

Mapa geológico digital a escala 1:100,000 del Campo Volcánico El Pinacate, Sonora, México[☆]

Digital geologic map at 1:100,000 of the El Pinacate Volcanic Field, Sonora, Mexico

Karen Yesenia Arias-Murcia^a, Jesús Roberto Vidal-Solano^b

^aUniversidad de Sonora (UNISON), Maestría en Ciencias-Geología, 83260, Hermosillo, Sonora, México

^bUniversidad de Sonora (UNISON), Departamento de Geología, 83260, Hermosillo, Sonora, México

Resumen

Se presenta el primer mapa geológico digital del Campo Volcánico El Pinacate a escala 1:100,000, partiendo del antecedente cartográfico realizado de forma analógica por Donnelly en 1974. La cartografía cubre 4052 km² y resulta de un reconocimiento en campo y la recopilación exhaustiva de datos provenientes de investigaciones geológicas desarrolladas desde los años 70's, que no habían sido integradas en un solo mapa. Se conformó una base de datos con información geocronológica y geoquímica de elementos mayores, obteniendo una clasificación actualizada de las rocas, mediante el uso del diagrama TAS. Finalmente, se integró toda la información en un mapa, bajo la asignación de una nueva nomenclatura, tomando en cuenta la temporalidad crono-estratigráfica, el nombre original y el tipo de roca obtenido bajo una clasificación geoquímica formal, permitiendo ilustrar un total de 573 unidades volcánicas del Neógeno-Cuaternario, divididas en tres series volcánicas: Pre-Pinacate, Santa Clara y Pinacate, que sobreyacen a rocas de un basamento cristalino pre-Cenozoico, y que son cubiertas por depósitos sedimentarios Cuaternarios.

Palabras clave: Campo Volcánico El Pinacate, Volcán Santa Clara, Cartografía Volcánica digital

Abstract

The first digital geological map of the El Pinacate Volcanic Field is presented at a scale of 1:100,000, based on the cartographic precedent carried out analogically by Donnelly in 1974. The cartography covers 4052 km² and results from field work and an exhaustive collection of data from geological investigations developed since the 70's, that had not been integrated into a single map. A database was developed containing geochronological and major element geochemical information, obtaining an updated classification of rocks by using the TAS diagram. Finally, all the information was integrated into a map, under the assignment of a new nomenclature considering chrono-stratigraphic temporality, original name and type of rock obtained by a formal geochemical classification, allowing a total of 573 Neogene-Quaternary volcanic units to be divided into three volcanic series: Pre-Pinacate, Santa Clara and Pinacate, overlying pre-Cenozoic crystalline basement rocks, all covered by Quaternary sedimentary deposits.

Keywords: Pinacate Volcanic Field, Santa Clara Volcano, Digital Volcanic Cartography

1. Introducción

El Campo Volcánico El Pinacate (CVP), se ubica al noroccidente del estado mexicano de Sonora, próximo a la terminación septentrional del Golfo de California. Una pequeña parte

se localiza al norte de la frontera internacional adyacente en el estado de Arizona, Estados Unidos de América. El CVP forma parte del área natural protegida: Reserva de la biosfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar (Figura 1).

El CVP se originó durante el Cenozoico, a partir de tres series volcánicas, que fueron divididas temporalmente en la literatura científica de la siguiente manera (Arias-Murcia, 2023): Serie Pre-Pinacate (~20 Ma – 10 Ma), vulcanismo del Mioceno, conformado por rocas volcánicas máficas, intermedias y ácidas (Lynch, 1981; Vidal-Solano, 2001; Vidal-Solano, 2005; Vidal-Solano et al.2005; Vidal-Solano et al.2008; SGM, 2015); Serie

[☆]© K. Y. Arias-Murcia & J. R. Vidal-Solano. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), which permits non-commercial sharing of the work and adaptations, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

*E-mail address: roberto.vidal@unison.mx

Santa Clara (1.70- 0.75 Ma), vulcanismo poligenético del Pleistoceno que originó rocas máficas, intermedias y ácidas, producto de una serie continua de diferenciación magmática (Donnelly, 1974; Lynch, 1981; Damon et al. 1996); finalmente, Serie Pinacate (1.09 Ma – 3.9 Ka), vulcanismo monogenético del Pleistoceno-Holoceno que produjo rocas volcánicas poco diferenciadas, destacando el desarrollo de actividades freatomagmáticas e hidrovulcánicas (Donnelly, 1974; Cortés et al., 1976; Lynch, 1981; Damon et al. 1996; Guttman et al., 2000; Gutmann, 2002; Kunze; 2006; Alva-Valdivia et al., 2019; Rodríguez-Trejo et al., 2019).

El CVP ha sido estudiado desde 1701 (Gutmann, 2007), con un énfasis particular en ciertos sectores y en volcanes tipo maar específicos, como los cráteres El Elegante y El Cerro Colorado (Gutmann, 1976; Cortés et al., 1976; Gutmann & Sheridan, 1978; Cázares, 2013). La mayoría de los mapas geológicos del CVP han sido a gran escala (SPP, 1982; SGM, 2002a, 2002b), con la excepción de uno detallado a escala 1:62,500 (Donnelly, 1974), que fue elaborado manualmente y digitalizado por primera vez en la tesis de maestría de Kunze (2006).

El mapa de Donnelly (1974) representa el único recurso detallado disponible para el CVP. No obstante, tras cinco décadas, se identificó la necesidad de integrar los hallazgos de todos los estudios realizados a la fecha para actualizar la cartografía geológica, aprovechando las herramientas tecnológicas avanzadas para optimizar tanto el procesamiento como la organización de los datos.

Este trabajo comprende el área del mapa de Donnelly (1974) y una ampliación al Este para incluir a las manifestaciones de riolita hipercalcaína del Mioceno. El mapa está comprendido entre las longitudes 113°15' y 113°45', y en latitud Norte 31°31' y 32°9' y muestra con especial énfasis las unidades volcánicas, aunque también, de manera general, las rocas que conforman el basamento y los depósitos sedimentarios que constituyen los materiales más jóvenes del CVP.

2. Metodología

En el "Geologic Map Sierra Pinacate Region", Donnelly (1974) llevó a cabo una exhaustiva labor de campo durante 14 meses en las difíciles condiciones del desierto sonorense, utilizando fotografías aéreas. El mapa coloreado a mano de gran tamaño (~2m²), incluye una leyenda impresa, por separado, que representa más de 528 flujos de lava clasificados en ocho grupos estratigráficos según su edad relativa (Donnelly, 1974; Gutmann, 2007).

En este trabajo, se ha enriquecido el mapa original de Donnelly (1974) mediante un ajuste espacial de los contornos de las unidades geológicas demarcadas y la delimitación de nuevas unidades (Arias-Murcia, 2023; Arias-Murcia & Vidal-Solano, 2024). Este proceso utilizó los softwares Google Earth Pro y ArcGIS 10.8, e incluyó visitas a campo y la interpretación de imágenes satelitales BING de 4.5 m de resolución, MAP BOX de 6 m de resolución, radar Alos Palsar de 12.5 m de resolución y sensor LiDAR de 5 m resolución.

En el ajuste y delimitación de nuevas unidades geológicas, se abordaron diversas falencias de carácter técnico como desfases y eliminación de polígonos pequeños que se encontraban por debajo de la escala mínima de representación. Así mismo, se corrigieron falencias de tipo fenomenológico, relacionadas con los fenómenos sedimentarios, incluyendo cambios en las dimensiones y posiciones de los cauces aluviales y depósitos eólicos.

La información geoquímica de los elementos mayores de 100 muestras (Donnelly, 1974; Lynch, 1981), fue procesada en el software IGPET (Igneous Petrology Software). Los datos fueron recalculados al 100 % en base anhidra y utilizados para la clasificación de las rocas a través del diagrama TAS (Total de Alcalis vs Sílice) propuesto por Le Bas et al. (1986) y Le Maitre et al. (2002) (Figura 2), lo que permitió renombrar y ajustar la nomenclatura original de las unidades geológicas, tanto de las ya caracterizadas, como de las nuevas propuestas.

