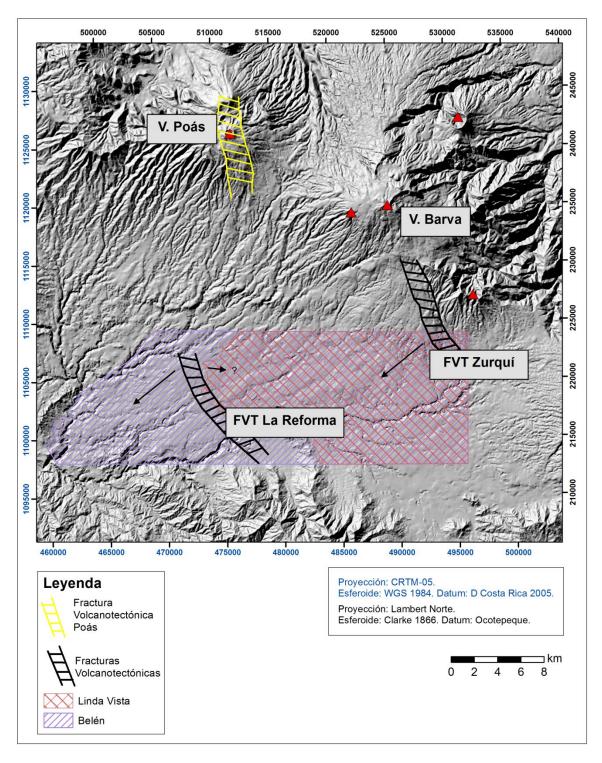


Figura 4.34: Propuesta de las fracturas volcanotectónicas (FVT) que dieron origen a los campos de lava Belén y Linda Vista.

El campo de lava Belén es una secuencia de extensión temporal de 223 ka, que muestra un volumen total de 18,4 km<sup>3</sup>. Cuyo espesor aparente máximo es de 140 m, y su espesor

aparente promedio es de 29 m. El origen de estas lavas corresponde con las dos estructuras volcanotectónicas indicadas. Sin embargo, no se ha podido diferenciar macroscópicamente las que se originan en una fractura de las que se originan en la otra. Por lo cual, aunque su origen corresponda a dos estructuras diferentes, se considera un único campo de lava. Sin embargo, la morfología superficial de las lavas ubicadas hacia el este del valle central es mucho más regular y suave, a diferencia de las ubicadas en el sector oeste, que muestran una serie de lomitas a partir de las cuales se logra determinar la dirección de la estructura. Las lavas que se originan al pie del Zurquí se extiende aproximadamente por 21 km, esto guiándose por la morfología paleotopográfica, mientras que las originadas en la estructura occidental muestran una longitud máxima recorrida de 15 km.

El campo de lava Linda Vista, comprende una extensión temporal de 40 ka, con un volumen asociado de 12,3 km<sup>3</sup>. Su espesor aparente máximo es de 219 m y su espesor aparente promedio de 43,28 m. Estas se originan en la estructura volcanotectónica Zurquí y muestran una longitud máxima de 15 km.

Se ha realizado una columna esquemática con las unidades determinadas por medio de registros de perforación. Como se ha indicado con anterioridad, se identifican cinco unidades ignimbríticas, las dos más jóvenes corresponden con Puente de Mulas (440 ka) y Tiribí (322 ka). Se determina, además, la presencia de otras tres unidades ignimbríticas, siendo estas más antiguas que lava Belén, las cuales son denominadas informalmente, Ignimbrita1, Ignimbrita 2 e Ignimbrita 3. Asimismo, se han identificado 5 campos de coladas de lava, asociándose tres de estos a las unidades ya conocidas, Barva, Linda y Belén, mientras que los restantes, denominados Lava 1 y 2, se identifican por primera vez en el piso del Valle Central (Figura 4.35).

El esquema de la Proto-Cordillera, Paleo-Cordillera y Neo-Cordillera (Alvarado & Gans, 2012), ha sido revisado en el presente trabajo, manteniéndose rangos similares a los propuestos por dichos autores. La edad de la Proto-Cordillera se mantiene, de 1200 ka a 859 ka. Su inicio se asocia con las lavas de La Selva y su finalización con la ignimbrita de San Jerónimo (859 ka). Cronológicamente, también corresponden a este periodo la lava de Siquirres (980 ka) y la lava de Zurquí (889 ka), además de las unidades informales propuestas, Lava 1 y Lava 2.

La Paleo-Cordillera inicia a los 758 ka, con el emplazamiento de los primeros flujos lávicos asociados a la Lava Belén (que han sido datados al suroeste del Valle Central). La génesis de estos materiales se asocian a dos fracturas volcanotectónicas ubicadas en el Valle Central, que se han discutido anteriormente. Este campo de coladas de lava presenta dataciones asociadas hasta los 535 ka. Durante el emplazamiento de esta unidad se evidencian algunos eventos epiclásticos, así como la presencia de tobas intercaladas entre algunos de los flujos lávicos, por lo que se han podido identificar 5 coladas de lava. Incluye también la ignimbrita de Puente de Mulas, la cual ha sido señalada como proveniente

posiblemente del Zurquí (Alvarado & Gans, 2012), y el campo de lavas de Linda Vista (371-331 ka), en el cual se han identificado seis coladas de lava con tobas intercaladas. La génesis de esta unidad corresponde con la fractura volcanotectónica ubicada al pie del Zurquí (ver capítulo anterior). El evento ignimbrítico cataclísmico Tiribí (322 ka) da cierre a la Paleo-Cordillera, con la destrucción parcial del volcán Barva. Se asocian además los eventos efusivos e ignimbríticos presentes en la cordillera como, las lavas de Río Lajas (Zurquí), de edad 500 hasta 400 ka; también se incluyen las ignimbritas de Bajo La Hondura (500-490 ka) y Sarapiquí (550 ka). Teniendo esto en consideración, la Paleo-Cordillera comprende un periodo de más de 400 ka, en el cual se muestra actividad muy explosiva (ignimbritas) y efusiva (coladas de lava). La actividad efusiva se asocia tanto al frente volcánico (eje de la cordillera), como a las estructuras volcanotectónicas transversales. Por otra parte, la actividad explosiva se asocia al frente volcánico.

La Neo-Cordillera se origina a los 290 ka (K/Ar), esta edad corresponde con una lava ubicada en las cercanías del río Turú (Soto, 2009, en Alvarado & Gans 2012). Dicha lava, fue correlacionada anteriormente al campo de flujos de lava Linda Vista (Alvarado & Gans, 2012). Sin embargo, al ser más joven que la ignimbrita Tiribí (322 ka) se propone sea el inicio de la Neo-Cordillera, la cual comprende al Campo de Lavas Barva y los depósitos epiclásticos asociados, como es el caso del *debris avalanche* El Coyol, además de algunos paquetes de tobas. Esta fase se mantiene hasta el presente. En la figura 4.36 se muestra la correlación de las unidades presentes en la cordillera y en el piso del Valle Central.

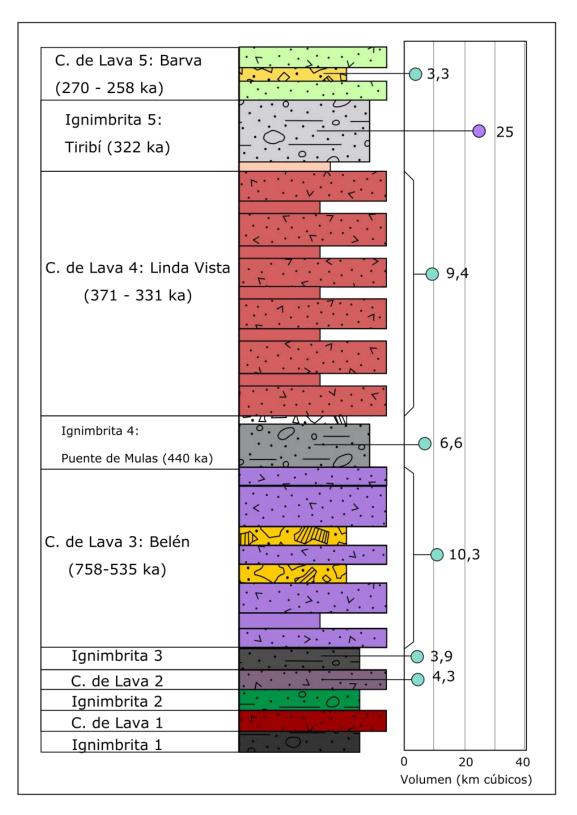


Figura 4.35: Columna esquemática de unidades presentes en el piso volcánico del Valle Central (Se muestran los volúmenes calculados en la presente investigación, el volumen de Tiribí se toma de Pérez, 2000).

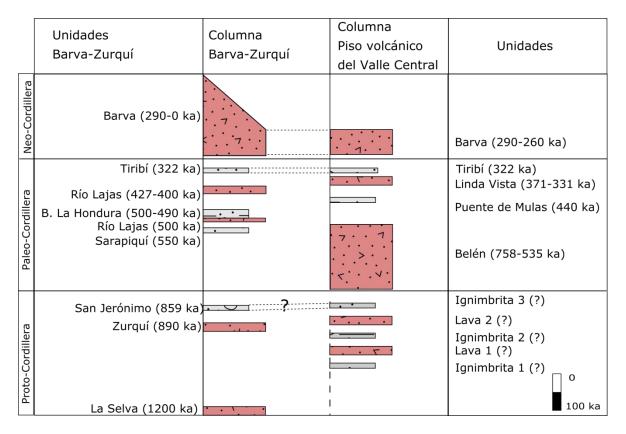


Figura 4.36: Correlación entre las unidades (efusivas e ignimbríticas) presentes en la cordillera y el piso del Valle Central.

En la figura anterior se muestran una serie de espacios vacíos en la escala temporal, esto puede deberse ya sea a la presencia de hiatos geológicos o, que existan unidades que no se han datado.

Debido a que algunas de las unidades que se describen en el presente trabajo corresponden con unidades formales, se hace un breve resumen de las equivalencias entre estas, así como con la Proto-Cordillera, Paleo-Cordillera y Neo-Cordillera (cuadro 4.7).

Cuadro 4.7: Equivalencias entre las unidades del piso del Valle Central y las formaciones geológicas asociadas.

	Formación	Unidades	
Neo- Cordillera (290-0 ka)	Barva	Barva (con El Coyol intercalado)	
	Tiribí	Tiribí	
Paleo-		Linda Vista	
Cordillera	Colima	Puente de Mulas	
(758-322 ka)	Comma	Belén (con Nuestro Amo intercalado)	
		Ignimbrita 3	
Proto-		Lava 2	
Cordillera		Ignimbrita 2	
(1200-895 ka)		Lava 1	
		Ignimbrita 1	

Anteriormente se señaló la existencia de lavas e ignimbritas que podrían correlacionarse con las unidades propuestas en el piso del Valle Central, como el caso de la Ignimbrita San Jerónimo (Ignimbrita 3). Sin embargo, para las unidades campo de lava 1 y 2, ubicadas en el piso del Valle Central, se considera que su origen no corresponde con el eje volcánico. Estas unidades posiblemente sean un caso análogo a los campos de lava Belén y Linda Vista, emplazándose por medio de fracturas volcanotectónicas. Sin embargo, no existe ningún indicio en la paleomorfología de dichas unidades que sustente esta propuesta.

Echandi (1981) realiza un valioso aporte a la estratigrafía del Valle Central, el cual se realiza con un número limitado de registros de perforación (26). Sin embargo, el presente estudio contempla un mayor volumen de información (más de 1300 registros de perforación) e incorpora dataciones radiométricas que no existían al momento de proponerse el modelo que data del año 1981. Por lo que, se ha logrado identificar una serie de lavas e ignimbritas hasta ahora conocidas. Se ha podido determinar además, que el campo de lavas Linda Vista muestra seis coladas de lava, en contraposición con las dos señaladas por Echandi (1981). En el modelo anterior, considera que las lavas Belén y Linda Vista se originan en los volcanes de la Cordillera Central, lo cual, se descarta en el presente trabajo, al asociar su origen a dos fracturas volcanotectónicas, que se hipotetizaron anteriormente por diversos autores.

### 4.3.1 Comparación con el campo de lavas de Cervantes

Se hace la comparación (cuadro 4.8) del campo Linda Vista con el campo de lava Cervantes (Alvarado & Vega, 2013), ambos se emplazan en ~40 ka. Para ello, se determinan los parámetros que corresponderían con una colada de Linda Vista. Vale aclarar que dichos valores se asocian a un número mínimo de seis coladas de lava, esto debido a

que estas se pueden identificar únicamente al existir una unidad o capa geológica (p. ej.; tobas y paleosuelos), que haya sido reportada en los registros de perforación. De hecho, en los campos de lava, es común que se muestren varias coladas que no se pueden diferenciar entre sí, formando coladas compuestas. Asimismo, el valor de la longitud utilizado corresponde con el campo de lava y no con una colada, esto debido a la dificultad de determinar este valor de forma certera.

No se realiza el análisis comparativo con Belén, debido a que se considera que para un campo de lavas que emplaza durante más de 200 ka, es poco probable que este se componga únicamente de 5 coladas, sin embargo, dicha cantidad fue las que se pudo determinar en los registros de perforación.

