

# Origen y modelo de formación de la piedra semi-preciosa Larimar en la Sierra de Bahoruco, República Dominicana

J. A. Espi<sup>(1)</sup> y C. Pérez-Puig Obieta<sup>(2)</sup>

(1) Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingenieros de Minas y Energía. Ríos Rosas 21, 28003 Madrid  
joseantonio.espi@upm.es

(2) Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingenieros de Minas y Energía. Ríos Rosas 21, 28003 Madrid  
donosty1984@hotmail.com

## RESUMEN

La investigación sobre el origen y evolución de una piedra preciosa como el Larimar, en la República Dominicana, ha precisado, para su comprensión, de las mismas herramientas que un yacimiento metálico con sentido económico. Esta piedra tan singular es la consecuencia de variados procesos que condicionan, primero, la aparición de una pectolita sin valor estético alguno y, después, modifican las sus condiciones de formación hasta que conseguir un producto excepcional por su coloración. El proceso en la Isla Hispaniola comienza en el Cretácico Superior con emisiones de lavas basálticas que construyen un "plateau" oceánico que, en el yacimiento de Larimar de los Cheheses, emerge y, en colaboración con la deposición de materiales orgánicos, la alteración hidrotermal de la pila volcánica produce una concentración de pectolita de coloración azulada apta para su uso en joyería. La tectónica del Mioceno-Plioceno complicará su estructura hasta configurar la disposición actual, al mismo tiempo que hace aflorar los materiales volcánicos ocultos debajo de una potente serie sedimentaria eocena.

Palabras clave: geología Caribe, metalogenia, mineralogía, piedras preciosas.

## ***Origin and model formation of the semi-precious Larimar stone in the Sierra de Bahoruco, Dominican Republic***

### ABSTRACT

*The investigation of the origin and evolution of the Larimar gemstone in the Dominican Republic, has required the same scientific tools as used for some valuable metal deposits. This singular stone is the consequence of various processes that determine, firstly, the emergence of a pectolite without any aesthetic value, and then the conditions are modified until finally an outstanding product is obtained due to its coloration. The process in the Hispaniola Island begins in the Upper Cretaceous with basaltic lava emissions which create an oceanic "plateau" in the Checheses Larimar area, then emerge and, with the help of the deposition of organic materials, produce a hydrothermal alteration of the volcanic pile producing a pectolite concentration with a blue coloration suitable for use in jewellery. The Miocene-Pliocene tectonic changes its primitive structure until the current form is configured ated, whilst at the same time the hidden volcanic material crops out below a thick Eocene sedimentary series.*

*Keywords: Caribbean geology, gemstones, metallogeny, mineralogy.*

### ABRIDGED ENGLISH VERSION

#### ***Aim of the study***

*The Larimar stone is a green and blue coloured pectolite. Its attractive colour and its hardness, the possibility*

*of polishing it and making it shine make this material an excellent jewellery stone. This pectolite variety is a mineral singularity not found anywhere else in the world (Fig. 1 and 2).*

### **The ore geology**

The Los Checheses Larimar mine is situated in the geological domain called Hotte-Salle-Bahoruco (Lewis and Draper, 1990). Tectonostratigraphic units run through the island with a WNW-ESE direction marking structural zones. The unit containing the Sierra de Bahoruco, is named as ZFEPG (Enriquillo-Plantain Garden). In the area occupied by the Larimar exploitations and its surroundings, Cretaceous Cenozoic volcanic and sedimentary materials emerge. According to Marc Joubert and others, the oldest materials correspond to the basic character of volcanic episodes that form the substrate of subsequent sedimentary series and have been dated by analogy to the Upper Cretaceous (Training Dumisseau) and emerge in different areas of the island, always related to the arc-island and the Caribbean oceanic plateau. According to Girard et al. (1982), these basalts are of a non-orogenic, tholeiitic oceanic type.