El posicionamiento cronoestratigráfico de las unidades volcánicas del CVP se ajustó utilizando la información disponible en informes explicativos y trabajos de investigación relacionados con temas como la geocronología, estratigrafía, litología, paleomagnetismo y cartografía geológica (Donnelly, 1974; Lynch, 1981; Damon et al., 1996; Gutmann et al., 2000; SGM, 2015; Vidal-Solano, 2001; Vidal-Solano, 2005; Vidal-Solano et al. 2005; Vidal-Solano et al. 2008; Alva-Valdivia et al., 2019). Toda esta información fue organizada en una base de datos teórica y geográfica (geodatabase).

La salida gráfica contiene una nueva paleta de colores y una leyenda geológica con la tabla cronoestratigráfica internacional, descripción de nomenclaturas y nombres (SGC, 2016), así como la agrupación de las rocas en las tres series volcánicas establecidas. El mapa resultante se encuentra en formato pdf, es de tamaño práctico para su impresión y adecuado para su uso en el trabajo de campo.

3. Resultados

En el área de estudio se encuentran expuestas unidades litológicas que abarcan desde el Proterozoico hasta el Cenozoico, con un notable hiato entre los períodos Paleozoico y Mesozoico. Las formaciones incluyen rocas metamórficas e ígneas, así como depósitos sedimentarios no consolidados.

3.1. Rocas del basamento

De manera general, el basamento de la región se representa por rocas con edades del Mesoproterozoico y Paleoproterozoico (SGM 2000, 2015), sin embargo, estudios realizados en Sierra Blanca hacia el sur del CVP, mediante dataciones U/Pb en zircones, arrojan edades que ubican a las rocas de esta Sierra en el límite Permo-Triásico (Gutiérrez-Anguamea, 2006).

3.1.1. Gneis-Esquisto Paleoproterozoico (PPTGn-E)

Esta unidad geológica se encuentra en el extremo sur de Sierra Blanca. Acorde con el SGM (2000), son un conjunto de ro-

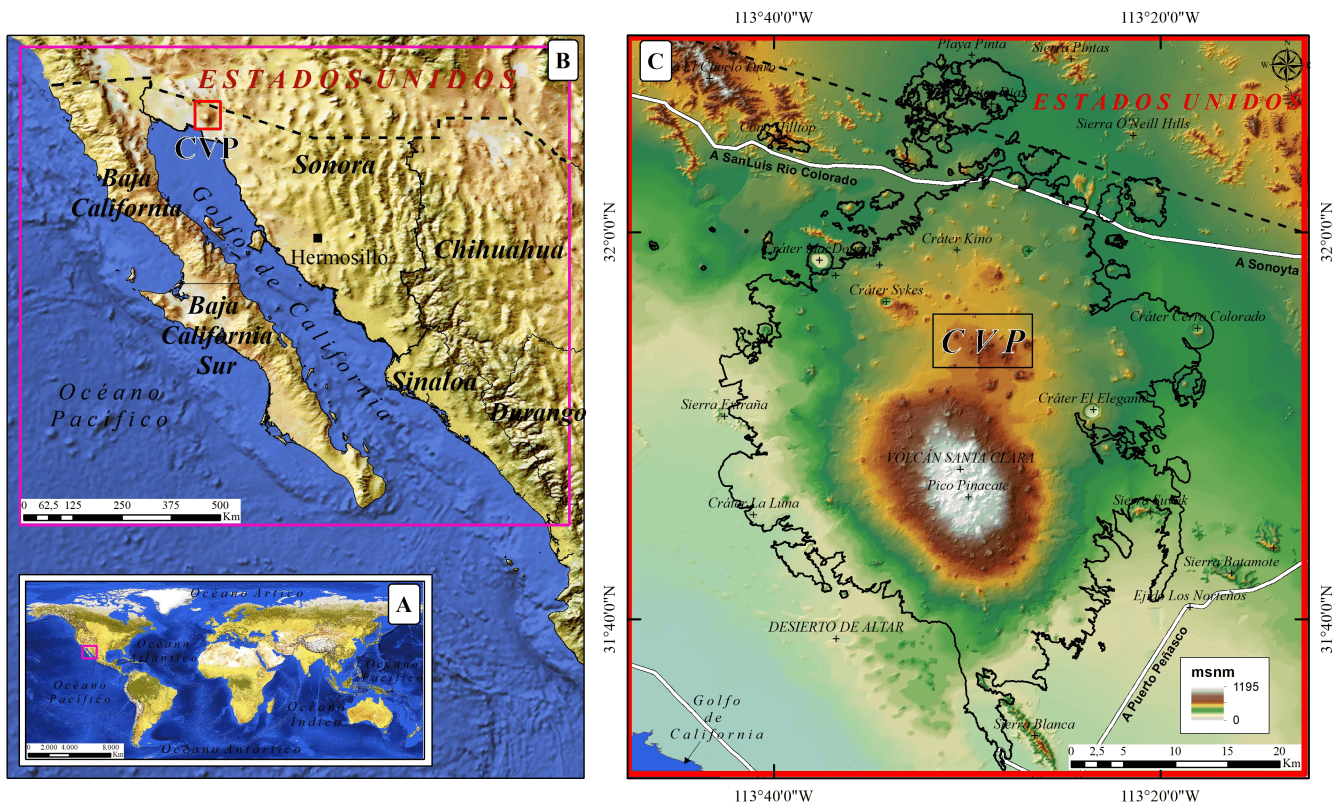


Figura 1: Mapas de localización del Campo Volcánico El Pinacate (CVP) A) Localización Global, B) Área en Sonora y USA, C) Área de estudio, con el límite del CVP (borde negro) sobre imagen altitudinal y relieve sombreado generado a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) ASTER de 30 metros de resolución, indicando algunos de los lugares más conocidos. / Figure 1: Location maps of the El Pinacate Volcanic Field (CVP) A) Global Location B) Area in Sonora and the USA C) Study area, with the CVP boundary (black border) an altitudinal image and a shaded relief derived from the Digital Elevation Model (DEM) ASTER of 30 meters resolution, indicating some reference places.

cas producidas por metamorfismo regional, afectadas por metamorfismo dinamotérmico, acompañado de deformación por cizalla.

Litológicamente, en los trabajos de SGM (2000) se identifican gneis de tipo ortogneis de grano grueso, formado por bandas y lentes plegados cuarzo-feldespáticos en color claro y de biotita con ferromagnesianos en color oscuro. El esquistos es de color gris verdoso oscuro, de grano fino, se encuentra asociado al gneis como cuerpos tabulares de espesor variable y consiste en biotita, cuarzo, hornblenda, moscovita, sericita, clorita y epidota.

3.1.2. Granito – Gneis Mesoproterozoico (MPTGr-Gn)

Esta unidad aflora en la parte sur, norte y noreste del área de estudio, principalmente en la Sierra Blanca, Las Ruinas, Sierra O' Neill Hills, Sierra Pintas, Sierra El Águila, Sierra El Choclo Duro, Tule Mountains, Sierra Hornaday y Sierra Heacey.

En algunos lugares, esta unidad está cubierta por conos volcánicos mucho más jóvenes del Cuaternario, como se da en el sector Cascada de lava, al norte, y La Discordancia en la Sierra Blanca, al sur.

Según descripciones de SGM (2015), el granito contiene abundantes megacrystalos de feldespato potásico de color gris

claro-blanquecino y ligeramente rosado, manchado por óxidos de hierro, en algunas zonas; presenta textura porfídica, con fuerte fracturamiento y se encuentra ligeramente foliado. El Gneis presenta un grano grueso, formando bandas y lentes plegadas de cuarzo-feldespato y un color blanco a crema con puntos negros y tonalidades de gris claro con franjas negras a la intemperie. Es de estructura compacta, foliada y textura lepidoblástica.