Cuadro 4.8: Dimensiones de las coladas de lava de Cervantes según Alvarado & Vega (2013) y el volumen calculado para una colada de Linda Vista (en el caso de la colada Cervantes occidental se utiliza el valor máximo de espesor).

	Linda Vista	Cervantes oriental	Cervantes occidental
Espesor medio (m)	43,3	3	<20
Longitud máxima (km)	21	10,7	7,7
Volumen (km <sup>3</sup> )	2,0	1,1	0,2
Composición	Andesita hasta andesita-basáltica	Andesítica- basáltica	Basáltica hasta andesítica-basáltica

Se observa que la colada de Linda Vista muestra los valores mayores en cuanto a espesor medio, longitud máxima y volumen. Sin embargo, a pesar de que estos valores son mayores respecto a la colada de Cervantes oriental, ambos se mantienen dentro del mismo orden de magnitud.

# 5 Conclusiones

- Se actualizó el modelo litoestratigráfico del Valle Central. A partir de 1395 registros de perforación (101 169 m) se determinó que el piso del Valle Central se compone de cinco eventos ignimbríticos y cinco campos de lavas.
- Los dos eventos ignimbríticos más jóvenes se asocian a Tiribí (322 ka) y Puente de Mulas (440 ka). Los campos de lava, con Barva (290-0 ka), Linda Vista (371-331 ka) y Belén (758-535 ka). Existen tres eventos ignimbríticos y dos campos lávicos contemplados hasta la presente investigación. La ignimbrita ubicada justo bajo el campo de lava Belén se puede correlacionar con la Ignimbrita San Jerónimo.
- La Formación Barva, y los Miembros Belén y Linda Vista son campos de lavas, los cuales tienen extensión temporal variable desde 40 hasta 290 ka.
- El depósito de *debris avalanche* El Coyol y Nuestro Amo, no son correlacionables temporalmente. Nuestro Amo se encuentra intercalado en el campo de lava Belén, mientras que El Coyol (≤ 322 ka) se correlaciona con el campo de lavas Barva.
- Se proponen dos estructuras volcanotectónicas, las cuales corresponderían con la fuente del campo de lava Belén y Linda Vista. La estructura oriental muestra una dirección ~N18°W, la occidental ~N40°W. La primera se localiza al pie de los cerros Zurquí y la segunda hacia el oeste del cerro Palomas en las cercanías del centro penitenciario La Reforma.
- El campo de lavas Belén se emplaza sobre la secuencia sedimentaria del Mioceno y una serie de intercalaciones de lavas e ignimbritas.
- El campo de lava de Belén presenta un volumen mínimo (acotado al área de estudio) de 18,4 km³, un área superficial de 356 km², un espesor aparente máximo de 140 m y 29 m promedio, que identificó en 474 perforaciones un total de 5 coladas de lava separadas por tobas y depósitos epiclásticos.
- El campo de lava de Linda Vista presenta un volumen (acotado al área de estudio) de al menos 12,3 km³, un área superficial de 219 km², un espesor aparente máximo de 219 m y 43 m promedio. Se identificó en 406 perforaciones y consta de 6 coladas de lava separadas por tobas.
- La ignimbrita Puente de Mulas (440 ka) presenta un volumen dentro del área de estudio de 5,7 km³ y cubre un área de 264 km². El espesor aparente promedio de la unidad es 25 m y el máximo de 75 m. Las isohipsas determinadas esta unidad parecen indicar que esta provino de un foco volcánico cercano al cerro Zurquí.
- El Coyol es un depósito de *debris avalanche* localizado en el sector occidental del Valle Central. Este presenta un área de por lo menos 121 km<sup>2</sup> y un volumen mínimo de de 3,1 km<sup>3</sup>. Este se ha observado en 353 registros de perforación.
- Las líneas de flujo calculadas para cada unidad volcánica estudiada, sugieren que tanto los flujos lavas como los ignimbríticos se desplazaron en una dirección preferencial noreste-suroeste.

- La Proto-Cordillera inicia hace 1200 ka con la Lava La Selva y concluye con la Ignimbrita San Jerónimo de 859 ka, como señalan Alvarado & Gans (2012). La Paleo-Cordillera inicia con el emplazamiento de las lavas de Belén hace 758 ka y finaliza con el evento ignimbrítico cataclísmico de Tiribí, de edad 322 ka. El campo de lavas Linda Vista y la Ignimbrita Puente de Mulas se asocian a esta fase. La Neo-Cordillera se extiende desde 290 ka hasta el presente y se asocia al campo de lava Barva y depósitos epiclásticos asociados.
- No se ha evidenciado en los registros de perforación las ignimbritas de Bajo La Hondura y Sarapiquí.
- Existen depósitos de *debris avalanche* que se pueden asociar al Grupo Aguacate y al campo de lavas Belén.

#### 6 Recomendaciones

- Realizar análisis geoquímicos a la Ignimbrita San Jerónimo, para buscar su afinidad con los focos volcánicos de la Cordillera Central.
- La unidad El Coyol merece un trabajo a detalle, para determinar su extensión fuera del área de estudio, y hacer comprobaciones de campo e intentar acotar su rango de edad, así mismo, identificar el área fuente de este depósito, posiblemente correspondiente al volcán Poás o Barva.
- Con los datos de registros de perforación se puede hacer un modelado en tres dimensiones que ayude a comprender mejor el comportamiento de las unidades principales.
- La posibilidad de hacer una campaña geofísica para buscar evidencias asociadas a las estructuras volcanotectónicas, sería un aporte importante.
- Hacer un análisis de los esfuerzos para explicar la divergencia respecto al sigma 1 regional.
- Realizar análisis geoquímicos de las lavas originadas en las dos fracturas volcanotectónicas propuestas, con el fin de determinar si existe alguna variación en sus características, con el fin de dilucidar si existe o no una fuente común entre sí.
- Analizar también por medio de geoquímica a la Ignimbrita Puente de Mulas, para posteriormente hacer la comparación de su firma geoquímica respecto a la Ignimbrita Tiribí (de esta última existe abundante información), con el objeto de evaluar sus eventuales similitudes y diferencias, dado que son los dos últimos eventos volcano-destructivos registrados en el Valle Central.
- Evaluar de forma más detallada los volúmenes, considerando la erosión que ha afectado a las rocas, además de extender el área de trabajo para lograr identificar de forma más certera su extensión y volumen.
- Crear un centro de recolección de núcleos de perforaciones para enriquecer la investigación geológica en el país, de manera tal que esté a disposición de los investigadores para consulta permanente. También se le recomienda a las instituciones públicas, especialmente al SENARA, aceptar solamente aquellos informes de perforación que contengan la información litológica completa.
- Con la información generada en el presente estudio se puede actualizar el modelo hidrogeológico.

#### 7 Referencias

- ALVARADO, G. E., 1984: Aspectos Petrológicos-Geológicos de los Volcanes y Unidades Lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica.- xii + 183 págs. Escuela Centroamericana de Geología Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- ALVARADO, G. E., VEGA, E., CHAVES, J. & VÁSQUEZ, M., 2004: Los grandes deslizamientos (volcánicos y no volcánicos de tipo *debris avalanche* en Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, 30:83-99.
- ALVARADO, G.E. & GANS, P., 2012: Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. Rev. Geol. Amér. Central, 46:7-122.
- ALVARADO, G.E. & VEGA, A.E., 2013: Le geomorfología de la colada de Cervantes, volcán Irazú (Costa Rica): descripción de uno de los campos de lava más grandes de América Central. Rev. Geol. Amér. Central, 48: 99-118.
- ASTORGA, Y., 2014: Situación del recurso hídrico. En: Decimocuarto Informe Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible.-60 págs. Gobierno de la República, San José, Costa Rica.
- BELLON, H., & TOURNON, J., 1978: Contribution de la géochronométrie K/Ar l' étude du magmatisme de Costa rica, Amérique Central.- Bull. Soc. Geól. de France, 20(6): 955 959.
- BORGIA, A., BURR, J., MONTERO, W., MORALES, J. D. & ALVARADO, G.E., 1990: Fault propagation induced by gravitational failure and slumping of Central Costa Rica Volcanic Range: Implications for large terrestrial and martian volcanic edifices. Journal of Geophysics Research, 95 B9:14,357 14,382.
- BONILLA, M., 2012: Modelado geofísico mediante el uso de refracción sísmica, del área comprendida por los Sitios de Presa Electriona y Belén, Heredia, Costa Rica. 149 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- Brenes, M. A., 1967: Contribución a la geología del Valle Central Occidental (Hoja Turrúcares). 135 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- CASTILLO, R., 1969: Geología de los mapas Abra y partes de Río Grande, Costa Rica. 40 págs. DGMP, San José [Inf. Técnico].
- CROSBY, I., 1945: Geología del cañón del río Virilla, en la Meseta Central Occidental de Costa Rica. Depto. Nac. Agrícola. Bol. Técnico, 49: 1 19.

- DENGO, G. & CHAVERRI, G., 1951: Reseña geológica de la región sudoeste de la Meseta Central de Costa Rica. Rev. Univ. Costa Rica, 5: 313 326.
- DENGO, G., 1961: Notas sobre la geología de la parte central litoral pacífico de Costa Rica.

   IGN, Informe Semestral II 1960 jul dic., 60: 43 58.
- DENYER, P. & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, 12: 1 59.
- ECHANDI, E., 1981: Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del Río Virilla. 123 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- ERISMANN, T.H., 1979: Mechanisms of large landslides. Rock Mech. Rock Eng. 12: 15. doi: 10.1007/BF01241087.
- FERNÁNDEZ, M., 1969: Las unidades hidrogeológicas y los manantiales de la vertiente norte del río Virilla. 45 págs. SENAS. San José, Costa Rica.
- GANS, P.B., Alvarado-Induni, G., Pérez, W., MacMillan, I. & Calvert, A., 2003: Neogene evolution of the Costa Rican arc and development of the Cordillera Central.- Geol. Soc. Amer., Cordilleran Section, 99<sup>th</sup> annual metting, Abstracts with Programs (April 1 3, Puerto Vallarta).- Geol. Soc. Amer., 35(4): 74.
- GAZEL, E. & RUIZ, P., 2005: Los conos piroclásticos de Sabana Redonda: componente magmático enriquecido del volcán Poás, Costa Rica. –Rev. Geol. Amér. Central, 33: 45 60.
- GÓMEZ, A., 1987: Evaluación del potencial de los acuíferos y diseño de las captaciones de agua subterránea en la zona de Puente Mulas, Provincia de Heredia, Costa Rica:-150 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- GUTSCHER, M. A., MAURY, R., EISSEN, J.P. & BOURDON, E., 2000: Can slab melting be caused by flat subduction?.- Geology, 28 (6): 535 538.
- HANNAH, R.S., VOGEL, T.A., PATINO, L.C., ALVARADO, G.E., PÉREZ, W. & SMITH, D. R., 2002: Origin of silicic volcanic rocks in Central Costa Rica: a study of a chemically variable ash-flow sheet in the Tiribí Tuff. –Bull. Volcanol. 64: 117 133.
- HEIM, A., 1932: Bergsturz und Menchenleben. Zurich. Vierteljahrsschrift 77 (20): 218.
- KILBURN, C. R. J., 2000: Lava flows and lava fields. En: Sigurdsson, H.: Encyclopedia of volcanoes. -1417 págs. Academic Press, San Diego.

- Kussmaul, S., 1988: Comparación petrológica entre el piso volcánico del Valle Central y la Cordillera Central de Costa Rica. Rev. Ciencia y Tecnología, 12 (1 2): 109-116.
- Kussmaul, S., & Sprechamann, P., 1982: Estratigrafía de Costa Rica (América Central), II: Unidades litoestratigráficas ígneas. V Congreso Latinoamericano de Geología, Buenos Aires. Acta N.º 1: 73 79 págs.
- KUSSMAUL, S. & THORPE, R.S., [s.f.]: Petrogenesis of Pliocene-Recent Volcanic Associations of the Meseta Central of Costa Rica. 25 págs. [Artículo inédito].
- MALAVASSI, E. & MADRIGAL, R., 1967: Reseña Geológica del Área Metropolitana de Costa Rica. 12 págs. Dirección de Geología y Minas, Min. de Ind. y Comercio [Inf. Técnico].
- MADRIGAL, R., 1970: Geología del mapa básico "Barranca", Costa Rica. Inf. Técnico y Notas Geológicas DGMP, 9 (37): 1 59.
- MANA, S., RUIZ, P. & SOTO, G.J., 2015: New <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages and their implications in our unterstanding of the evolution of Póas volcano, Costa Rica. XII Congreso Geológico de América Central, Managua, Nicaragua.
- MARSHALL, J, S., DELMAN, B. D., GARDNER, T.W. & FISCHER, D. M., 2003: Landscape evolution within a retrating volcanic arc, Costa Rica, Central America. Geol. Soc. of Amer. 31(5): 419 422.
- MÉNDEZ, J. & HIDALGO, P., 2004: Descripción del depósito de Debris Avalanche El Coyol, Formación Barva, Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, 30: 199 202.
- MONTERO, W., & MORALES, L.D., 1990: Deformación y esfuerzos neotectónicos en Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, 11: 69 84.
- MONTERO, W., 1999: El terremoto del 4 de marzo de 1929 (Ms 7,0): ¿Un gran terremoto interplaca relacionado con el límite incipiente entre la placa Caribe y la microplaca Panamá?. –Rev. Geol. Amér. Central, 22: 25 62.
- MONTERO, W., 2001: Neotectónica de la Región Central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá. Rev. Geol. Am. Central, 24: 29 56.
- O.N.U., 1975: Investigaciones de aguas subterráneas en zonas seleccionadas. 261 págs. Organización de Naciones Unidas. [Inf. Técnico].