In the immediate surroundings of the Checheses Mine, the structure is strongly dominated by the laminations in a "structural flower", linked to the Cito River sinistral fault. Furthermore, in a much wider area, this provision seems to be repeated in a much larger fractal dimension. The main deformation in the study area occurs from the Lower-Middle Pliocene to the continued lifting of neighbouring mountains and thrust on the Enriquillo basin. The deformation and lifting continued throughout the Holocene to the present.

A substrate of volcanic basaltic composition is where the Larimar mineralization "arm" is. It appears as no more than a kilometer in length and divided into structural units. In the Larimar Mine, volcano sedimentary series appear thanks to the strain caused by the Cito River fault.

Volcanic terms that have been observed from the drill holes, the 420m of the main gallery and the fronts of the small underground mining and scarce outcrops in the exploitation area rarely produce a clear stratigraphic sequence. This is due to the internal basaltic lenses accommodation and the overlapping of tectonic sheets. It can differentiate the following terms from more modern to oldest:

- A polygenic or pyroclastic series that covers other terms, mainly lavas.
- Several episodes or basaltic lavas rarely intact, massive, brecciated and hydrothermally altered. In the lower part pillow lava figures have been detected (Fig. 9).
- Tuff phases interspersed in the previous episodes, sometimes confused with slope deposition phenomena.
- In the SYSMIN gallery, a micro-basalt dike appeared, homogeneous and fresh.
- Volcanic slope-material flow. Various types of phenomena related to flow deposition slope have been recognized: "avalanche flow", "debris flow", "lahar". J. A. Espi (1997 and 2008), has devoted much attention to defining and recognizing each of the above terms, concluding that slope sedimentation is between avalanche phenomena and others with minor particle size and greater extent, always with abundance of liquid between the intergrain spaces. It is thought that the overall slope profile corresponds to a situation situated between medium and low slope and showing a confrontation area between soil destabilization and intense plant colonization.
- Paleo-soils, channels and surface crusts. These phenomena are repetitive and in general, ancient soils present very similar structures: clay, clay minerals, rock fragments and saprolites altered base (Figs. 8 and 9). The presence of organic matter signals (coked plant stems, fruits, etc.) is widespread on these levels, indicating the degree of plant colonization.
- In principle, the area occupied by the Larimar mining operations is divided into five distinct structural sheets, in addition to presenting internal links within them and transition zones. Within each, at least two of the three recognized stratigraphic terms present throughout the area surround the most important exploitations: basic type of volcanic materials, comprising basaltic effusions both slope and other depositional types, with or without flow. Above this heterogeneous phase pyroclastic deposition overlaps nearly 30 meters at its thinnest area. Above it greatly tectonized calcareous sedimentary series appear.

### **Formation conditions of bluish pectolite**

The Spanish National Coal Institute has studied selected samples containing organic materials on slopes of the volcanic depositional series. The most important conclusions related with the genesis study are as follows:

- The heating of organic matter, charcoal, must have been very fast. The conditions cannot have been very oxidizing or for a very long time.
- The condensed volatiles deposited in cracks and interfaces, were probably formed by a procedure similar to pyrolytic carbon deposited in voids and cavities in the process of coking coal. The process temperature was probably around 300 °C.

Furthermore, fluid inclusions trapped in crystallographic planes of calcite have been studied. In them, the salinity varies between 3.5 and 5.5% eq. NaCl, indicating a moderate salinity fluid, even somewhat above the seawater, which seems to indicate that the source may be hydrothermal fluid or a mixture. Two temperatures are recognized, one (the most abundant) in the range of 280 °C to 290 °C and the second over around 340 °C (Fig. 26).

### **Model proposal**

The process starts in the volcano with flow hillside deposition of fine materials episodes such as lahar type products on slope instability, sometimes with detachment of large blocks, "flow avalanche" or "debris flow." The fine material flow starts at the top of the volcano and, running along a canal, moves quickly down the slope.

- In these channels, partially filled with fine materials, a dense tropical forest quickly develops. Maintaining volcanic activity mountainside produces earth quakes and new water and mud streams, dragging crushed large materials and transporting destroyed organic material no great distance, conserving part of the soil where it developed.