3.2. Rocas Cenozoicas

Por un lado, se trata de rocas volcánicas que se presentan en forma de coladas de lava y conos volcánicos, clasificados en tres grupos: serie Pre-Pinacate, la serie Santa Clara y la serie Pinacate. Por otro lado, se trata de una cobertura sedimentaria con depósitos no consolidados, que pueden ser formados como resultado de actividades hídricas, eólicas y por desprendimiento de talud.

3.2.1. Serie Pre-Pinacate: Vulcanismo del Mioceno

Este vulcanismo es evidenciado por manifestaciones relictas de antiguas rocas máficas, intermedias y ácidas (~ 20 Ma – 12 Ma) (Vidal-Solano et al. 2008) que forman afloramientos aislados y dispersos (Lynch, 1981; Vidal-Solano, 2001; SGM,

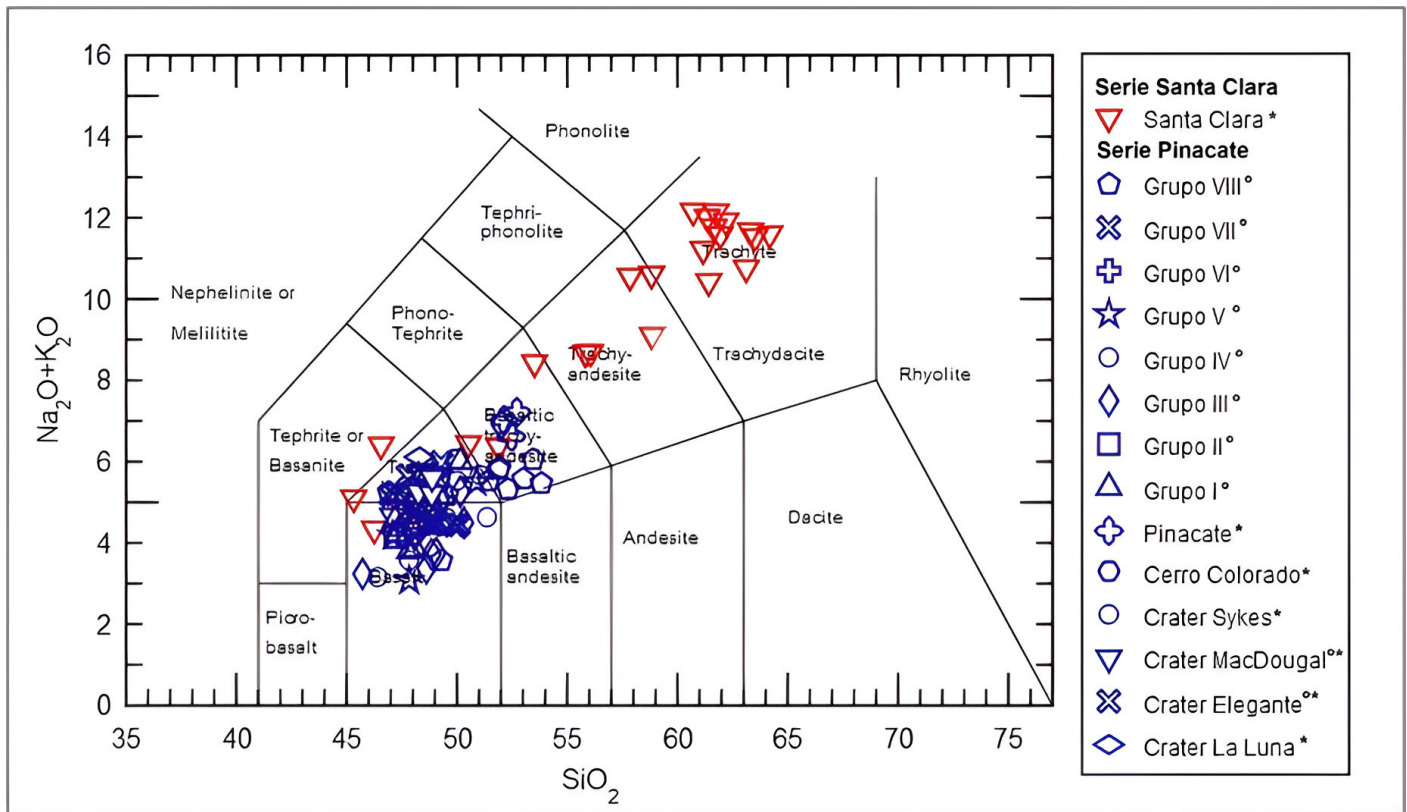


Figura 2: Diagrama de Alkalies Totales vs Silice (Na2O + K2O) vs (SiO2) (TAS) (Le Bas et al., 1986; Le Maître et al. 2002) para la clasificación de rocas volcánicas con base en los datos químicos de las series volcánicas Santa Clara y Pinacate reportados por Donnelly(1974,°) y Lynch(1981.*). / Figure 2: Diagram of Total Alkalies Vs Silica (Na2O + K2O) vs (SiO2) (TAS) (Le Bas et al., 1986; Le Maître et al. 2002) for the classification of volcanic rocks based on the chemical data of the series volcanic Santa Clara and Pinacate reported by Donnelly(1974,°) and Lynch(1981.*).

2015). Este vulcanismo en el CVP constituye la prolongación meridional de las manifestaciones miocenas de la misma naturaleza que se siguen desde Nevada hasta California en Estados Unidos de América (Vidal-Solano, 2005; Vidal-Solano et al. 2005; Vidal-Solano et al. 2008). A continuación, se mencionan las unidades Pre-Pinacate que son parte de este.

3.2.1.1 Basalto-Andesita Basáltica Mioceno (NmB-AB)

La unidad Basalto-Andesita basáltica del Mioceno se encuentra en el cerro San Pedro, Sierra Batamote, Cerro Mesita de Andesita, y en algunas partes de la cima de la Sierra Suvuk. Algo característico de estas lavas es su expresión morfológica en forma de mesa (Vidal-Solano, 2005; Vidal-Solano et al., 2008).

En esta unidad se realizaron tres dataciones. La datación 40Ar/39Ar en un basalto de la base del Cerro San Pedro indica una edad de 20.64±1.70 Ma, correspondiente al Aquitaniano (Vidal-Solano, 2005; Vidal-Solano et al., 2008). Por otro lado, la datación K-Ar en un basalto de la cima arroja una edad de 12.61±0.27 Ma (Lynch, 1981). Además, una datación en el Cerro Mesita de Andesita, con el mismo método, reveló una edad de 13.35±0.32 (Lynch, 1981) Ma, equivalente al Serravaliano.

Vidal-Solano, (1998); Vidal-Solano, (2001); Vidal-Solano, (2005); Vidal-Solano et al. (2005); Vidal-Solano et al. (2008)

describen que en este evento dominan las lavas de textura porfídica con grandes fenocristales de plagioclasa en asociación con el olivino (la gran mayoría iddingsitizado) y clinopiroxeno, en una matriz microcristalina que es constituida de plagioclasa, clinopiroxeno y olivino, lo que da origen a texturas seriadas o pilotaxíticas. Las rocas que forman las mesas tienen predominantemente una textura dolerítica porfírica y en algunos casos intergranular.

El SGM (2015) describe que, en el Cerro Mesita de Andesita, los flujos de andesita son color gris oscuro, de textura afanítica y con vesículas rellenas de zeolitas. Localmente los flujos de lava se ven masivos y algunos tienen aspecto caótico. Los basaltos son de color negro, textura afanítica y estructura compacta-masiva.

3.2.1.2 Basalto-Andesita Basáltica Mioceno Indiferenciado (NmB-AB-i)

Esta unidad se encuentra de manera dispersa, aislada y discordante sobre rocas del basamento (MptGr-Gn) en la parte noreste y sur del área. De acuerdo con observaciones generales, tiene las características morfológicas de la unidad Basalto-Andesita basáltica (NmB-Ab) y presenta una composición Intermedia - Básica (SGM, 2015), sin embargo, no existe en ella

una fecha radiométrica.