- PÉREZ, W., 2000: Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico del Pleistoceno Medio (0,33 Ma) del Valle Central de Costa Rica. 170 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- PÉREZ, W., ALVARADO, G.E. & GANS, P., 2006: The 322 ka Tiribí Tuff: stratigraphy, geochronology and mechanisms of deposition of the largest and most recent ignimbrite in the Valle Central, Costa Rica. Bol. Vulcanol., 69: 25 40.
- PORRAS, H., CASCANTE, M, GRANADOS, R. & ALVARADO, G.E., 2012: Volcano-estratigrafía y tectónica del Valle Central Occidental y las estribaciones de los Montes de Aguacate a lo largo de la Ruta 27, Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, 47: 69 93.
- PROTTI, R., 1986: Geología del flanco sur del Volcán Barva, Heredia, Costa Rica. –Bol. Vulcanol. Univ. Nac., 17: 23 31.
- RUIZ, P., GAZEL, E., ALVARADO, G.E., CARR, M.J. & SOTO, G.J., 2010: Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del volcán Poás, Costa Rica.- Rev. Geol. Am. Central, 43: 37 66.
- ROJAS, V., BARAHONA, D. & ALVARADO, G.E., 2017: Geomorfología y petrografía de la colada Ángeles y del cono Monte de la Cruz, volcán Barva, Costa Rica. Rev. Geol. Am. Central, 56: 17 35.
- ROMANES, J., 1912: Geology of part of Costa Rica. The Quarterly Journal of the Geological Society. London, 68: 103 139.
- SCHINDLBECK, J.C., KUTTEROLF, S., FREUNDT, A., ALVARADO, G.E., WANG, K.-L., STRAUB, S.M., HEMMING, S.R., FRISCHE, M. &WOODHEAD, J.D., 2016: Late Cenozoic tephrostratigraphy offshore the southern Central American Volcanic Arc: 1. Tepha ages and provenance.-Geochem. Geophys. Geosyst., 17, doi: 10.1002/2016GC006503.
- SCHAUFELBERGER, P., 1932: Un estudio elemental sobre la geología de Costa Rica. -La Escuela Costarricense 1 3: 1 56, San José.
- TERZOPOULOS, D., 1988: The computation of visible-surface representations. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 10 (4): 417 438.
- VAN WYK DE VRIES B., DELCAMP A., 2015: Volcanic Debris Avalanche, in Landslide Hazards, Risks and Disasters, p. 131 157 Elsevier.

- WILLIAMS, H., 1952: Historia Volcánica de la Meseta Central Occidental de Costa Rica. Publicaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de California, 29 (4): 145 180.
- WALKER, G., 2000: Basaltic volcanoes and volcanoes systems. En: Sigurdsson, H.: Encyclopedia of volcanoes. 1417 págs. Academic Press, San Diego.

# 8 Apéndices

- 1. Pozos reinterpretados y utilizados como guía para la subdivisión, interpretados previamente en la literatura
- 2. Petrografía de rocas recolectadas en el presente trabajo
- 3. Lista de perforaciones en donde se identificó a cada unidad
- 4. Afloramientos visitados en el desarrollo del presente estudio
- 5. Mapas ampliados respecto al área de estudio: de los pozos utilizados para definir cada unidad, de isohipsas y de isopacas

Perforaciones donde se identificó el debris avalanche El Coyol								
AB-1341	BA-278	AB-1944	NA-805	RG-711	RG-923	RG-226		
AB-2186	BA-379	AB-974	NA-381	RG-713	RG-932	RG-232		
AB-1205	BA-380	AB-2162	NA-460	RG-716	RG-934	RG-234		
AB-1808	BA-471	AB-2143	NA-261	RG-717	RG-937	RG-237		
AB-2137	BA-34	AB-1623	NA-376	RG-730	RG-941	RG-239		
AB-2373	BA-502	AB-1590	NA-610	RG-736	RG-943	RG-241		
AB-2368	BA-713	AB-760	NA-289	RG-737	RG-949	RG-242		
AB-2289	BA-41	AB-1967	NA-90	RG-741	RG-950	RG-246		
AB-2366	BA-464	AB-2260	AB-1734	RG-744	RG-101	RG-249		
AB-1582	BA-385	AB-2341	AB-1033	RG-747	RG-102	RG-250		
AB-1163	BA-46	AB-1378	RG-148	RG-755	RG-103	RG-251		
AB-707	BA-202	AB-1238	RG-237	RG-756	RG-110	RG-256		
AB-1907	BA-792	AB-1716	RG-308	RG-757	RG-111	RG-258		
AB-594	BA-367	AB-1173	RG-38	RG-761	RG-112	RG-265		
AB-2067	BA-619	AB-2166	RG-472	RG-772	RG-124	RG-269		
AB-1165	BA-622	BA-806	RG-484	RG-784	RG-13	RG-270		
AB-2375	BA-219	BA-131	RG-545	RG-79	RG-134	RG-274		
AB-1864	BA-655	BA-96	RG-561	RG-791	RG-140	RG-275		
AB-1516	BA-165	NA-900	RG-572	RG-802	RG-155	RG-276		
AB-509	BA-305	NA-534	RG-574	RG-805	RG-158	RG-278		
AB-749	BA-541	NA-954	RG-581	RG-811	RG-159	RG-279		
AB-994	BA-124	NA-285	RG-586	RG-815	RG-163	RG-283		
AB-1472	BA-542	NA-412	RG-587	RG-820	RG-172	RG-284		
AB-1377	BA-191	NA-86	RG-589	RG-836	RG-175	RG-289		
AB-1477	BA-462	NA-146	RG-599	RG-839	RG-180	RG-290		
AB-2421	BA-512	NA-747	RG-602	RG-853	RG-194	RG-294		
AB-2225	BA-253	NA-924	RG-606	RG-856	RG-199	RG-295		
AB-1315	BA-548	NA-288	RG-607	RG-861	RG-202	RG-298		
AB-1822	BA-750	NA-670	RG-608	RG-873	RG-206	RG-305		
AB-1350	BA-92	NA-481	RG-609	RG-876	RG-207	RG-306		
AB-2401	BA-437	NA-655	RG-628	RG-877	RG-208	RG-307		
AB-1567	BA-134	NA-155	RG-654	RG-884	RG-209	RG-310		
AB-988	BA-296	NA-88	RG-660	RG-885	RG-211	RG-311		
AB-1765	BA-195	NA-170	RG-664	RG-887	RG-214	RG-320		
AB-1641	BA-537	NA-192	RG-669	RG-891	RG-216	RG-321		
AB-1987	BA-122	NA-137	RG-685	RG-893	RG-217	RG-322		
AB-1938	BA-120	NA-196	RG-690	RG-899	RG-219	RG-330		
AB-2343	BA-673	NA-468	RG-703	RG-902	RG-222	RG-331		
AB-2287	BA-505	NA-716	RG-705	RG-905	RG-225	RG-332		
RG-333	RG-367	RG-415	RG-436	RG-501	RG-535	RG-69		

RG-334	RG-379	RG-416	RG-437	RG-502	RG-536	RG-70
RG-335	RG-380	RG-417	RG-439	RG-509	RG-538	PV-2
RG-338	RG-382	RG-418	RG-440	RG-512	RG-547	PVG-10
RG-339	RG-387	RG-426	RG-443	RG-513	RG-549	PVG-8
RG-354	RG-394	RG-427	RG-444	RG-517	RG-550	PVG-7
RG-356	RG-398	RG-429	RG-445	RG-519	RG-554	NA-472
RG-357	RG-399	RG-431	RG-451	RG-523	RG-556	AB-1992
RG-361	RG-402	RG-432	RG-452	RG-524	RG-560	
RG-362	RG-404	RG-433	RG-454	RG-528	RG-570	
RG-365	RG-405	RG-434	RG-467	RG-530	RG-576	
RG-366	RG-409	RG-435	RG-491	RG-534	RG-68	

Perforaciones donde se identificaron flujos de ignimbritas indiferenciables entre									
	sí								
AB-590	AB-731	AB-2515	AB-1857	AB-1461	RG-934				
AB-877	AB-1474	AB-1348	AB-1566	AB-1424	RG-276				
AB-1572	AB-342	AB-1239	AB-2320	AB-1278	RG-950				
AB-1386	AB-642	AB-553	AB-1865	AB-1404	RG-628				
AB-538	AB-564	AB-2403	AB-2374	AB-1438	RG-681				
AB-1099	AB-686	AB-691	AB-1638	AB-1779	RG-427				
AB-2188	AB-1208	AB-1482	AB-1148	AB-708	RG-333				
AB-842	AB-883	AB-523	AB-1393	AB-1302	RG-843				
AB-2392	AB-2108	AB-557	AB-354	AB-1900	AB-2249				
AB-2149	AB-649	AB-1661	AB-2382	AB-2073	AB-1342				
AB-1908	AB-2484	AB-517	AB-1975	AB-1481	AB-1669				
AB-1432	AB-1636	AB-1496	AB-1200	AB-2138	AB-2305				
AB-1409	AB-1356	AB-1236	AB-1247	AB-1528	RG-713				
AB-898	AB-1942	AB-1659	AB-2268	AB-1970	AB-1425				
AB-2128	AB-1811	AB-2271	AB-1805	RG-535	AB-1420				
AB-1853	AB-2150	AB-1362	AB-2293	RG-757	AB-1856				
AB-1845									

	Perforaciones donde se identificó Linda Vista								
AB-1697	BA-500	AB-1531	AB-1023	AB-469	AB-2490	AB-478			
AB-2111	BA-925	AB-216	AB-2491	AB-644	AB-1917	AB-658			
AB-1117	BA-474	AB-2358	AB-2109	AB-577	BA-81	AB-1060			
AB-1963	BA-272	AB-1993	AB-2274	AB-1546	BA-473	AB-722			
INV-76	BA-450	AB-1799	AB-1336	AB-483	AB-2181	AB-626			
AB-1447	BA-506	AB-543	AB-2286	AB-562	AB-1600	AB-471			
AB-1279	BA-587	AB-1191	AB-2327	AB-534	AB-1515	AB-697			
AB-2370	BA-163	AB-1162	AB-2483	AB-459	AB-1790	AB-555			
AB-548	BA-451	AB-1177	AB-1877	AB-2339	AB-1142	AB-1418			
AB-1778	BA-609	AB-550	AB-992	AB-2282	AB-1926	AB-1825			
AB-1714	BA-643	AB-206	AB-1809	AB-1442	AB-2460	AB-2496			
AB-1880	BA-642	AB-1512	AB-1521	AB-1443	AB-2045	AB-448			
AB-1904	BA-207	AB-1542	AB-1310	AB-2124	AB-1397	AB-1460			
AB-1881	BA-57	AB-2518	AB-2284	AB-2043	AB-1903	AB-2411			
AB-1328	BA-527	AB-2144	AB-1194	AB-843	AB-467	AB-2291			
AB-462	BA-179	AB-1664	AB-1788	AB-701	AB-1198	AB-453			
AB-2050	BA-597	AB-817	AB-1996	AB-951	AB-1017	AB-1516			
AB-1402	BA-600	AB-2110	AB-1738	AB-1089	AB-1657	AB-2183			
AB-699	BA-387	AB-336	AB-1225	AB-1690	AB-2134	AB-1726			
AB-1606	BA-475	AB-2065	AB-1333	AB-1318	AB-2517	AB-1036			
AB-484	BA-583	AB-1654	AB-667	AB-665	AB-2212	AB-604			
AB-1295	BA-776	AB-1449	AB-2495	AB-1400	AB-470	AB-1737			
AB-1803	BA-522	AB-1450	AB-2277	AB-497	AB-1035	AB-710			
AB-1921	BA-532	AB-738	AB-2466	AB-2283	AB-1132	AB-531			
AB-1227	BA-817	AB-1395	AB-1684	AB-463	AB-2276	AB-2107			
AB-1471	BA-917	AB-908	AB-806	AB-1202	AB-1875	AB-747			
AB-2486	BA-719	AB-1192	AB-603	AB-285	AB-574	AB-2469			
AB-1735	BA-426	AB-909	AB-104	AB-454	AB-1670	AB-1603			
AB-739	BA-661	AB-511	AB-105	AB-335	AB-659	AB-1930			
AB-2379	BA-140	AB-1616	AB-2199	AB-1347	AB-763	inv-26			
AB-1439	BA-832	AB-1652	AB-2004	AB-334	AB-2282	AB-1338			
AB-2148	BA-657	AB-2071	AB-1855	AB-332	AB-520	AB-1747			
AB-59	BA-135	AB-2444	AB-1841	AB-1564	AB-1173	AB-1382			
AB-5	BA-158	AB-2505	AB-1947	ab-723	BA-168	AB-1675			
AB-1642	BA-394	AB-1508	AB-2184	AB-735	BA-492	AB-132			
AB-1150	BA-308	AB-1646	AB-176	AB-446	BA-897	AB-150			
AB-1608	BA-228	AB-2415	AB-2489	AB-331	BA-161	AB-180			
AB-2223	BA-164	AB-1282	AB-1836	AB-2042	AB-561	AB-181			
AB-1121	BA-227	AB-910	AB-31	AB-2044	AB-187	AB-1610			
AB-477	BA-479	AB-1973	AB-552	AB-1711	AB-1706	AB-913			