- This process was developed repeatedly, closing the loop block avalanche and burying recent paleo-soil horizons.

- Shortly after the burial of the plant matter, there is a full thickness lithification of fine sediment. Probably the organic matter is carbonized in this episode, freeing up space inside the inner mould and invading buried stems promoting fluid and fine particles. Thus, pectolite laden sludges coming from lower levels invade the gaps left by the organic matter expansion at growing sequence replaced, firstly, by coked carbonaceous material, and then, repeatedly, the above substitutions, providing colour from timidly clear and blue to turquoise green at the end. Fluid inclusion studies conducted on calcite belong to the last deposition, according to a temperature consistent with the coking of organic material (250 °C - 300 °C). The generation times were very close. The salinity of this fluid invites us to think of a convection cell where nearby seawater also participated.

- With the burial of the first volcanic series due to a powerful pyroclastic deposit, the hydrothermal main stage disappears. In the matrix of the pyroclastic fragments pectolite and calcite appear (Fig. 41).

- The current site structure is fully affected by the deformation phase linked to the Cito River fault and stacking structural sheets where the dispersion and coloured pectolite ores are located.

### **El objeto del estudio**

El Larimar es, desde el punto de vista mineralógico, una pectolita (silicato cálcico-sódico.  $(\text{SiO}_3)_3 \text{Ca}_2\text{NaH}$ ) coloreada en tonos verdes y azules y que, en su variedad más apreciada, adquiere una tonalidad turquesa. Su atractivo color así como su dureza, aptitud al pulido y su brillo hacen de esta piedra un excelente material de joyería.

Esta variedad de pectolita es de una singularidad total, no habiéndose encontrado hasta el momento este mineral coloreado en tonos azulados en ningún otro lugar del Planeta (Fig.1 y 2).

### **Geología general de la Isla La Española**

La geología actual de la isla La Española (Fig. 3) resulta de la convergencia oblicua OSO a SO del margen continental de la placa de Norteamérica con el sistema de arco isla cretácico caribeño, que se inició en el

Eoceno-Mioceno Inferior y continúa en la actualidad (Donnelly *et al.*, 1990; Mann *et al.*, 1991; Draper *et al.*, 1994). Las rocas del arco están regionalmente cubiertas por rocas sedimentarias siliciclásticas y carbonatadas de edad Eoceno Superior a Plioceno, que postdatan la actividad magmática del arco isla y registran la colisión oblicua arco-continente en el norte, así como la subducción activa en su margen meridional (Dolan *et al.*, 1998).

El dominio geológico sur de la Isla incluye a la Sierra de Bahuco y el promontorio submarino de Beata, quedando limitado estructuralmente al norte por la Zona de Falla de Enriquillo-Plantain Garden (ZFEPG) y por el sur por la costa caribeña. Sus principales materiales geológicos son los basaltos con intercalaciones de rocas sedimentarias pelágicas (Calmus, 1983; Maurrasse *et al.*, 1979; Bellon *et al.*, 1985), aflorantes en el núcleo de una serie de anticlinales de la Sierra de Bahuco. Maurrasse *et al.*, 1979 y Sen *et al.*, 1988 representan este terreno como un fragmento emergido del plateau oceánico caribeño.



**Figura 1.** Situación de la Sierra de Bahoruco y el yacimiento de Larimar de Los Checheses, al sur de la isla La Española.  
**Figure 1.** Situation of the Bahoruco and the Los Checheses Larimar deposit in the south of Hispaniola island.