3.2.1.3 *Andesita-Dacita Mioceno (NmA-D)*

Esta unidad puede observarse en la Sierra Suvuk y en el Cerro Ladrilleros. Dos fechamientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ revelan que las dacitas tienen una edad de 13.53 ± 1.24 Ma en la Sierra Suvuk y de 12.04 ± 1.37 Ma en el Cerro Ladrilleros, por lo que ambas pertenecen cronoestratigráficamente al Serravaliano (Vidal-Solano, 2005; Vidal-Solano et al., 2008).

Descripciones de Vidal-Solano (2001) indican que el dominio de la Sierra Suvuk y Cerro Ladrilleros está constituido por distintas subunidades que edifican domos y forman una sierra muy escarpada compuesta de la base a la cima por: 1) una dacita gris con textura porfírica de plagioclasa, piroxeno y/o anfíbol, bordeada por una brecha volcánica del mismo color y mineralogía; 2) una alternancia de brechas de color gris constituida por fragmentos angulosos vitreos de aspecto fluidal englobados en una matriz de ceniza gruesa mal consolidada y derrames dacíticos de color gris, poco fluidos; 3) un paquete de lavas andesíticas, con un color café a marrón oscuro, fuertemente microvesiculares, con textura porfírica de plagioclasa y piroxeno oxidado, y 4) una secuencia de andesitas básicas, que se componen en su base por lapillitas rojas.

3.2.1.4 *Riolita hiperalcalina Mioceno (NmRH)*

Estas riolitas se clasifican geoquímicamente como comenditas y ocurren en la parte norte de la Sierra El Batamote, entre los cerros San Pedro y Ladrilleros, aproximadamente a 7 km al este del cráter Cerro Colorado. Las comenditas afloran en cuerpos dómicos de manera dispersa en forma de colinas de topografías suaves muy denudadas. La edad determinada para una comendita en la Sierra Batamote es de 12.16 ± 0.07 Ma (Vidal-Solano, 2005; Vidal-Solano et al., 2008) y para una al este del cráter Cerro Colorado es de 14.16 ± 1.15 Ma (Vidal-Solano, 2005).

Las comenditas son porfíricas, con fenocristales de feldespato alcalino de tipo sanidina, aegirina y rara fayalita. Los fenocristales se concentran en litofisas alargadas que marcan la dirección del flujo, dentro de una matriz vítrea perlítica, algunas veces desvitrificada. Su matriz muestra una gran abundancia de óxidos de hierro, así como la presencia de aenigmatita y arfvedsonita (Vidal-Solano, 2001; Vidal-Solano 2005).

3.2.1.5 *Riolita hiperalcalina Mioceno indiferenciado (NmRH-i)*

Esta unidad se localiza en tres pequeños cerros localizados al este del Cerro San Pedro. Presenta derrames con características morfológicas que le permiten ser asociada a la unidad Riolita hiperalcalina Mioceno. Sin embargo, no se cuenta aún con descripciones de campo, datos geoquímicos o dataciones.

3.2.2. *Serie Santa Clara: Vulcanismo poligenético del Pleistoceno*

Las unidades litoestratigráficas de esta serie edifican el Volcán en Escudo de Traquita Santa Clara nombrado y fechado por

Lynch en 1981 (1.70 Ma - 0.75 Ma; Damon et al., 1996). En este volcán, se desarrolla una continua serie de diferenciación magmática que progresa desde basaltos hasta traquitas, pasando por todos sus términos intermedios (Lynch, 1981).

Con base en los antecedentes cartográficos en el área del Volcán Santa Clara, se precisa a la Unidad 25 (Donnelly, 1974), la cual ha sido subdividida y actualizada en este trabajo. La revisión de la clasificación para las rocas que han sido analizadas geoquímicamente en esta serie (Figura 2) junto con la integración de los datos de sus edades y la observación de sus rasgos geomorfológicos han permitido identificar y describir nuevas unidades que son presentadas aquí bajo una nueva nomenclatura. Estas descripciones fueron realizadas por Arias-Murcia (2023).

3.2.2.1 *Hawaiita – Mugarita 25 Pleistoceno (Qp25H-M)*

Estas lavas se localizan a 3 km al sureste del Pico Carnegie, en la parte inferior de un cerro erosionado por la corriente de agua de un antiguo drenaje llamado por Lynch (1981) el Cañón de Lava. Infrayace a la unidad basáltica Qp25B y el aspecto de la superficie de su cuerpo rocoso es muy uniforme sin cambios de estructura. Una Hawaiita fechada por K-Ar tiene la edad más antigua reportada en la serie volcánica con 1.70 ± 0.04 Ma (Lynch, 1981), posicionándose estratigráficamente en el Calabriano. En la misma área se identificaron Mugaritas, en una muestra que comparte la misma posición estratigráfica, cuya edad fue de 1.45 ± 0.03 Ma (Lynch, 1981).

3.2.2.2 *Basalto 25 Pleistoceno (Qp25B)*

Las lavas de la unidad Basalto 25 Pleistoceno se localizan a 1.8 km al Sureste del Pico Carnegie. La datación K-Ar realizada por Lynch (1981) en una muestra de la unidad arroja un resultado de 1.54 ± 0.06 Ma, equivalente al rango estratigráfico de edad Calabriano. La superficie del cuerpo rocoso de esta unidad presenta un aspecto predominantemente uniforme con leves rasgos de estratificación.

3.2.2.3 *Basalto 12 Pleistoceno (Qp12B)*

Las lavas de la unidad Basalto 12 Pleistoceno se localizan en la periferia del límite del volcán primitivo Santa Clara, a 5 km al Noreste del Pico Carnegie. La clasificación petrológica de esta unidad se establece con base en su composición geoquímica a partir del muestreo realizado por Donnelly (1974) (Figura 2). El aspecto morfológico del cuerpo rocoso en la unidad es uniforme y fuertemente marcado por canales de drenaje.

3.2.2.4 *Mugarita 25 Pleistoceno (Qp25M)*

La unidad Mugarita 25 Pleistoceno se constituye por lavas masivas, poco estratificadas, que se localizan a 1 km al norte de los Picos Carnegie y Pinacate y colindan con la Cresta del Borego Cimarrón, una traducción del nombre original en inglés dado por Lynch en 1981 (Bighorn Ram Ridge). En esta área se reportaron para la unidad dos edades K-Ar correspondientes al Calabriano (Lynch, 1981). Una es de 1.15 ± 0.03 Ma en una mugarita y la otra es de 1.19 ± 0.05 Ma en una basanita.

3.2.2.5 *Mugarita 25 Pleistoceno Indiferenciado (QpM-i)*

Esta unidad está compuesta por lavas poco estratificadas que afloran a 3 km al noreste del Pico Pinacate, en una zona escarpada infrayaciendo la unidad Traquita Indiferenciada (Qp25T-i). No se tienen muestras químicas asociadas a esta unidad, pero, por su disposición geomorfológica y características similares, se asocia a la Unidad Mugarita 25 Pleistoceno (Qp25M) anteriormente descrita.

3.2.2.6 *Latita 25 Pleistoceno (Qp25L)*

Esta unidad está compuesta por lavas poco estratificadas que se localizan a 2.6 km al Noroeste del Pico Pinacate. Tiene una fecha K-Ar de 1.35 ± 0.04 Ma, lo que la posiciona estratigráficamente en el Calabriano (Lynch, 1981).

3.2.2.7 *Latita-Traquita 25 Pleistoceno (Qp25L-T)*

Las lavas ligeramente estratificadas a masivas de la unidad Latita-Traquita 25 Pleistoceno se localizan a 1.90 km al Noreste del Pico Carnegie. La edad de una muestra de latita es de 1.08 ± 0.08 Ma (Lynch, 1981), lo que la posiciona estratigráficamente en el Chibaniano. La Traquita no cuenta con información de edad, pero su clasificación se da a partir del muestreo químico de Lynch (1981) (Figura 2).