AB-927	BA-680	AB-1368	AB-1955	AB-1276	AB-1634	AB-656
AB-2301	BA-691	AB-1136	AB-1677	AB-1408	AB-1753	AB-902
AB-449	BA-471	AB-2477	AB-1523	AB-1212	AB-1141	AB-1892
AB-1274	BA-502	AB-1250	AB-500	AB-1570	AB-1830	AB-595
AB-1580	BA-713	AB-1639	AB-118	AB-1503	AB-635	AB-578
AB-1075	BA-792	AB-1001	AB-119	AB-1286	AB-989	AB-881
AB-2326	BA-468	AB-677	AB-2487	AB-1594	AB-2446	AB-549
AB-1018	BA-750	AB-704	AB-2422	AB-2336	AB-1541	AB-1158
AB-2503	BA-134	AB-2210	AB-2371	BA-796	AB-2026	AB-2253
AB-1585	BA-296	AB-660	AB-1682	AB-1828	AB-1277	AB-2057
AB-1598	BA-195	AB-2113	AB-43	INV-14	AB-1012	AB-1495
AB-1290	BA-924	AB-2152	AB-2376	AB-1775	AB-1964	AB-2313
AB-2117	BA-721	AB-1890	AB-1298	AB-2331	AB-249	AB-2429
AB-1110	BA-537	AB-1827	AB-2175	AB-2158	INV-206	AB-780
AB-2474	BA-673	AB-657	AB-1650	AB-2002	AB-2097	AB-1355
AB-2195	BA-806	AB-1733	AB-452	AB-2519	AB-2053	AB-2445
AB-2528	AB-2511	AB-490	AB-131	AB-684	AB-539	AB-2312
AB-2256	AB-2291	AB-1605	AB-950	AB-458	AB-2359	AB-1966

Perforaciones donde se identificó Puente de Mulas									
AB-2111	PV-4	AB-1603	AB-1654	AB-763	AB-1836	AB-2037			
INV-76	PV-5	AB-1383	AB-1450	AB-520	AB-1955	AB-353			
AB-548	PV-6	AB-1930	AB-908	AB-1035	AB-1677	AB-946			
AB-1714	PV-1	AB-1430	AB-1192	AB-1132	AB-1523	AB-2129			
AB-1880	PV-7	AB-1726	AB-909	AB-478	AB-500	AB-2263			
AB-1904	PV-2	AB-1534	AB-1741	AB-469	AB-2487	AB-1729			
AB-1881	AB-1269	AB-1036	AB-1188	AB-644	AB-2422	AB-803			
AB-1328	AB-539	AB-1544	AB-1157	AB-577	AB-1682	AB-709			
AB-462	AB-1516	AB-1459	AB-1184	AB-562	AB-2376	AB-875			
AB-2050	AB-1173	AB-1015	AB-1167	AB-459	AB-1298	AB-732			
AB-1402	BA-168	AB-1254	AB-511	AB-2339	AB-2175	AB-829			
AB-699	BA-492	AB-272	AB-1616	AB-1442	AB-452	AB-1884			
AB-484	BA-897	AB-582	AB-2071	AB-1443	AB-1382	AB-1776			
AB-1803	BA-161	AB-1098	AB-2444	AB-2124	AB-1675	AB-2048			
AB-1227	BA-500	AB-604	AB-2505	AB-2043	AB-132	AB-1923			
AB-2486	BA-925	AB-1737	AB-1508	AB-843	AB-150	AB-1843			
AB-1735	BA-643	AB-710	AB-1282	AB-1089	AB-1818	AB-1064			
AB-739	BA-917	AB-531	AB-910	AB-1202	AB-722	AB-662			
AB-1642	BA-164	AB-2026	AB-1973	AB-1347	AB-430	AB-1466			
AB-1608	BA-680	AB-1277	AB-1368	AB-723	AB-1830	AB-833			
AB-2223	BA-750	AB-1012	AB-1136	AB-1711	AB-635	AB-1951			

AB-2301	AB-2253	AB-637	AB-1001	AB-1276	AB-2358	AB-1233
AB-505	AB-1709	AB-1341	AB-677	AB-1408	AB-543	AB-892
AB-2503	AB-645	AB-2186	AB-2210	AB-1594	AB-790	AB-2229
AB-2117	AB-2194	AB-1205	AB-660	INV-238	AB-1191	AB-1796
AB-2256	AB-2085	AB-2137	AB-2113	AB-2336	AB-1162	AB-521
AB-458	AB-1862	AB-2368	AB-1890	AB-1618	AB-1177	AB-694
AB-950	AB-2496	AB-2366	AB-1827	AB-684	AB-2157	AB-673
AB-1605	AB-448	AB-1964	AB-657	AB-2469	AB-550	AB-672
AB-1600	AB-1248	AB-249	AB-1733	AB-823	AB-1664	AB-366
AB-1790	AB-1324	AB-1203	AB-490	AB-1670	AB-817	AB-1033
AB-2491	AB-1133	AB-1781	AB-656	AB-659	AB-2110	NA-560
AB-2109	AB-2513	AB-2481	AB-902	AB-667	AB-576	AB-1160
AB-2274	AB-1146	AB-1934	AB-1892	AB-2277	AB-1093	AB-1998
AB-2327	AB-1657	AB-1100	AB-595	AB-2466	AB-1489	AB-349
AB-2483	AB-2134	AB-1591	AB-578	AB-1684	AB-2212	AB-1539
AB-1877	AB-1266	AB-1163	AB-549	AB-2489	AB-2330	AB-1165
AB-1310	AB-1271	AB-1214	AB-626	AB-697	AB-555	AB-574
AB-1225	AB-522	AB-594	AB-471			

	Perforaciones donde se identificó Belén								
AB-548	AB-2253	AB-1165	AB-490	RG-932	AB-2362	RG-547			
AB-1714	AB-2201	AB-1982	AB-656	RG-937	AB-1561	RG-550			
AB-1880	AB-2057	AB-1385	AB-902	RG-943	AB-2534	RG-554			
AB-1904	AB-2313	AB-2209	AB-1892	RG-949	AB-1998	RG-556			
AB-1881	AB-2429	AB-1864	AB-595	RG-102	AB-976	RG-560			
AB-1328	AB-2194	AB-1574	AB-578	RG-103	AB-1008	RG-570			
AB-462	AB-2445	PV-4	AB-881	RG-104	AB-2067	RG-68			
AB-2050	AB-1826	PV-5	AB-549	RG-124	AB-1593	RG-69			
AB-699	AB-2496	Pv-6	AB-471	RG-13	AB-1092	RG-70			
AB-484	AB-448	PV-7	AB-697	RG-140	AB-649	PV-2			
AB-1803	AB-1636	PV-2	AB-555	RG-155	AB-2484	PVG-7			
AB-2486	AB-1356	AB-2097	AB-574	RG-158	AB-1539	PVG-9			
AB-1735	AB-1017	AB-2214	AB-1670	RG-159	AB-2481	RG-517			
AB-739	AB-1942	AB-1269	AB-659	RG-175	AB-1582	RG-519			
AB-2223	AB-1324	AB-539	AB-763	RG-180	AB-1934	RG-524			
AB-2301	AB-2513	AB-1992	AB-520	RG-194	AB-1785	RG-528			
AB-505	AB-2084	AB-1516	AB-1035	RG-199	AB-1591	RG-530			
AB-2503	AB-2254	AB-749	AB-1132	RG-206	AB-1907	RG-534			
AB-1600	AB-2134	AB-1472	AB-478	RG-207	AB-1214	RG-538			
AB-1790	AB-2150	AB-1377	AB-469	RG-211	RG-884	NA-503			

AB-2109	AB-2515	AB-1477	AB-644	RG-216	RG-885	NA-560
AB-1336	AB-2367	AB-2421	AB-577	RG-225	RG-887	NA-366
AB-2327	AB-2517	AB-2225	AB-562	RG-232	RG-893	NA-774
AB-443	AB-1852	AB-304	AB-459	RG-237	RG-899	NA-373
AB-1824	AB-1362	AB-2321	AB-2339	RG-241	RG-905	NA-392
AB-1310	AB-1420	AB-933	AB-1442	RG-242	RG-923	NA-144
AB-2284	AB-2212	AB-1315	AB-1443	RG-258	AB-1001	RG-440
AB-1738	AB-1894	AB-1822	AB-1089	RG-265	AB-677	RG-444
AB-1225	AB-1850	AB-1350	AB-1202	RG-269	AB-660	RG-445
AB-667	AB-2504	AB-1567	AB-454	RG-270	AB-1890	RG-451
AB-2277	AB-2086	AB-1765	AB-1347	RG-275	AB-1827	RG-467
AB-1684	AB-2263	AB-1641	AB-723	RG-278	AB-657	RG-501
AB-1841	AB-2078	AB-2343	AB-1408	RG-279	AB-1733	RG-502
AB-1955	AB-2249	AB-2162	AB-2392	RG-283	AB-1808	RG-509
AB-1677	AB-1884	AB-2143	INV-238	RG-284	AB-2137	RG-512
AB-500	AB-2138	AB-1623	AB-2336	RG-285	AB-2368	RG-513
AB-2422	AB-1776	AB-1590	AB-2149	RG-289	AB-2289	NA-705
AB-1682	AB-1528	AB-760	AB-2219	RG-295	AB-2366	NA-712
AB-2376	AB-1970	AB-1967	AB-422	RG-305	AB-1964	NA-879
AB-1298	AB-2048	AB-2260	AB-1618	RG-310	AB-1497	NA-847
AB-452	AB-1734	AB-2183	AB-1603	RG-311	AB-249	NA-832
AB-1382	AB-2005	AB-2341	AB-1383	RG-312	AB-1203	NA-460
AB-1675	AB-886	AB-1378	AB-1930	RG-321	AB-1781	NA-916
AB-1753	AB-1033	AB-1716	AB-1726	RG-330	RG-815	NA-261
AB-1830	RG-237	AB-1173	AB-1915	RG-332	RG-820	NA-376
AB-1568	RG-472	AB-1374	AB-421	RG-334	RG-836	NA-610
AB-1040	RG-561	AB-2349	AB-1534	RG-335	RG-839	RG-405
AB-683	RG-572	AB-1351	AB-1544	RG-338	RG-853	RG-415
AB-734	RG-581	BA-492	AB-1908	RG-339	RG-861	RG-416
AB-635	RG-586	BA-897	AB-1432	RG-354	RG-864	RG-418
AB-543	RG-587	BA-161	AB-1409	RG-356	RG-873	RG-431
AB-790	RG-589	BA-500	AB-1459	RG-357	RG-876	RG-432
AB-1664	RG-599	BA-925	AB-1015	RG-362	RG-877	RG-433
AB-817	RG-602	BA-817	AB-272	RG-365	AB-511	RG-436
AB-2110	RG-608	BA-917	AB-1098	RG-379	AB-1616	RG-437
AB-1654	RG-628	BA-554	AB-604	RG-382	AB-2071	RG-439
AB-1450	RG-654	BA-680	AB-898	RG-387	AB-2444	AB-1474
AB-738	RG-685	BA-462	AB-2128	RG-393	AB-2505	AB-342
AB-908	RG-694	BA-512	AB-1853	RG-394	AB-1508	AB-2026
AB-1192	RG-702	BA-253	AB-1856	RG-398	AB-1646	AB-1990
AB-909	RG-703	BA-548	AB-2305	RG-399	AB-2415	AB-2319

AB-590	RG-705	BA-750	AB-1737	RG-402	AB-910	AB-564
AB-1741	RG-716	NA-68	AB-710	RG-404	AB-1973	AB-1208
AB-1188	RG-717	NA-747	AB-1099	RG-755	NA-655	AB-2108
AB-877	RG-736	NA-924	AB-2188	RG-757	NA-292	AB-1341
AB-1572	RG-737	NA-288	AB-1184	RG-772	NA-696	AB-2186
AB-1157	RG-744	NA-670	AB-842	RG-784	NA-116	NA-649
AB-1386	RG-747	NA-481	AB-1167	RG-811		

	Perforaciones donde se identificó la ignimbrita 3								
AB-548	RG-887	AB-604	AB-448	AB-2336	RG-387	AB-2201			
AB-1880	RG-876	AB-2305	AB-1133	AB-1930	RG-589	AB-2313			
AB-1904	RG-943	AB-2319	AB-2513	AB-1534	RG-538	AB-2429			
AB-1881	RG-554	AB-564	AB-2517	AB-1908	PVG-7	AB-2496			
AB-1735	RG-853	AB-1998	AB-2504	AB-1830	RG-416	BA-925			
AB-739	RG-717	AB-1982	AB-875	AB-1192	RG-757	AB-2511			
AB-2109	RG-703	PV-5	AB-2462	AB-478	RG-602	AB-2253			
AB-1528	AB-2048	AB-1064							