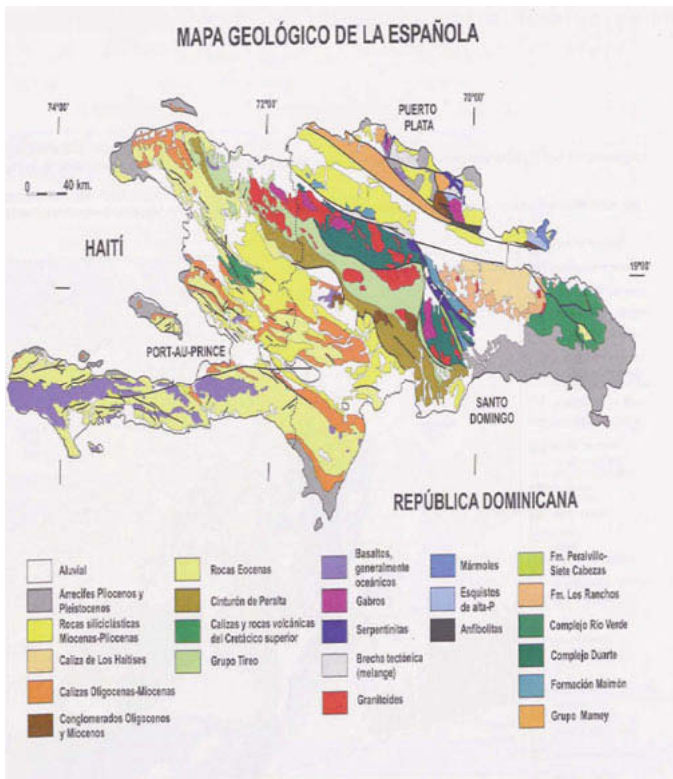


**Figura 2.** La pectolita coloreada (Larimar) posee un atractivo como piedra semipreciosa y es cada vez más conocida.  
**Figure 2.** The coloured pectolite (Larimar) is attractive as a semi-precious stone and is increasingly well known.

Ya a otra escala, las explotaciones de Larimar de Los Checheses pertenecen al dominio geológico Hotte-Salle-Bahoruco (Lewis y Draper, 1990).

Las unidades tectonoestratigráficas discurren atravesando la isla con dirección ONO-ESE, marcando zonas de desgarre y con una disposición yuxtapuesta de unas con otras. En el esquema estructural (Fig. 4), la unidad en donde se aloja la Sierra de Bahoruco, la más meridional, se encuentra denominada en la figura como ZFEPG (Enriquillo-Plantain Garden).

Regionalmente, la formación más antigua es la formación Dumisseau (Maurrasse *et al.*, 1979), en el macizo haitiano de La Selle, con más de 500 m de espesor y consiste en una alternancia de basaltos y pillow lavas, doleritas, calizas pelágicas, cherts, limolitas silíceas y areniscas volcánicas que han sido datadas paleontológica y radiogénicamente dentro de un intervalo desde el Cretácico Inferior al Cretácico



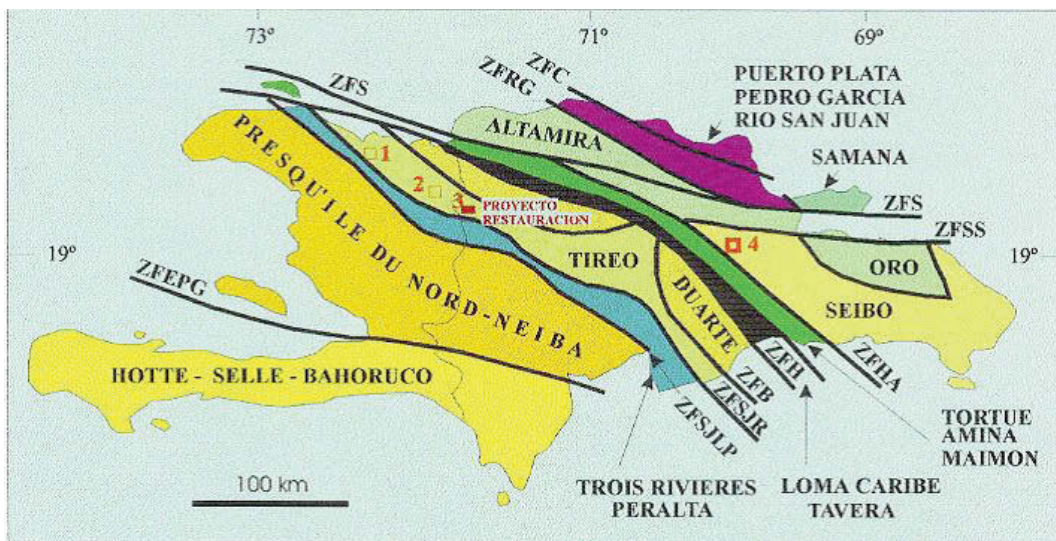
**Figura 3.** Mapa Geológico de la Isla La Española (Servicio Geológico de la R. Dominicana).  
**Figure 3.** Geological Map of Hispaniola island (Geological Survey of Dominican Republic).