3.2.2.8 *Latita- Benmoreita 25 Pleistoceno (Qp25L-Be)*

La unidad Latita – Benmoreita 25 se localiza a 0.66 km al Sureste del Pico Carnegie. Se trata de lavas expuestas únicamente en 6 sectores, ya que gran parte de esta unidad ha sido cubierta por una lava más joven de la Serie Pinacate (Qp-VIII514B). Lynch (1981) proporcionó un dato geoquímico de la Qp25L-Be el cual permitió clasificarla petrológicamente, sin embargo, para esta unidad no se cuenta con información de edad.

3.2.2.9 *Traquita 25 Pleistoceno (Qp25T)*

En la unidad Traquita 25 Pleistoceno, se tienen 3 fechas K-Ar. Dos muestras fechadas en 1.26 ± 0.03 Ma y 1.14 ± 0.03 Ma, se categorizan cronoestratigráficamente en una edad Calabriano (Lynch, 1981). Otra muestra de 0.756 ± 0.019 Ma (Damon et al. 1996), que corresponde a la edad datada más joven para la serie Volcánica Santa Clara, se categoriza en una edad Chibaniano y se observa en el Pico Pinacate (ver Lámina con mapa).

Las lavas de la Traquita 25 Pleistoceno generalmente se caracterizan por su forma de domos, tal como lo señala Lynch (1981). En ocasiones, sus cuerpos rocosos forman estructuras "tableadas", caracterizadas por superficies horizontales y subhorizontales, similares a las observadas en la Cresta del Borrego Cimarrón. En la cima del Volcán Santa Clara se ha reportado un depósito piroclástico considerado como un aglomerado masivo de Traquita Pleistoceno (Qp25AT) (Lynch, 1981).

Por otro lado, un trabajo reciente puso de manifiesto la ocurrencia, en la serie Santa Clara, de rocas hiperalcalinas de tipo traquita comendítica, con acmita normativa, que están asociadas con las variedades silíceas más evolucionadas principalmente por la cristalización fraccionada de plagioclasa (Vidal-Solano et al., 2022).

3.2.2.10 *Traquita 25 Pleistoceno Indiferenciado (Qp25T-i)*

La Traquita 25 Pleistoceno indiferenciado es la unidad geológica menos expuesta de la serie volcánica. Aunque no se tienen datos químicos, se asocia en gran medida a la Traquita Pleistoceno pues comparte características de geoformas en domo y aspecto liso, masivo y con un relieve sobresaliente que es más resistente a la erosión.

3.2.2.11 *Traquita 22 Pleistoceno indiferenciado (Qp22T-i) y Traquita 20 Pleistoceno indiferenciado (Qp20T-i)*

Otras unidades, dispersas en el flanco este del volcán Santa Clara y con numeración distinta a la 25, pero asociadas de manera indiferenciada a las Traquitas de esta serie, son las unidades Qp22T-i y Qp20T-i, ubicadas a 5 km hacia el sureste del Pico Carnegie. Estas unidades se distinguen por ligeras geoformas en domos que contrasta notablemente con las lavas recientes que las rodean, formando paleorelieves y obstáculos para el flujo de los derrames más jóvenes.

3.2.3. *Serie Pinacate: Vulcanismo Monogenético del Pleistoceno-Holoceno.*

La edad K-Ar más antigua reportada para esta serie es de 1.099 ± 0.030 Ma (Lynch, 1981) y la más joven, 3.9 ± 0.059 Ka (Alva-Valdivia et al., 2019), fue obtenida con paleomagnetismo. Durante este periodo se terminó de edificar el Volcán en escudo Pinacate que cubre a gran parte del Volcán en Escudo de Traquita Santa Clara, pero se esparce principalmente en la planicie alrededor, siendo la cobertura volcánica, distinguible, más extensa del CVP (Donnelly, 1974; Cortés et al., 1976; Lynch, 1981; Gutmann, 2002; Kunze; 2006).

Composicionalmente, se producen rocas volcánicas poco diferenciadas que corresponden a Basaltos (B), Hawaiitas (H), Mugaritas (M), Traquibasaltos Potásicos (TP) y Shoshonitas (S) (Figura 2). Las estructuras más comunes asociadas a esta serie son los conos volcánicos monogenéticos de tipo cinerítico y de aglutinado y lavas de tipo aa, Pahoehoe y en bloques. Además, durante este evento volcánico se desarrollan actividades hidrovolcánicas que generan a volcanes tipo maar y surtseyano (Donnelly, 1974; Cortés et al., 1976; Lynch, 1981; Gutmann, 2002; Kunze; 2006; Alva-Valdivia et al., 2019).

El antecedente cartográfico detallado de las unidades geológicas de esta gran cobertura volcánica (Donnelly, 1974) indica un inventario numerado de derrames, en el cual, cuanto mayor sea el número asignado, la unidad es más joven (en algunos casos el número se repite con símbolo "+" o "o" para la misma unidad). Además, las unidades se asocian en grupos donde cada uno representa una unidad estratigráfica temporal caracterizada por la erupción de una secuencia de derrames. Las posiciones estratigráficas son relativas, debido a la ausencia de datos radiométricos, por lo que Donnelly (1974) evalúa secuencias o asociaciones similares de flujos de acuerdo con las modificaciones por erosión, meteorización y el grado de mineralización.

En total, la serie cuenta con 551 unidades inventariadas, desde el número 1 hasta el número 528 (Donnelly, 1974). Existen también unidades que han sido delimitadas como indiferen-

ciadas en cada grupo, que corresponden con aquellas que no cuentan con una información geoquímica de sus unidades.

Para el presente trabajo se retoma la representación espacial de las unidades cartografiadas y los grupos estratigráficos que maneja Donnelly (1974), sin embargo, ha sido actualizada asignando el tiempo cronoestratigráfico al que corresponde, nuevas edades reportadas, el grupo estratigráfico bajo un número romano, el número del inventario con un número arábigo y la clasificación petrológica por medio de geoquímica (Figura 2). Por ejemplo, las siglas de la unidad QP1144B, significan: QP: Cuaternario. Pleistoceno, II: Grupo, 144: Número del inventario y B: Basalto.

3.2.3.1 Rocas serie Pinacate grupo I (Qp11B-H-i – Qp1107B-H-i)

Este grupo está conformado por un total de 111 Unidades Volcánicas cuya numeración inicial es 1 y numeración final es 107. Las unidades de este grupo se localizan al oeste, noroeste, norte y cubriendo parte del área del Volcán Santa Clara, formando lavas, conos de aglutinado y conos cineríticos, ocupando un área total de 244.8 km².

De acuerdo con las muestras químicas recopiladas en algunas de las unidades de este grupo (Donnelly, 1974; Lynch, 1981) se reconocen Mugaritas (QpIM), Basaltos (QpIB), Hawaiitas (QpIH) y Basaltos y Hawaiitas indiferenciadas (QpIB-H-i).

Las edades K-Ar reportadas corresponden a 4 unidades: tres ubicadas en la edad cronoestratigráfica Calabriano (Qp16M con 1.099±0.030 Ma, Qp19+M con 995±29 Ka y Qp142B con 876±29 Ka) y una que corresponde a la posición cronoestratigráfica Chibaniano (Qp160M con una edad de 341±69 Ka; Lynch, 1981).

3.2.3.2 Rocas serie Pinacate grupo II (Qp1108B-H-i – Qp1185B-H-i)

El grupo estratigráfico II cubre un área de 129 km² y está conformado por 81 unidades geológicas, numeradas de la 108 hasta la 185. Estas unidades se distribuyen por todas partes formando lavas, conos de aglutinado y conos cineríticos.

De acuerdo con el muestreo químico de este grupo, las rocas se clasifican como basaltos (QpIIB) (Donnelly, 1974). Sin embargo, a las unidades que no cuentan con reportes de un muestreo geoquímico y petrológico se les clasificó como basaltos y hawaiitas de manera indiferenciada (QpIIB-H-i). Para este grupo, no se dispone de reporte de dataciones.