	Perforaciones donde se identificó la lava 2								
AB-548	PVG-9	AB-1324	AB-422	AB-909	PVG-12	RG-206			
AB-1735	RG-757	AB-1133	AB-1908	AB-1099	RG-274	RG-356			
AB-739	RG-382	AB-2513	AB-1098	AB-1508	RG-109	RG-887			
AB-2301	RG-250	AB-2367	AB-604	AB-478	RG-196	RG-876			
AB-1790	RG-251	AB-2517	AB-2128	AB-2253	RG-609	RG-416			
AB-500	RG-443	AB-2271	AB-2319	AB-2057	AB-2336	RG-535			
AB-2376	RG-172	AB-2320	AB-1982	AB-2496	RG-101	RG-382			
AB-1568	RG-574	AB-672	PV-4	AB-448	AB-1192	RG-934			
AB-683	RG-246	RG-472	AB-2511						

Perforaciones donde se identificó la ignimbrita 2 AB-1735 AB-1508 AB-604 AB-448

AB-1324	
AB-2513	
RG-472	
RG-717	
RG-703	

Perforaciones donde se identificó la lava1 AB-1735 AB-683 AB-1098 AB-1248 AB-1324 AB-2513

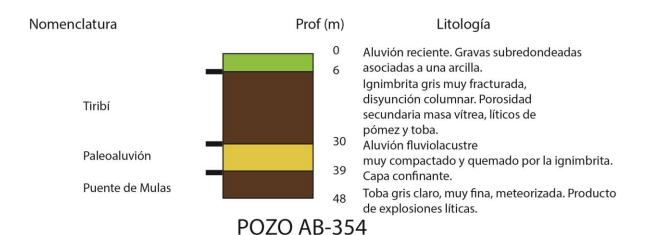
Perforaciones donde se identificó la ignimbrita 1

AB-1735 AB-2513

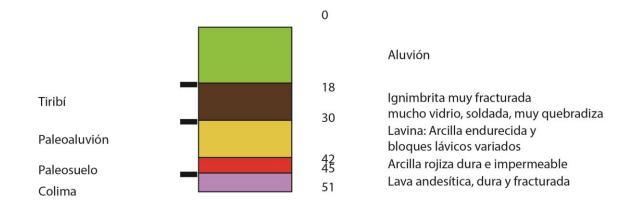
Sitios visitados y unidades correlacionables									
Unidad	Longitud	Latitud	m.s.n.m.	Unidad	Longitud	Latitud	m.s.n.m.		
Barva	509314	215700	795	Puente Mulas	508900	216312	811		
Barva	524149	217908	1078	Puente Mulas	516809	216987	923		
Barva	511469	217998	852	Puente Mulas	516645	216950	854		
Barva	508954	218541	828	Puente Mulas	516659	216920	855		
Barva	515900	218300	915	Puente Mulas	516810	216990	924		
Barva	516311	218334	917	Puente Mulas	516655	216942	855		
Barva	513778	217390	863	Puente Mulas	513160	216137	829		
Barva	513822	217280	860	Puente Mulas	516110	217322	847		
El Coyol	509052	215975	810	Puente Mulas	509360	212464	768		
El Coyol	500600	216244	620	Puente Mulas	512108	213285	836		

El Coyol	498922	216750	552	Puente Mulas	512456	215316	790
El Coyol	498103	211942	461	Puente Mulas	512097	213295	826
El Coyol	499099	212970	520	Puente Mulas	512108	213285	835
El Coyol	500077	214073	541	Puente Mulas	512932	216298	770
El Coyol	510318	214923	811	Belén	500658	216259	620
El Coyol	510779	216862	822	Belén	498357	213032	497
El Coyol	510318	214923	811	Belén	498182	212734	483
El Coyol	508154	217880	792	Belén	498877	213022	519
El Coyol	505784	220509	802	Belén	510700	214336	683
El Coyol	510633	214815	814	Belén	510739	214436	692
El Coyol	500110	214091	541	Belén	510748	214436	687
El Coyol	501565	215109	605	Belén	510716	214245	674
El Coyol	501874	214578	592	Belén	510687	214458	755
El Coyol	501443	214323	570	Belén	511565	214560	697
El Coyol	500042	213128	580	Belén	511519	214643	694
El Coyol	498738	213109	517	Belén	512875	216079	756
El Coyol	498377	213041	498	Belén	512936	216089	762
El Coyol	498323	214436	479	Belén	516156	217341	847
El Coyol	507216	217852	803	Belén	512456	215316	760
El Coyol	504848	219195	765	lava 1	500106	213528	540
Tiribí	496772	215194	514	C. P. Tibás	516802	217575	908
Tiribí	523349	212720	1044	C. P. Tibás	512108	213285	836
Tiribí	512097	213295	834	C. P. Tibás	512097	213295	827
Tiribí	511209	214083	817	Linda Vista	523655	214702	1081
Tiribí	511940	213458	822	Linda Vista	523564	214526	1039
Tiribí	516802	217575	924	Linda Vista	518480	216648	921
Tiribí	513065	216105	817	Linda Vista	518452	216576	941
Tiribí	513066	216104	818	Linda Vista	518500	216637	926
Tiribí	514534	216479	846	Linda Vista	518453	216581	940
Tiribí	512456	215316	810				
Tiribí	512932	216298	800				
Tiribí	504848	219195	760				

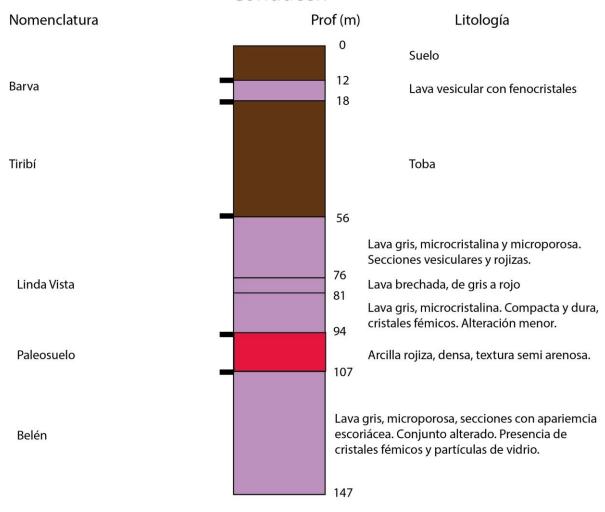
#### POZO AB-353



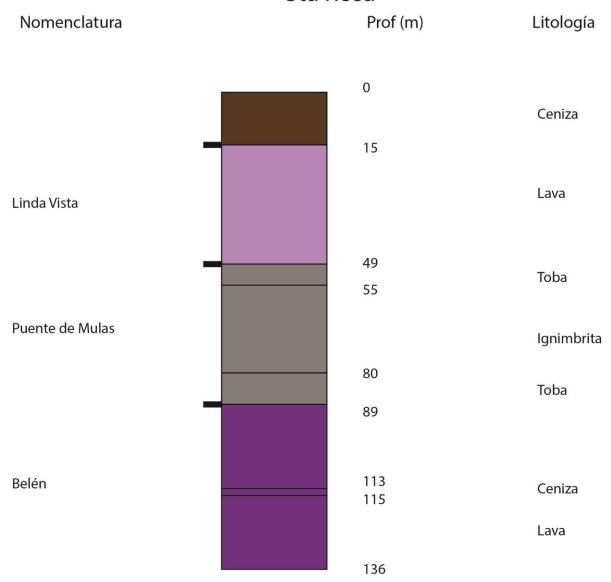
Nomenclatura Prof (m) Litología



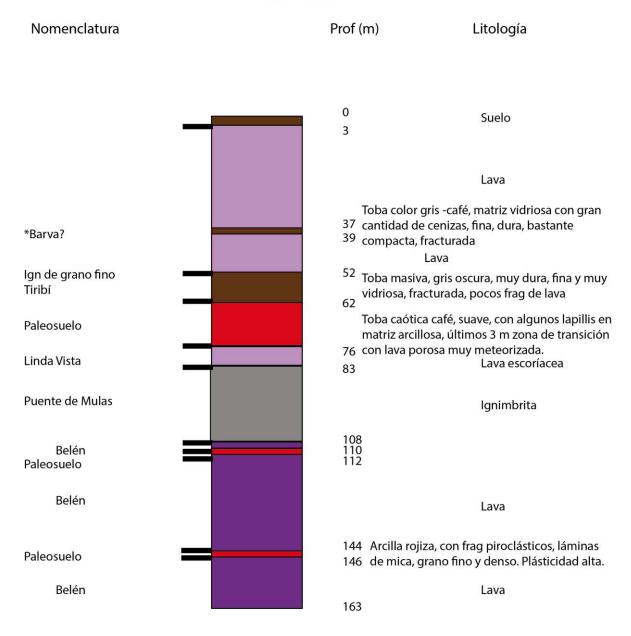
## POZO AB-454 Conducén



# POZO AB-471A en Echandi Sta Rosa

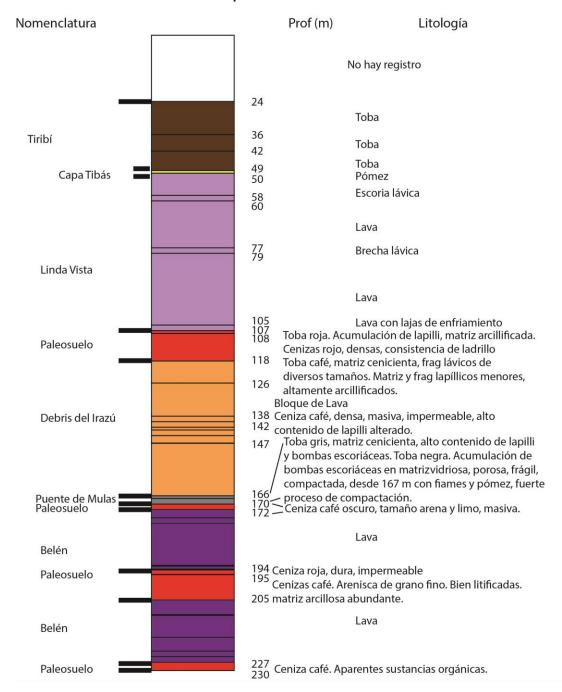


### POZO AB-490 Sta Rosa

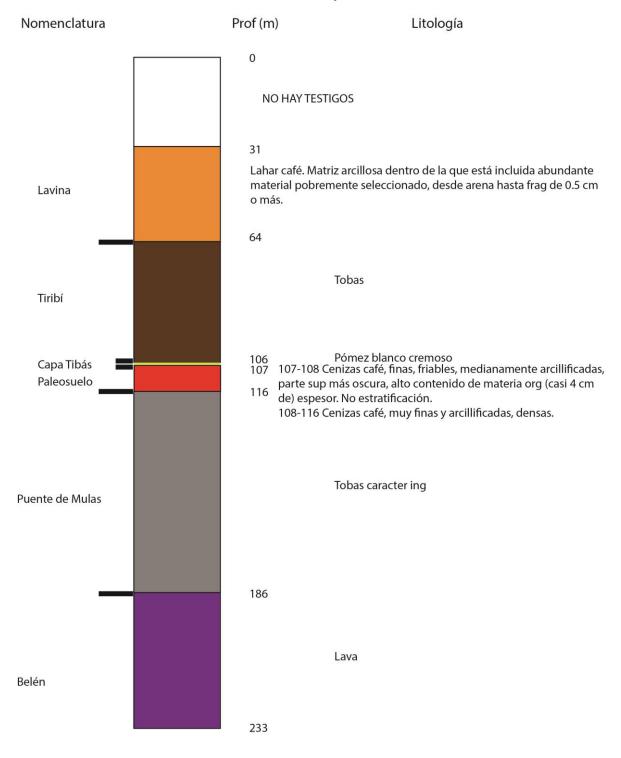


<sup>\*</sup>Poco espesor de suelo, corelación con publicación de rev4.