Superior. Según Marc Joubert, en la Sierra de Bahoruco existen formaciones basálticas equivalentes a la formación Dumisseau del Maastrichtiense. Las analogías petrológicas y geoquímicas entre los basaltos de la formación Dumisseau y los basaltos perforados en el DSDP en el seno del Mar Caribe, apoyan la interpretación de que el conjunto orográfico y geológico de Hotte-Selle-Bahoruco (Mann *et al.*, 1991) constituye un fragmento emergido de la meseta o plateau oceánico del Caribe (Maurase *et al.*, 1979; Sen *et al.*, 1988; Girard *et al.* 1982). Por encima de esta formación, una discordancia señala el final del volcanismo basáltico y el comienzo de un régimen esencialmente sedimentario, con predominio de facies carbonatadas y ocasionales ocurrencias volcánicas, que corresponden al intervalo que va desde el Cretácico terminal al Mioceno.

### Estratigrafía reconocida en el entorno de la Sierra de Bahoruco

En el área ocupada por las explotaciones de Larimar y en su entorno, afloran materiales cretácicos de origen volcánico y cenozoico sedimentario que, a su vez, se pueden agruparse en dos grandes conjuntos:

- Materiales paleógenos y miocenos, que configuran la morfoestructura de la Sierra de Bahoruco. Se



**Figura 4.** Localización de las principales zonas de falla en la República Dominicana. ZFRG: Zona de Falla de Río Grande; ZFS: Zona de Falla Septentrional; ZFLE: Zona de Falla de La Española; ZFBG: Zona de Falla de Bonao-La Guácara; ZFSJR: Zona de Falla de San José Restauración; ZFEFG: Zona de Falla de Enriquillo-Platain Garden. Servicio Geológico de la República Dominicana.  
**Figure 4.** Situation of major fault zones in the Dominican Republic. ZFRG: Fault Zone of Río Grande; ZFS North Fault Zone; ZFLE: La Española Fault Zone; ZFBG: Bonao- Guácara Fault Zone-; ZFSJR: Restoration-San José Fault Zone; ZFEFG: Zone Enriquillo-Platain Garden Fault Zone. Geological Survey of Dominican Republic.

trata de una sucesión muy potente de materiales carbonatados de ambientes marinos de poco a medio profundos.