3.2.3.3 Rocas serie Pinacate grupo III (Qp11186H – Qp11382B-H-i)

Este grupo es el más extenso de los grupos estratigráficos. Abarca un área de 324 km² y está conformado por 202 unidades, numeradas desde la 186 hasta la 382. La mayoría de estas unidades se encuentran distribuidas en la mitad norte del CVP con algunas manifestaciones dispersas hacia el suroeste y sureste del campo volcánico.

En este grupo se forman lavas, conos cineríticos, conos de aglutinado y una estructura fisural derivada de una “cortina de fuego”.

De acuerdo a los datos químicos (Donnelly, 1974), se identifican Basaltos (QpIIIB), Traquibasaltos Potásicos (QpIIITP), Hawaiitas (QpIIIH), Mugaritas (QpIIIM), y otras unidades que corresponden a basaltos y hawaiitas indiferenciadas (QpIIIB-H-i). Para este grupo no se tiene reporte de dataciones radiométricas.

3.2.3.4 Rocas serie Pinacate grupo IV (QpIV383B-H-i – QpIV443B-H-i)

El grupo IV está conformado por 62 unidades numeradas desde la 383 hasta la 443. Gran parte de estos derrames cubren el área del Volcán Santa Clara y se ubican en la parte Noreste del CVP, ocupando un área de 169 km². En este grupo se describen lavas, conos cineríticos y conos de aglutinado.

Según la información geoquímica de Donnelly (1974) en el grupo se identifican las siguientes rocas volcánicas: Basaltos (QpIVB), Hawaiitas (QpIVH) y Traquibasalto Potásico (QpIVTP). Las unidades que no han sido analizadas químicamente se clasifican como basaltos y hawaiitas indiferenciados (QpIVB-H-i). Para este grupo no se tiene reporte de dataciones radiométricas.

3.2.3.5 Rocas serie Pinacate grupo V (QpV444B – QpV462B-H-i)

Las unidades de este grupo van desde la numeración 444 hasta la 462, siendo en total 22. Ocupan un área de 70 km² y se distribuyen predominantemente en la parte norte, noreste y este del CVP. Las unidades de este grupo constan de lavas, conos cineríticos y de aglutinado.

Las rocas de este grupo no cuentan con información de edad. Los datos químicos de algunas unidades (Donnelly, 1974) permitieron clasificarlas como Basaltos (QpVVB) y Hawaiitas (QpVH). Mientras que otras unidades que no contaban con información química, se reportan como unidad indiferenciada Basaltos y Hawaiitas (QpVVB-H-i).

3.2.3.6 Rocas serie Pinacate grupo VI (QpVI463B-H-i – QpVI471B-H-i)

Las unidades del grupo VI ocupan un área de 14 km². Se trata de 12 unidades numeradas desde la 463 hasta la 471. Algunas de estas unidades se localizan en la periferia del CVP formando conos de aglutinado en contacto discordante con rocas precámbricas.

Según la información geoquímica reportada por Donnelly (1974), varias unidades se clasificaron como Hawaiitas (QpVIH). Sin embargo, las unidades que no han sido analizadas químicamente se clasificaron como basaltos y hawaiitas indiferenciadas (QpVIB-H-i). Para este grupo no se cuenta con información radiométrica.

3.2.3.7. Rocas serie Pinacate grupo VII (QpVII472B – QpVII487B-H-i)

El grupo VII está conformado por 18 unidades numeradas

desde la 472 hasta la 487. Estas unidades se localizan cubriendo el volcán primitivo Santa Clara, al sur y este del CVP, ocupando 67 km². Las unidades de este grupo forman lavas, conos cineríficos y de aglutinado.

Para este grupo estratigráfico no se cuenta con información de dataciones, solo existe un muestreo químico (Donnelly, 1974) que clasifica a una unidad como basalto (QpVIIB). Las otras unidades se clasificaron como basaltos y hawaiitas indiferenciados (QpVIIB-H-i).

3.2.3.8 Rocas serie Pinacate grupo VIII (QpVIII488B – QpVIII528B-H-i)

Este es el último grupo estratigráfico de la serie Pinacate, conformado por 43 unidades numeradas del 488 al 528, que abarcan un área de 153 km². Estas unidades se encuentran cubriendo el Volcán Santa Clara y se distribuyen al sur, este y oeste del CVP, formando conos cineríficos, conos de aglutinado y lavas.

En este grupo, de acuerdo con los datos químicos (Donnelly, 1974, Lynch, 1981; Damon et al. 1996; Guttman et al., 2000; Paz-Moreno et al., 2008), se clasifican rocas como hawaiitas (QpVIIIH), basaltos (QpVIIB), mugearitas (QpVIIM), shoshonitas (QpVIIS), mientras que a las unidades sin geoquímica se les asignó una nomenclatura de basaltos y hawaiitas indiferenciadas (QpVIIB-H-i).

Las edades reportadas en las unidades de este grupo se pueden apreciar en la Tabla 1, en donde se observa que la mayoría son Pleistoceno Superior, sin embargo, es importante mencionar que el derrame más joven de la unidad QhVIII520B-H-i pertenece al límite del Pleistoceno y el Holoceno con una edad de 11.2±0.23 Ka (Rodríguez-Trejo et al., 2019).

3.2.3.9 Basalto Pleistoceno Indiferenciado (QpB-i)

Esta unidad corresponde a derrames y conos volcánicos que se originan en la Serie Pinacate y se asocian de manera indiferenciada a la roca ígnea más común de la serie, el Basalto.

Esta unidad tiene varias implicaciones en la cartografía geológica del CVP. La primera, es que en trabajos anteriores, algunos polígonos no fueron asignados a un grupo estratigráfico o a una numeración específica, por lo que en su momento el nombre dado fue Extrusivos Pinacate (Qp) (Donnelly, 1974).

La segunda, es que esta unidad se encuentra en los bordes de los volcanes tipo maar como estratos o columnas de basaltos expuestos y en conos volcánicos afectados por una actividad freatomagmática posterior; para estos casos, además de Qp (Donnelly, 1974) también han sido llamados Basalto en Capas delgadas (b) y Basalto en capas gruesas (bcg) (Cortés et al. 1976).

La tercera, corresponde a una separación de derrames y conos volcánicos que formaban parte de grandes unidades pertenecientes a series volcánicas diferentes (e.g. la Unidad 25) y que en el presente trabajo se detectaron como parte de la Serie Pinacate.

3.2.3.10. Depósitos de Oleada Piroclástica (Qdop)

Los depósitos de oleada Piroclástica (Qdop) corresponden a

depósitos exteriores que forman un anillo de proyecciones en el borde de los cráteres de los volcanes tipo maar (Cázares, 2013). Son descritos como tobas brechas y tobas líticas estratificadas con capas de espesores reducidos. En estos depósitos se pueden encontrar tres tipos de fragmentos piroclásticos: juveniles (e.g. bombas), accesorios y accidentales.

En el cráter Cerro Colorado se ha obtenido la edad más reciente para las rocas del CVP, basada en datos paleomagnéticos (Alva-Valdivia et al., 2019). Esta fecha proviene de muestras recolectadas en bombas de coliflor juveniles, así como en bloques piroclásticos accesorios y accidentales no juveniles incrustados en los depósitos de oleada piroclástica palagonitizada, resultando en una edad de 3,915±59 años antes del presente.

3.2.4. Depósitos Sedimentarios

3.2.4.1 Depósitos de Talud (Qta)

Estos depósitos, presentes en los volcanes tipo maar de los llamados cráteres La Luna, Celaya, Sykes, MacDougal, Badiillo, El Elegante, El Trébol y Molina son acumulaciones de fragmentos de roca y de suelo, de bloques rocosos de diversas formas y tamaños, que se desprendieron de las paredes.

3.2.4.2 Depósitos de Piso del Cráter (Qpc)

Los depósitos de Piso del Cráter se encuentran en la parte interna de los cráteres de los volcanes tipo maar y presentan generalmente una superficie plana. Donnelly (1974) describe estos depósitos como un conjunto indiferenciado de material rodado formado por aluvión, arena eólica y sedimentos de playa.