### POZO AB-500 Parque Bolívar



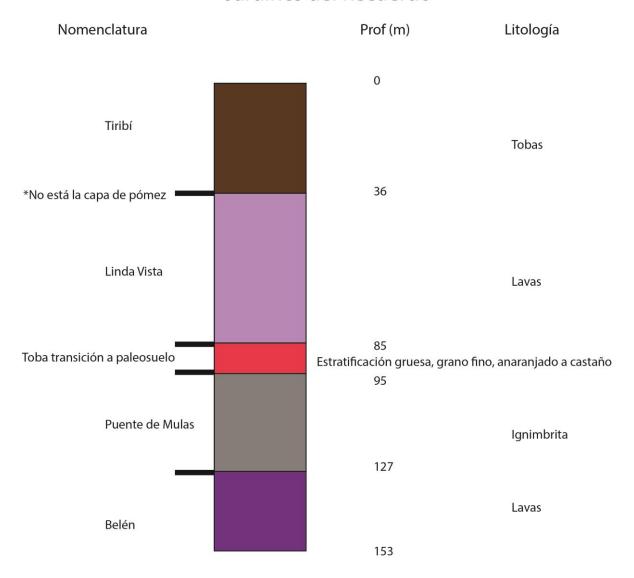
### POZO AB-505 Guadalupe



## POZO AB-520 Barreal

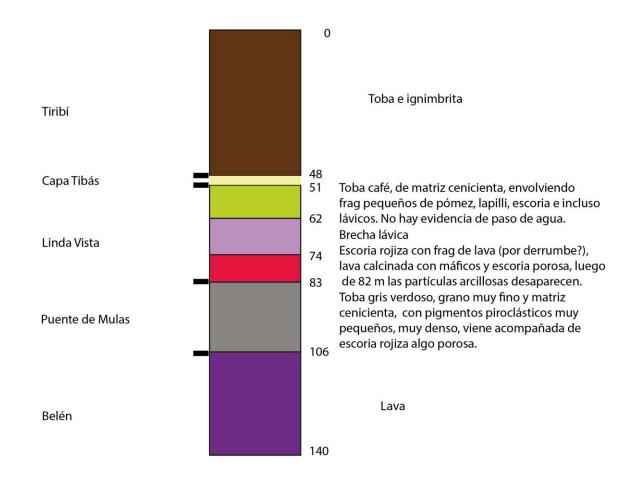
Nomenclatura Prof (m) Litología 0 Toba arenosa, mucho lapilli Lava escoriácea gris oscuro, gran cantidad de 20 vacuolas de hasta 0.5 cm. Muy brechada por 27 intervalos. Lava andesítica medianamente porosa, Barva horizonte quemado. Tiene muchos horizontes brechosos y algunos xenolitos de toba. 45 Lava andesítica gris, compacta, poco fracturada, pocos horizontes brechosos. 72 Toba quemada, rojiza textura fina y porosa. Paleosuelo 78 Tiribí Ignimbrita 127 Lava andesítica, muy porosa, con vacuolas de hasta 1 cm. Muy fracturada. 137 Toba maciza, matriz cenicienta, regularmente arcillificada, textura fina, muy porosa Colima 148 Lava andesítico-basáltica, gris, compacta, 160 mediamente fracturada, sin poros.