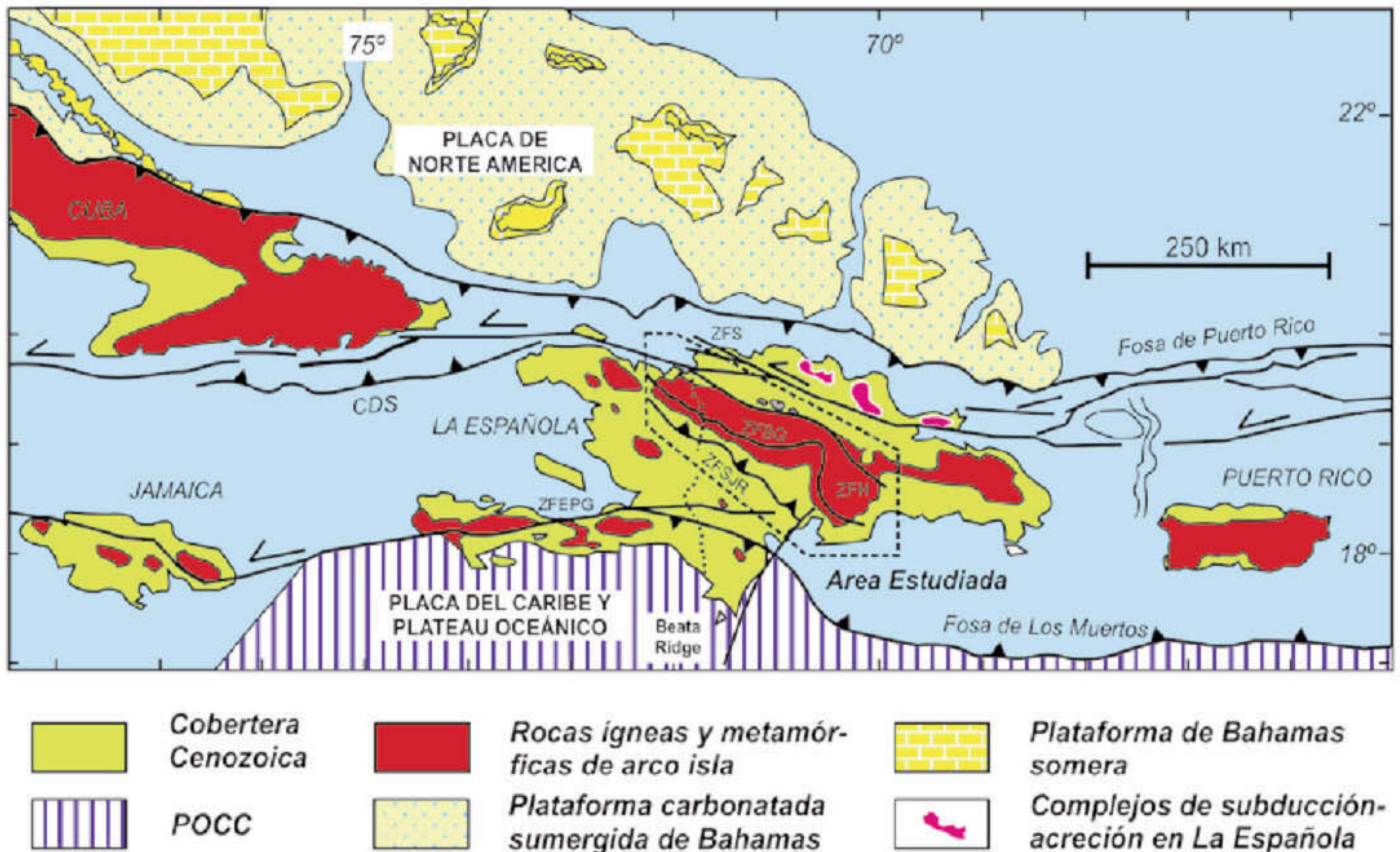
- Materiales cuaternarios, sobreimpuestos a los conjuntos anteriores de forma irregular, de carácter fluvial o litoral.

Siguiendo la denominación del equipo que ha realizado la cartografía geológica de la región en el proyecto SYSMIN, Marc Joubert y otros, los materiales más antiguos corresponden a los episodios volcánicos de carácter básico que forman el substrato de la serie sedimentaria posterior y que se han datado por analogía en el Cretácico Superior (Formación Dumisseau) y afloran en diversos lugares de la Isla, siempre relacionados con la formación del arco-isla y el plateau oceánico del Caribe. En la Sierra de Bahoruco, siempre según Marc Joubert, este volcanismo aflora en las Hojas de La Ciénaga, Enriquillo, Polo y La Salina, constituyendo el sustrato de los epi-

sodios carbonatados de edad cenozoica. Además, según Girard *et al* (1982), estos basaltos son de origen no-orogénico, de tipo toleítico oceánico.