3.2.4.3 Depósitos Tobacíticos y Epiclásticos (Qdte)

Este depósito es exclusivo del volcán tipo surtseyano más joven del CVP, el Cerro Colorado. El Qdte está conformado por arenas y limos tobacíticos y se localiza en la parte más externa del cráter, rodeando a los depósitos de oleada piroclástica (Qdop).

3.2.4.3 Detritos de Pedimento (Qdp)

Corresponden a detritos de pedimento indiferenciados, derivados principalmente de rocas del basamento cristalino. Incluye detritos volcánicos menores, arena y limo arrastrados por el viento (Donnelly, 1974). Estos sedimentos bordean las sierras del basamento. Se observan predominantemente al norte y al este del área de estudio, y en pequeña proporción al oeste, rodeando la Sierra Extraña.

3.2.4.4 Sedimentos eólicos (Qe)

Comprenden sedimentos arenosos cuarzo - feldespáticos, cuya clasificación varía de buena a moderada, según su posición dentro de la morfología de la duna y/o tipo de duna (Solis-Limón, 2003). Estos sedimentos son de los más espectaculares y característicos del Desierto de Altar rodeando a todo el CVP.

3.2.4.5 Depósitos de Playa (Qpl)

Los depósitos de playa se ubican en pequeñas cuencas cerradas con depresiones topográficas que se generan durante la

Autor	Tipo de datación	Muestra	Edad	Unidad	Periodo	Época
Rodríguez-Trejo et al. (2019)	P	PVF-122	11,2 ± 0,23 Ka	QhVIII520B-H-i	Holoceno	Groenlandiano
Guttman et al. (2000)	Ar-Ar	96-34	12 ± 4 Ka	QpVIII526S	Pleistoceno	Superior
Rodríguez-Trejo et al. (2019)	P	PVF-108	13,5 ± 0,5 Ka	QpVIII494B	Pleistoceno	Superior
Turrin et al. (2008)	Ar-Ar	P04	13 ± 3 Ka	QpVIII494B	Pleistoceno	Superior
Guttman et al. (2000)	Ar-Ar	96-35	27 ± 6 Ka	QpVIII521B	Pleistoceno	Superior
Guttman et al. (2000)	Ar-Ar	PVF-101	38 ± 8 Ka	QpVIII514H	Pleistoceno	Superior
Damon et al. (1996)	K-Ar	PTMB	0,12 ± 0,05 Ma	QpVIII492H	Pleistoceno	Superior
Lynch (1981)	K-Ar	PSM	0,410 ± 0,04 Ma	QpVIII514B	Pleistoceno	Chibaniano

Tabla 1: Edades reportadas para unidades pertenecientes a Grupo VIII en miles de años (Ka) y millones de años (Ma) / Table 1. Ages reported for units belonging to Group VIII in thousands of years (Ka) and millions of years (Ma)

constante modificación del relieve por la reciente actividad volcánica del CVP (Cázares, 2013). Dependiendo de la temporada de lluvias, en estas playas se demarcan patrones de drenaje a lo largo del año.

En el área de estudio se encuentran 5 depósitos de este tipo: Playa Pinta, Playa Diaz, una playa al noroeste de La Playa Diaz, otra al sur de la Sierra Batamote y dos en la parte norte del CVP.

3.2.4.6 Depósitos Aluviales (Qal)

Los depósitos aluviales se encuentran rodeando los depósitos fluviales del Río Sonoyta y del Arroyo Palo Fierro y también se localizan en llanuras aluviales ubicadas en el sector norte del CVP. Estos depósitos están compuestos principalmente por epiclastos de lapilli escoriáceo, arena, limo y arcilla (Donnelly, 1974).

3.2.4.7 Depósitos Fluviales (Qf)

Estos depósitos están conformados principalmente por cantos, arena y limos derivados principalmente de rocas basálticas y rocas cristalinas del basamento (Donnelly, 1974). Estos se han formado por la acción de drenajes principales, como lo son el Río Sonoyta, el Arroyo Palo fierro y el formado por corrientes de agua intermitente en temporada invernal.

4. Conclusiones

La elaboración de la Cartografía Digital del Campo Volcánico El Pinacate brinda un mayor entendimiento de la geología volcánica de la zona, representada por una estratigrafía que comprende 573 unidades litológicas pertenecientes a tres Series Volcánicas: a) Serie Pre-Pinacate del Mioceno (5 unidades); b) Serie Santa Clara del Pleistoceno (14 unidades) y c) Serie Pinacate del Pleistoceno-Holoceno (554 unidades).

La clasificación geoquímica de las unidades volcánicas, sus geoformas y su distribución espacial, permiten establecer que el volcanismo más antiguo del CVP es el más geodiverso y se conforma por mesas, cerros escarpados y lomeríos constituidos por basalto, andesita basáltica, andesita, dacita y riolita hipercalina (comendita).

La Serie Santa Clara se constituye por rocas derivadas de un volcanismo de tipo poligenético representado por la edificación

de un antiguo Volcán en Escudo de Traquita (Lynch, 1981) que se compone en mayor proporción por basalto, hawaiiita, mugearita, benmoreita y traquita y en menor por Latita.

La Serie Pinacate está compuesta por rocas derivadas de un volcanismo más reciente en el área, de tipo monogenético y poco diferenciado. En él se propició el desarrollo de conos cinderíticos, de aglutinado, volcanes de tipo maar y un cono surtseyano, los cuales están mayormente compuestos por basalto hawaiiita, mugearita, y en menor proporción por traquibasalto potásico y shoshonita.

Software

Los softwares utilizados para el presente trabajo son:

- ArcGIS de ESRI versión 10.8.1: Digitalización, rotulación, procesamiento digital de imágenes satelitales, ajuste espacial e interpretación visual de imágenes, rotulación mapa final.
- IGPET Igneous Petrology Software: Procesamiento de datos geoquímicos y clasificación de rocas ígneas.
- SAS Planet: Descarga de imágenes de alta resolución en Color natural BING y MAP BOX.
- Google Earth: Ayuda en visualización con relieve del área del estudio.

Agradecimientos y financiamiento

Al programa de Maestría en Ciencias-Geología de la Universidad de Sonora (UNISON) en especial a los miembros del Comité tutor de la autora por su valiosa asesoría: MC. Alba Lucina Martínez, Dr. Luis Manuel Alva Valdivia † y Dr. Francisco Abraham Paz Moreno. A los jóvenes Andrea Jaramillo Flores y Leonardo de Santiago León Figueroa por su apoyo y asistencia en el campo. Al Dr. Alain Demant por su asesoría y revisión del mapa geológico. El presente mapa fue elaborado con recursos obtenidos de la beca de Maestría en Ciencias-Geología otorgada por CONACYT-OEA-AMEXID 2020. Los autores agradecen al Dr. Gerardo Carrasco, a la Dra. Marie-Noëlle Guilbaud y a un revisor anónimo por sus valiosos comentarios que ayudaron a enriquecer este documento.

Diseño del mapa

El diseño del mapa final surge a partir de la revisión de la presentación de mapas elaborados en algunas zonas volcánicas en el mundo (Barberi et al., 1970; Demant, 1981; Pardo et al., 2019, Pulgarín et al., 2022) los cuales muestran una leyenda compacta, una descripción especializada, la localización, símbolos topográficos y la información de referencia para complementar el entendimiento del mapa.

El Mapa geológico digital del Campo Volcánico El Pinacate (CVP) a escala 1:100, 000 presenta un tamaño de impresión de 123 x 88 milímetros. En él se encuentran mapa, columna estratigráfica, leyenda geológica, descripción, bibliografía, rótulo, mapa de localización, símbolos topográficos y límites, nota e información de referencia. La asignación de colores para cada una de las unidades se realizó con base al antecedente cartográfico “Geological Map of the Erta Ale Volcanic Range, Danakil Depression – Ethiopia” (Barberi et al., 1970).