# POZO AB-555A Jardines del Recuerdo

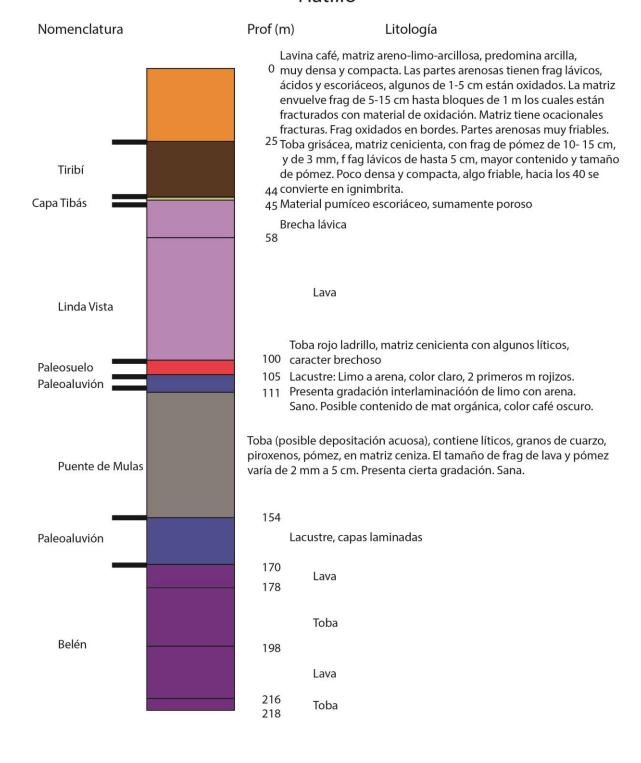


### POZO AB-578 Santa Rosa

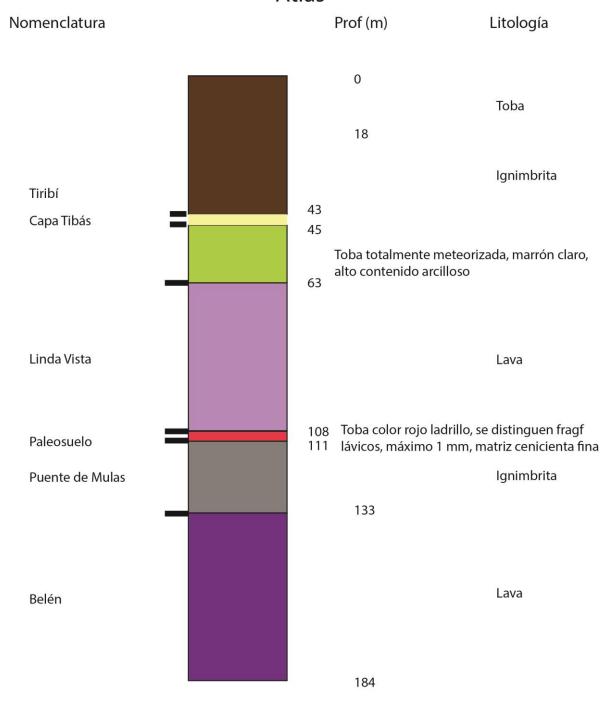
Nomenclatura Prof (m) Litología



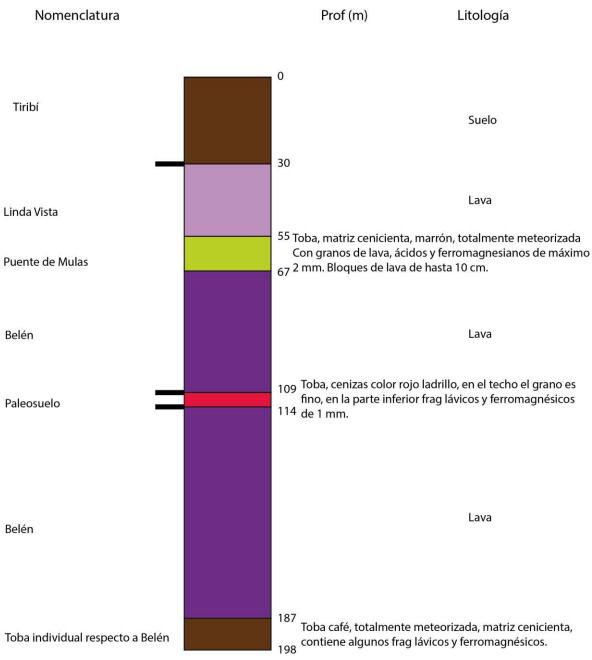
### POZO AB-635 Hatillo



# POZO AB-644 Atlas

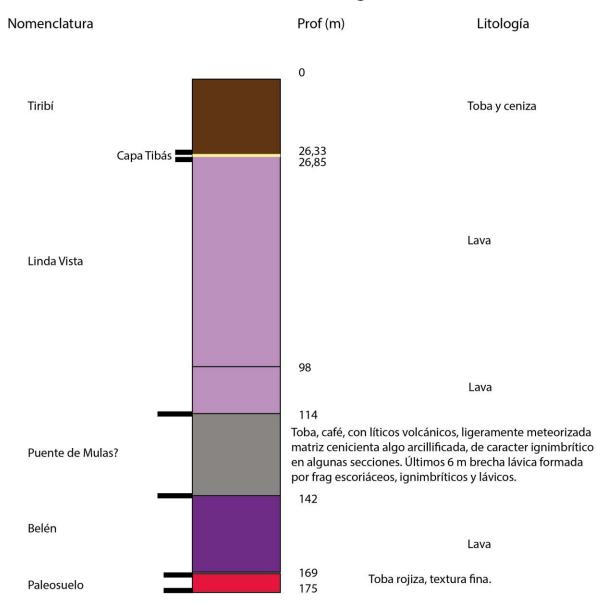


### POZO AB-656 Santa Rosa

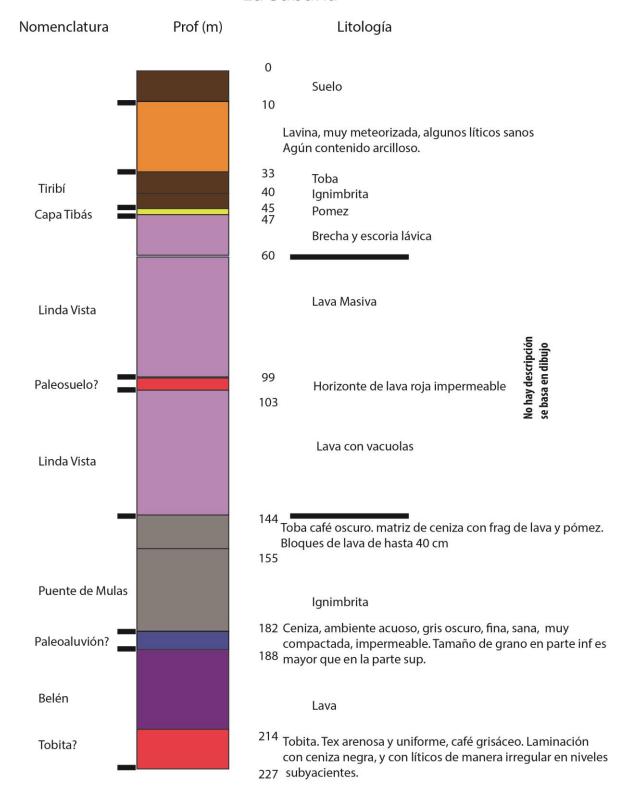


<sup>\*</sup>Ignimbrita. Por líticos de 10 cm, es posible según Pérez

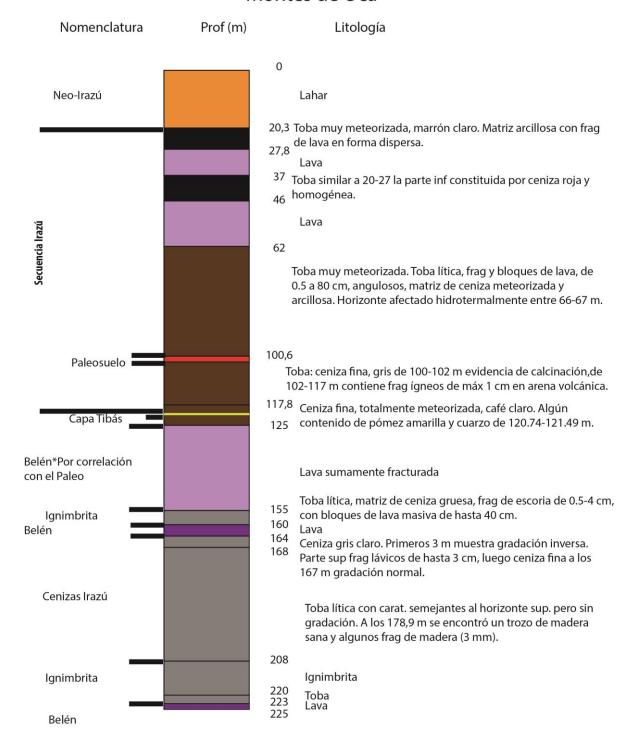
# POZO AB-677 Santo Domingo



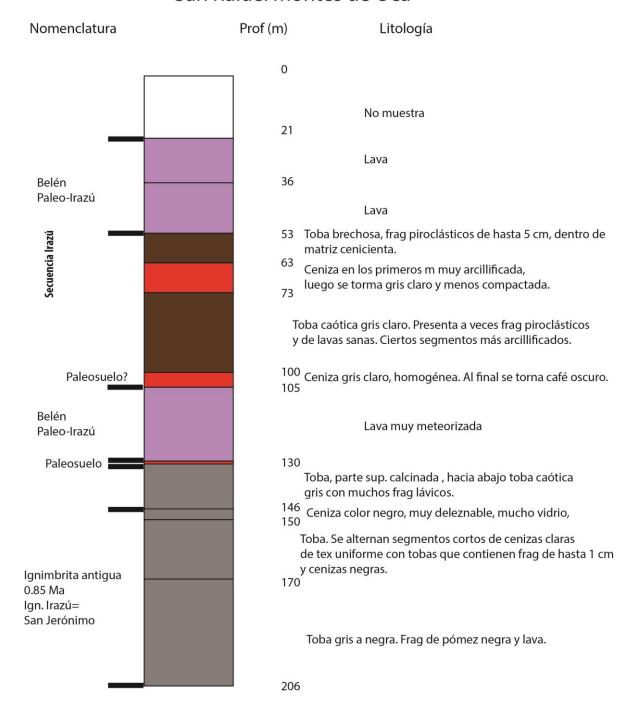
### POZO AB-667 La Sabana



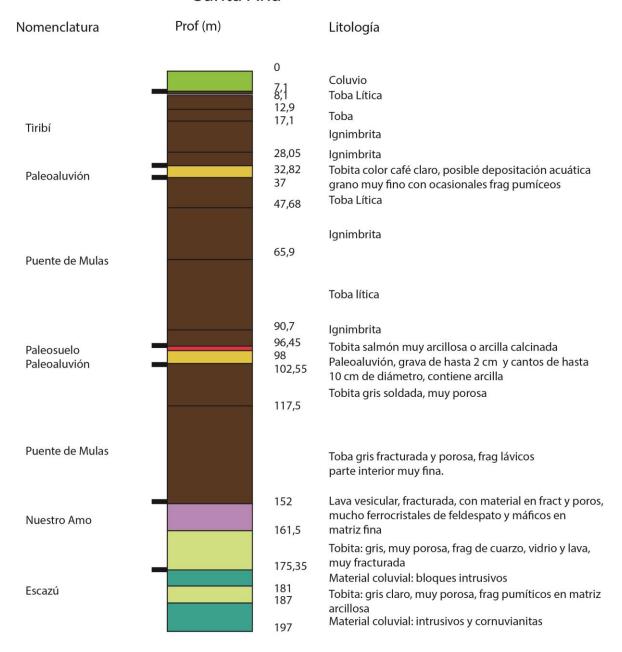
### POZO AB-683 Montes de Oca



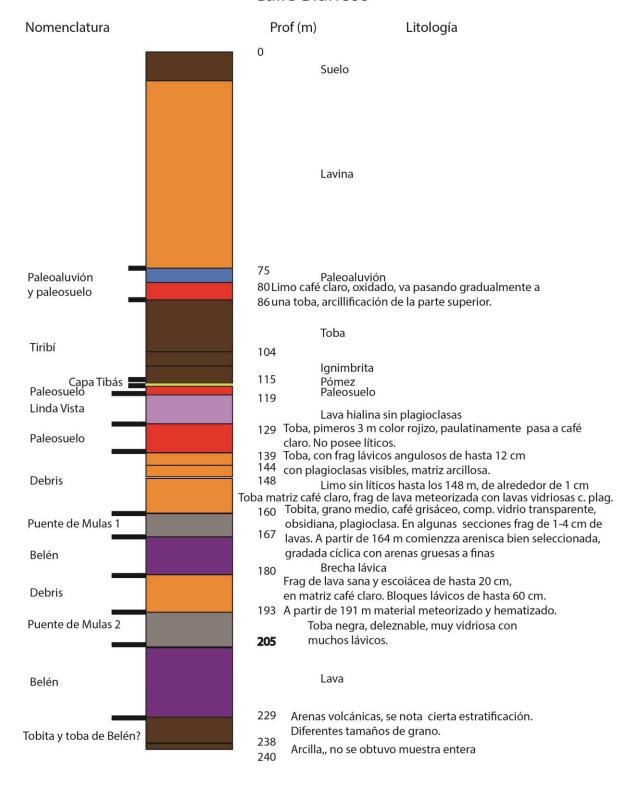
### POZO AB-711 San Rafael Montes de Oca



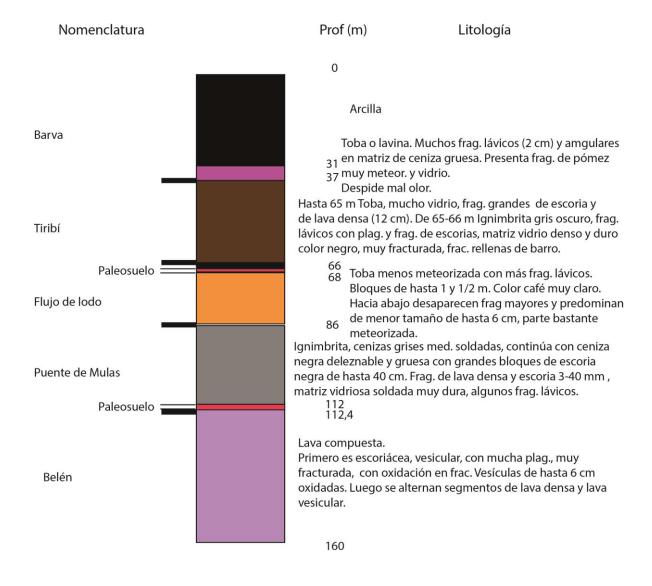
### POZO AB-732 Santa Ana



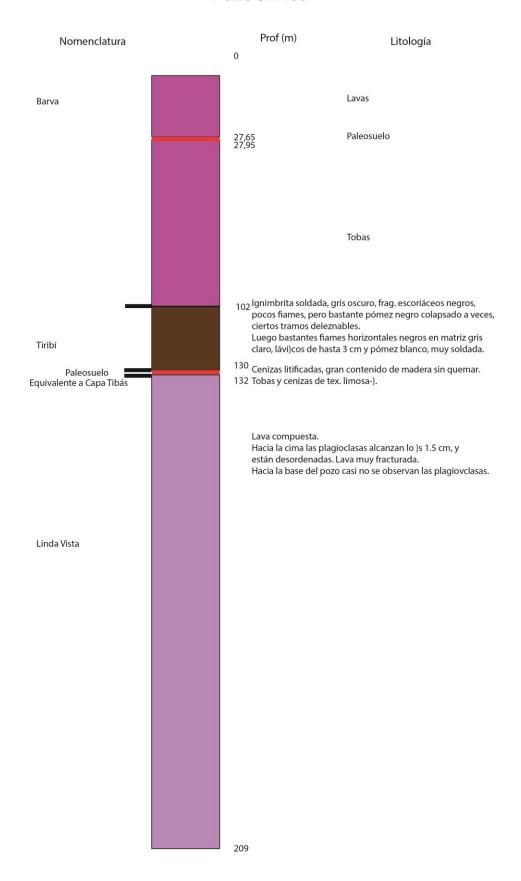
### POZO AB-739 Calle Blancos



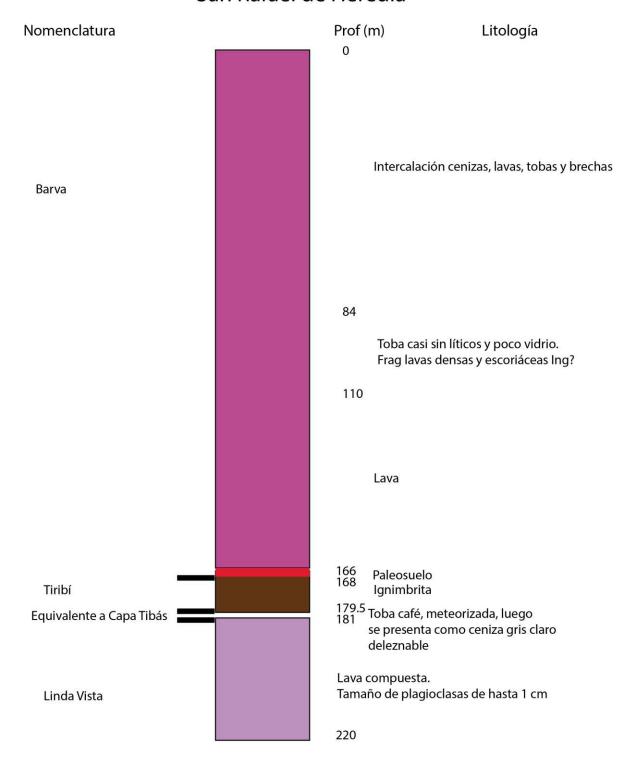
#### POZO BA-141



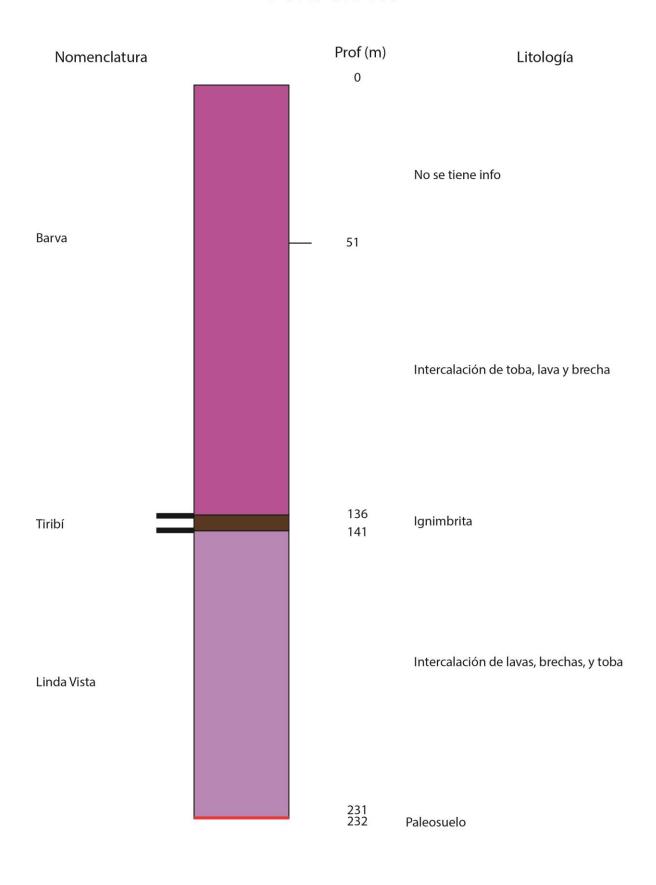
# POZO BA-158



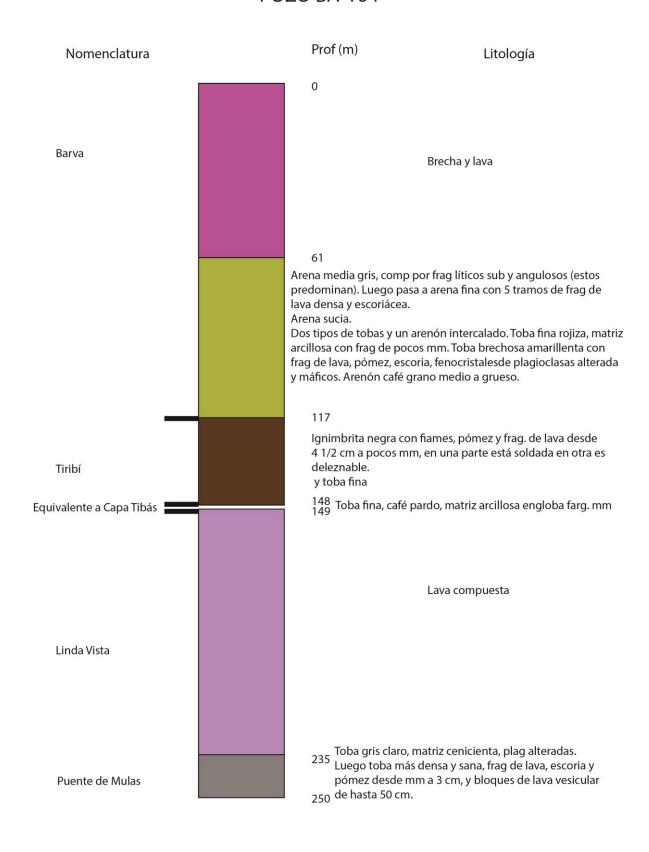
# POZO BA-161 San Rafael de Heredia



# POZO BA-163



# POZO BA-164



**Coordenadas:** 518 486 E-216 686 N

Lugar: Sitio Presa Electriona, Río Virilla, margen derecha

**Afloramiento:** En la base del río aflora una brecha lávica rojiza, no deleznable y muy competente. Los bloques que la conforman son vesiculares de redondeados a subangulares y presentan estructuras de fluidez.

**Descripción Macroscópica:** Lava dura, textura afanítica-porfirítica, la matriz es color gris, pero puede presentarse color morado (algún tipo de alteración?), con fenocristales de plagioclasa (<a 2 mm).

Unidad: Linda Vista



Nombre: Andesita con un piroxeno

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y augita en agregados glomeroporfiríticos; matriz hialopilítica con microlitos de feldespatos

Textura: subparalelos, piroxenos y opacos.

Composición Mineralógica:

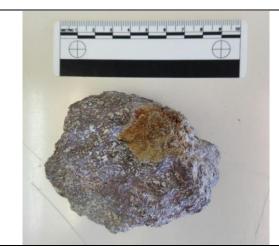
Fenocristales: 30 %

Plagioclasa 20%, cristales idiomórficos a hipidiomórficos

(máx. 1 mm-0,20 mm)

Augita 10 %, cristales hipidiomórficos (máx. 2-2 mm)

Mesostasa: 70 %: Plagioclasa. Piroxeno. Vidrio. Opacos.





N.º Muestra: M-JP-1-P

**Coordenadas:** 523 880 E-215 272 N

Lugar: La Uruca

Afloramiento: Perforación Puente Juan Pablo II, a 25 m de profundidad

**Descripción Macroscópica:** Lava gris muy vesicular (35%), vesículas de hasta 2 cm x 2,5 cm, fenocristales de plagioclasa (máx. 3 mm) y piroxenos. Textura afanítica porfirítica. Presenta secciones con acumulación de óxidos.

Unidad: Linda Vista



#### Descripción Microscópica:

Nombre: Andesita con dos piroxenos

Hipocristalina porfirítica vesicular con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa con textura cribosa, dos piroxenos y olivino; matriz intergranular con microlitos de plagioclasa, piroxenos, olivinos y

Textura: opacos.

### Composición Mineralógica:

Fenocristales: 45 %

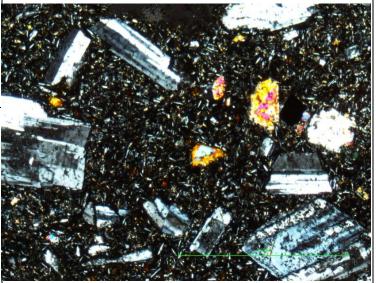
Plagioclasa (25%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 6-4 mm),

algunas con maclas e inclusiones de vidrio (máx. 0,3 mm Φ)

Augita (10 %), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 4-6 mm)

Hipersteno (5 %), cristales hipidiomórficos (máx. 0,2-0,5 mm)

Mesostasa: 55 %: Plagioclasa. Piroxeno. Olivino. Opacos.