Referencias

- Alva-Valdivia, L. M., Rodríguez-Trejo, A., Vidal-Solano, J. R., Paz-Moreno, F., Agarwal, A., 2019. Emplacement temperature resolution and age determination of Cerro Colorado tuff ring by TRM analysis, El Pinacate Volcanic Field, Sonora, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 369, 145–154, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.012>.
- Arias-Murcia, K. Y., 2023. Historia eruptiva del Campo Volcánico El Pinacate a partir de la cartografía volcánica digital. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. México.
- Barberi, F., Borsi, S., Ferrara, G., Marinelli, G., Varet, J., 1970. Relations between tectonics and magmatology in the northern Danakil Depression (Ethiopia). *Philosophical Transactions for the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 293–311 <https://www.jstor.org/stable/73622>.
- Cortés, E. A., Fernández, M. A., Franco, E. M., Vera, E., 1976. Geología del área volcánica del Pinacate en el Desierto de Altar, Sonora, México. Tesis Profesional. Instituto Politécnico Nacional.
- Cázares, F., 2013. Comportamiento Volcánico-hidrotermal del sistema Maar-diatrema del cráter El Elegante: Campo Volcánico El Pinacate, Sonora, México. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.
- Damon, P. E., Shafiqullah, M., Harris, R. C., Spencer, J. E., 1996. Compilation of unpublished Arizona K-Ar dates from the University of Arizona laboratory of isotope geochemistry, 1971-1991. *Arizona Geological Survey*.
- del Servicio Geológico Colombiano, L., 2022. Estándar geográfico para mapas geológicos de volcanes colombianos. Libros del Servicio Geológico Colombiano, <https://doi.org/10.32685/9786289548501>.
- Demant, A., 1981. L'axe Néo-Volcanique transmexicain: étude volcanologique et pétrographique, signification géodynamique. Thèse de doctorat. Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III.
- Donnelly, M. F., 1974. Geology of the Sierra del Pinacate volcanic field, northern Sonora, Mexico, and southern Arizona, USA. Doctoral Thesis. Stanford University.
- Gutiérrez-Anguamea, G. A., 2006. Petrogénesis ígneo-metamórfica y geomorfología de la porción meridional de la región de El Pinacate, Sonora, México. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora.
- Gutmann, J. T., 1976. Geology of Crater Elegante, Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 87 (12), 1718–1729, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87)
- Gutmann, J. T., 2002. Strombolian and effusive activity as precursors to phreatomagmatism: eruptive sequence at Maars of the Pinacate Volcanic Field, Sonora, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113 (1–2), 345–356, [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00265-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00265-7).
- Gutmann, J. T., 2007. Geologic studies in the Pinacate Volcanic Field. *Journal of the Southwest* 49 (2), 189–243, <https://www.jstor.org/stable/i40004645>.
- Gutmann, J. T., Sheridan, M. F., 1978. Geology of the Pinacate volcanic field with Field Trip Guide. Vol. 2 of Special Paper. Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology.
- Gutmann, J. T., Turrin, B. D., Dohrenwend, J. C., 2000. Basaltic rocks from the Pinacate Volcanic Field yield notably young 40Ar/39Ar ages. *EOS* 81 (4), 33–44, <https://doi.org/10.1029/00EO00018>.
- Kunze, A. G., 2006. A geographic information system for the Pinacate Volcanic Field of Sonora, Mexico and examples of some applications. Master Thesis. California State University.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27, 745–750, <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.
- Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., Bate-man, P., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P. A., Schmid, R., Sørensen, H., Woolley, A. R., 2002. *IGSR: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks.*, 2nd Edición. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Lynch, D. J., 1981. Genesis and geochronology of alkaline volcanism in the Pinacate Volcanic Field Northwestern Sonora, Mexico. Doctoral Thesis. The University of Arizona.
- Pardo, N., Pulgarín, B. A., Betancourt, V., Lucchi, F., Valencia, L. J., 2019. Facing geological mapping at low-latitude volcanoes: The Doña Juana volcanic complex study-case, SW-Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 385, 46–67, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.04.016>.
- Paz-Moreno, F. A., Demant, A., Ortega-Rivera, A., 2004. El Volcanismo alcalino sódico del Pleistoceno inferior en el Campo Volcánico El Pinacate, Sonora México: Una serie de diferenciación continua de basalto a traquita. Presentado en la IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, 31 octubre a 5 de Noviembre de 2004.
- Rodríguez-Trejo, A., Alva-Valdivia, L. M., Vidal-Solano, J. R., 2019. Paleomagnetism and rock magnetic properties of Late Pleistocene volcanism from El Pinacate Volcanic Field, northwest Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* 96, 102368, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102368>.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2015. Informe de la Carta Geológico-Minera Los Vidrios Clave H12-C82, escala 1:50,000, Estado de Sonora. Servicio Geológico Mexicano, México.
- (SGC), S. G. C., 2016. Estándar cartográfico para mapas geológicos a escalas 1M, 500K, 50K, 25K y 10K. Libros del Servicio Geológico Colombiano.
- (SGM), S. G. M., 2000. Informe de la Carta Geológico-Minera Puerto Peñasco Clave H12-1, escala 1:250000, municipio de San Luis Rio Colorado, Puerto Peñasco, Sonoyta, Caborca y Altar, Sonora. Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- (SGM), S. G. M., 2002a. Carta Geológico-Minera [Mapa]. Escala 1:250,000, clave: H12-10 Los Vidrios. Servicio Geológico Mexicano (SGM), México.
- (SGM), S. G. M., 2002b. Cartas Geológico-Minera [Mapa]. Escala 1:250,000, claves: H12-1 Puerto Peñasco. Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- (SGM), S. G. M., 2015. Carta Geológico-Minera [Informe]. Escala 1:50,000, clave: H12-C82 Los Vidrios. Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- Solís-Limón, M. F., 2003. Caracterización y procedencia de las dunas que bordean al Campo Volcánico El Pinacate, Sonora, México. Universidad de Sonora, México.
- SPP, 1982. Carta Geológica [Mapa]. Escala 1:250,000, clave: H12-1 Puerto Peñasco. Programación y Presupuesto (SPP), México.
- Turrin, B. D., Gutmann, J. T., Swisher III, C. C., 2008. A 13±3 ka age determination of a tholeiite, pinacate volcanic field, Mexico, and improved methods for 40Ar/39Ar dating of young basaltic rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 177 (4), 848–856, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.049>.
- Vidal-Solano, J. R., 2001. Estudio petrogenético del evento volcánico neógeno pre-Pinacate, El Pinacate, Sonora, México. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora.
- Vidal-Solano, J. R., 2005. Le volcanisme hyperalcalin d'âge miocène moyen du nord-ouest du Mexique (Sonora). *Minéralogie, Géochimie, cadre géodynamique. Thèse de doctorat, Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III*.
- Vidal-Solano, J. R., Arias-Murcia, K. Y., Paz-Moreno, F. A., Alva-Valdivia, L. M., Martínez-Haros, A. L., 2022. Análisis espacio-temporal y geoquí-

- mico del campo volcánico el pinacate en bases de datos: perspectivas en clasificación y evolución magmática. *Actas INAGEQ* 28, 142–143.
- Vidal-Solano, J. R., Demant, A., Paz-Moreno, F. A., Lapierre, H., Ortega-Rivera, M. A., Lee, J. K. W., 2008. Insights into the tectonomagmatic evolution of nw mexico: Geochronology and geochemistry of the miocene volcanic rocks from the pinacate area, sonora. *Geological Society of America Bulletin* 120 (5–6), 691–708, <https://doi.org/10.1130/B26053.1>.
- Vidal-Solano, J. R., Paz-Moreno, F. A., Demant, A., 2005. Caracterización y cronología del evento volcánico terciario pre-pinacate, campo el pinacate, noroeste de sonora, México. *Boletín departamento de Geología UniSon* 18 (19), 117–140.

This article accompanies the following material:

Static map: [10.22201/igg.25940694e.2024.2.114.3](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.2.114.3)