N.º Muestra: M-BL-2

**Coordenadas:** 523 564 E-214 526 N

Lugar: Bajo Los Ledezma

Río Torres, a ambos márgenes se muestra una lava de un aspecto blocoso.

Afloramiento: Hacia el techo la roca se presenta bastante meteorizada incluso con transición

a suelo y está cubierta por un lahar.

Descripción Macroscópica:

Lava muy dura, gris, vesicular, con fenocristales de plagioclasa y piroxenos.

Unidad: Linda Vista



Nombre: Andesita con dos piroxenos

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y dos piroxenos; matriz intergranular a intersertal con

microlitos de plagioclasa, piroxenos, olivinos, vidrio y opacos.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 50 %

Textura:

Plagioclasa (30%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 1,6-1,4

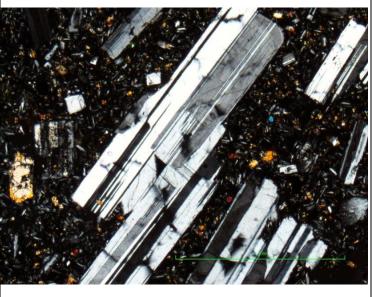
mm), con maclas e inclusiones de augita (máx. 0,06 mm Φ)

Augita (10 %), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 0,6-0,4 mm) Hipersteno (10 %), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 0,9-0,6

mm)

Mesostasa: 50 %: Plagioclasa. Piroxeno. Olivino. Vidrio. Opacos.





N.º Muestra: M-BL-1P

**Coordenadas:** 523 564 E-214 526 N

Lugar: Bajo Los Ledezma

Río Torres, a ambos márgenes se muestra una lava de un aspecto blocoso.

Afloramiento: Hacia el techo la roca se presenta bastante meteorizada incluso con transición

a suelo y está cubierta por un lahar.

Descripción Macroscópica:

Lava muy dura, gris, vesicular, con fenocristales de plagioclasa y piroxenos.

Unidad: Linda Vista



Nombre: Andesita con dos piroxenos

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y dos piroxenos; matriz intergranular a intersertal con

microlitos de plagioclasa, piroxenos, olivinos, vidrio y opacos.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 50 %

Textura:

Plagioclasa (30%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 1,2-0,2

mm), con inclusiones de vidrio (máx.  $0.02 \text{ mm } \Phi$ )

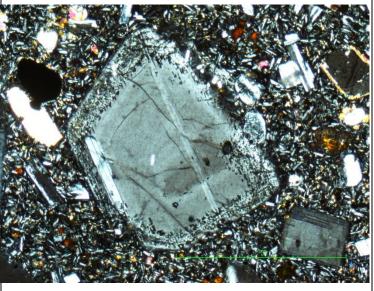
Augita (7 %), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 0,7 mm)

Hipersteno (13 %), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 1,5-1,5

mm), con inclusiones de augita (máx.  $0.01 \text{ mm } \Phi$ )

Mesostasa: 50 %: Plagioclasa. Piroxeno. Olivino. Vidrio. Opacos.





N.º Muestra: M-A-1

**Coordenadas:** 523 349 E-212 720 N

Lugar: Subestación Anonos

Afloramiento: Río María Aguilar, ignimbrita en contacto irregular con lava brechosa, con

bloques de hasta 70 cm de diámetro y un espesor visible de 10 m.

Descripción Macroscópica:

Lava masiva, estructuras de flujo alargadas y orientadas en dirección SW.

Unidad: Linda Vista



Nombre: Andesita

Vitrofirica vesicular con fenocristales hipidiomórficos de plagiocasa en una

Textura: matriz intesertal.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 2 %

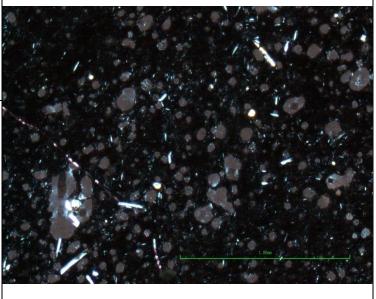
Plagioclasa (2%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 1,2-0,5 mm),

(en promedio 0,1-0,01 mm)

Mesostasa: 58 %: Vidrio. Opacos. Plagioclasa.

Vesículas: 40 %





N.º Muestra: M-A-2

**Coordenadas:** 523 349 E-212 720 N

Lugar: Subestación Anonos

Afloramiento: Río María Aguilar, ignimbrita en contacto irregular con lava brechosa, con

bloques de hasta 70 cm de diámetro y un espesor visible de 10 m.

Descripción Macroscópica:

Lava masiva, estructuras de flujo alargadas y orientadas en dirección SW.

Unidad: Linda Vista



Nombre: Andesita

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos

de plagioclasa y augita; matriz hiaolopilítica con microlitos de feldespato

Textura: subparalelos.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 5 %

Plagioclasa (3%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 1,5-0,5 mm)

Augita (2%), cristales hipidiomórficos (máx. 0,5 mm)

Mesostasa: 95 %: Vidrio. Opacos. Plagioclasa. Piroxenos.





N.º Muestra: M-A-3

**Coordenadas:** 523 349 E-212 720 N

Lugar: Subestación Anonos

Afloramiento: Río María Aguilar, ignimbrita en contacto irregular con lava brechosa, con

bloques de hasta 70 cm de diámetro y un espesor visible de 10 m.

Descripción Macroscópica:

Lava masiva, estructuras de flujo alargadas y orientadas en dirección SW.

Unidad: Linda Vista



Nombre: Andesita

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos

de plagioclasa y augita; matriz hiaolopilítica con microlitos de feldespato

Textura: subparalelos.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 5 %

Plagioclasa (4%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 0,1-

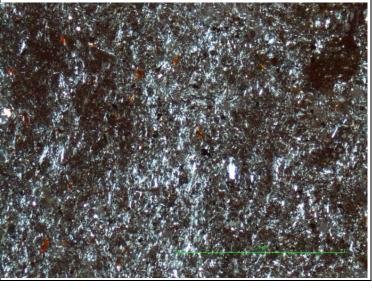
0,01 mm)

Augita (1%), cristales hipidiomórficos (máx. 0,5 mm)

Mesostasa: 95 %: Vidrio. Opacos. Plagioclasa. Piroxenos.

Alteración: Óxidos de hierro, arcillas en feldespatos





N.º Muestra: D1P3

**Coordenadas:** 522 474 E-214 935 N

Lugar: Parque en Rohmoser

Afloramiento: Pocos bloques de lava casi métricos, subredondeados, en apariencia aislados

en medio del parque.

Descripción Macroscópica: Lava. Matriz color morado, contiene abundancia de plagioclasa

casi centimétricas.

Unidad: Aguacate



Nombre: Andesita con augita

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos

de plagioclasa con textura cribosa y augita; matriz hialoplítica con microlitos

Textura: de feldespato, piroxenos, vidrio, opacos y ceolitas.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 40 %

Plagioclasa (30%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 1 mm)

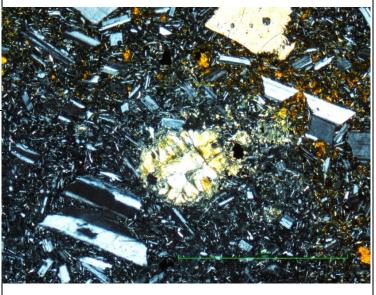
Augita (10%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 1 mm)

Mesostasa: 40 %: Plagioclasa. Augita. Vidrio. Opacos. Ceolitas.

Vesículas: 20 %

Alteración: Óxidos de hierro, ceolitas rellenando vesículas





 N.° Muestra:
 D1P8

 Coordenadas:
 500 658 E-216 259 N

Lugar: Salida a Turrúcares R. N. 27

Hacia el oeste de la ruta salida a Turrúcares, sobre la ruta 27, al norte de la

Afloramiento: misma aflora una lava, con unos 2 m de espesor visible, color gris con

vesículas, en contacto lateral con un depósito de debris.

Descripción Macroscópica: Lava. Matriz fina oscura, vesículas cm, rellenas de calcita(?) Y óxidos.

Unidad: Belén



Nombre: Andesita con dos piroxenos

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y dos piroxenos; matriz intersertal con microlitos de feldespato, piroxenos y opacos. Se observan algunos agregados

Textura: glomeroporfiríticos de feldespato y piroxeno.

#### Composición Mineralógica:

Fenocristales: 40 %

Plagioclasa (30%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx.. 1 cm x

0.4 cm

Augita (5%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 2 mm) Hipersteno (5%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 1 mm),

algunos tienen coronas e inclusiones de clinopiroxeno

Mesostasa: 60 %: Plagioclasa. Augita. Hipersteno. Opacos.





N.º Muestra: Brasil

Coordenadas: 510 716 E-214 245 N

Lugar: Planta Eléctrica Brasil, río Virilla

En ambas márgenes del río. Coladas de lava con importante diacalasado

Afloramiento: circular o semicircular, separando dichas coladas se muestra una sección

brechosa.

**Descripción Macroscópica:** Textura afanítica-porfiritica con un 20% de fenocristales. Son muy densas y sanas, presentan un color gris, levemente morado, se observan fenocristales de plagioclasa, cuarzo y piríboles, así como vesículas milimétricas.

Unidad: Belén

### Descripción Microscópica:

Nombre: Andesita

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y dos piroxenos; matriz intergranular con microlitos de feldespato, piroxenos, vidrio y opacos. Se observan algunos agregados

Textura: glomeroporfiríticos de feldespato.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 25 %

Plagioclasa (15%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (prom. 1 mm),

algunos cristales presentan zonación.

Augita (3%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 2 mm)

Hipersteno (2%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 0,5 mm)

Mesostasa: 75 %: Plagioclasa. Augita. Hipersteno. Vidrio. Opacos.





Coordenadas: 512 875 E-216 079 N

Lugar: Planta Eléctrica Belén, río Virilla

Afloramiento: Se muestra aflorando en la base del río Virilla, cuyo techo está definido por

una autobrecha lávica.

Descripción Macroscópica: Lava afanítica, color gris oscuro, con cristales de piroxenos

menores a 1 cm, de forma tabular.

Unidad: Belén



Nombre: Andesita con dos piroxenos

Hipocristalina porfirítica con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos

de plagioclasa y dos piroxenos; matriz hiaolopilítica con microlitos de

Textura: feldespato, piroxenos, vidrio y opacos.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 25 %

Plagioclasa (19%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (prom. 2 mm) Augita (3%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 1 mm) Hipersteno (2%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 0,5 mm)

Olivino (1%)

Mesostasa: 75 %: Plagioclasa. Augita. Hipersteno. Vidrio. Opacos.





Coordenadas: 524 149 E-217 908 N

Lugar: La Valencia

Afloramiento:

Talud sobre carretera La Valencia-Heredia

**Descripción Macroscópica:** Lava afanítica, color gris claro, gran volumen de vesículas menores a 1 cm.

Unidad: Barva



## Descripción Microscópica:

Nombre: Andesita con dos piroxenos

Hipocristalina porfirítica vesicular con fenocristales de idiomórficos a hipidiomórficos de plagioclasa y dos piroxenos; matriz intersertal con agregados glomeroporfiríticos de feldespato y piroxenos, y contenido de

Textura: vidrio y opacos.

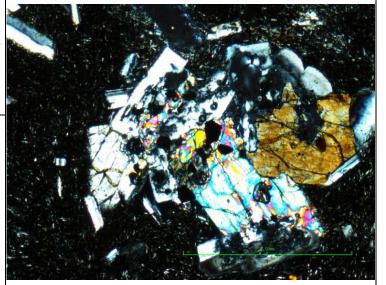
Composición Mineralógica:

Fenocristales: 30 %

Plagioclasa (20%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (prom. 0,5 mm) Augita (3%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 1 mm) Hipersteno (2%) cristales idiomórficos a hipidiomórficos (promedio 0,5 mm)

Mesostasa: 70 %: Plagioclasa. Piroxenos. Vidrio. Opacos.

Vesículas: 20%



**Coordenadas:** 501 416 E-211 504 N

Lugar: Puente a Piedras Negras, río Virilla

Gabros y en menor medida diabasas, aunque, estas se encuentran a lo largo de las diaclasas principales, de orientación 120,54NE, estas presentan depósitos

Afloramiento: de calcita, a lo largo de estas diaclasas el intrusivo presenta un color rosado,

posiblemente debido a la alteración hidrotermal.

Descripción Macroscópica: Roca con matriz gris competente con cristales visibles y vetas de

calcita.

Unidad: Aguacate



Nombre: Diabasa

Textura: Holocristalina porfirítica con textura subofitica.

Composición Mineralógica:

Fenocristales: 95%

Plagioclasa (80%), cristales idiomórficos a hipidiomórficos (máx. 10 x 4 cm),

fantasmas

Piroxenos (15%), cristales hipidiomórficos (máx. 10 x 4 cm)

Mesostasa: 5 %: Vidrio

Alteración: Fuerte alteración a clorita parda y azul, fibrosa; así como a calcita.