**La formación Dumisseau en la Sierra de Bahoruco**

Marc Jubert propone “una sucesión irregular de montes submarinos separados definiendo alineaciones (seamounts) como consecuencia de la intermitencia en la intensidad de la actividad eruptiva”. Para explicar las señales de emisión (paleosuelos y restos de colonización vegetal) de algunos afloramientos de lavas y materiales piroclásticos tales como el afloramiento volcánico de Los Checheses, en algunas zonas, propone que la emisión de lavas fue tan importante que varias acumulaciones de materiales volcánicos emergieron y alcanzaron el nivel del mar formando islas. Según Sen *et al.*, (1988) estos basal-



**Figura 5.** (Lewis y Draper, 1990; Mann *et al.*, 1991). La Española ha sido dividida en varios terrenos tectonoestratigráficos en base a su diferente historia geológica, yuxtapuestos tectónicamente por zonas de desgarre de dirección ONO-ESE y edad post-Eoceno/Oligoceno (Mann *et al.*, 1991).

**Figure 5.** (Lewis and Draper, 1990, Mann *et al.*, 1991). Hispaniola has been divided into several tectono-stratigraphic terranes based on their different geological history, tectonically juxtaposed by fault zones WNW-ESE and post-Eocen/Oligocen age (Mann *et al.*, 1991).

tos del macizo de La Selle se formaron en una dorsal medio-oceánica o en un punto caliente.

## La Geología Estructural

La isla Española, conjuntamente con Puerto Rico se ha interpretado como una especie de microplaca, que queda limitada por el norte por el efecto de subducción con un desplazamiento oblicuo a su frente y por el sur, por otra subducción a la que se asocia la Fosa de los Muertos (Byrne *et al.*, 1985; Masson y Scanlon, 1991). Además, el límite norte de la Placa del Caribe ha ido evolucionando desde formar un margen definido por la subducción en el Cretácico y parte del Eoceno, a constituir en la actualidad, tras su colisión con la plataforma de las Bahamas (resulta una verdadera colisión Arco-Continente), un límite definido por desplazamientos de carácter sinistral, que vienen a ajustar el recorrido hacia el este de la Placa del Caribe en relación con Norteamérica (Fig. 5)

La zona sur de la isla de la Española y Puerto Rico se ha transformado desde un "tras-arco" al comienzo del Eoceno, a formar en la actualidad un margen activo con subducción de la corteza oceánica del Caribe bajo el arco de islas Circum-Caribeño (Burke *et al.*, 1978; Burke, 1988; Dolan *et al.*, 1991). La colisión oblicua con la plataforma de Las Bahamas ocurrió en el intervalo Eoceno a Medio-Superior. La tectónica de desgarre dio comienzo en este margen norte de la placa a partir del Eoceno, con la apertura del Surco del Caimán (Mann *et al.*, 1991) y todavía se mantiene.

El mismo autor, al referirse a la Sierra de Bahoruco en su zona norte, afirma que su estructura es el resultado de lo siguiente: a) una disposición monoclinial hacia el N/NE o suavemente plegada de las series calcáreas de Neiba superior y Barahona; b) el desarrollo de un frente de mayor deformación, bastante neto, al pie de la Sierra, que se asocia al cabalgamiento de estas formaciones calcáreas sobre la cuenca de Enriquillo; y c) la presencia de fallas rectilíneas de dirección NO-SE con movimiento vertical inverso y en dirección que, en parte, modifican este frente y producen la compartimentación de todo el flanco en bloques progresivamente más elevados hacia en interior de la Sierra.

En el entorno próximo de la mina de Los Checheses, la estructura actual se encuentra fuertemente dominada por las laminaciones en "apilamientos en flor tectónica", ligadas al desgarre sinistral de la falla del río Cito. Además, en un entorno mucho más amplio, esta disposición parece repetirse en una dimensión fractal mucho más amplia.

La deformación principal en la zona de estudio

ocurre a partir del Plioceno Inferior-Medio con el levantamiento continuado de las sierras de Neiba, Bahoruco y Martín García y su cabalgamiento sobre la cuenca de Enriquillo. La deformación y el levantamiento han continuado durante todo el Holoceno hasta la actualidad.

## La geología del yacimiento

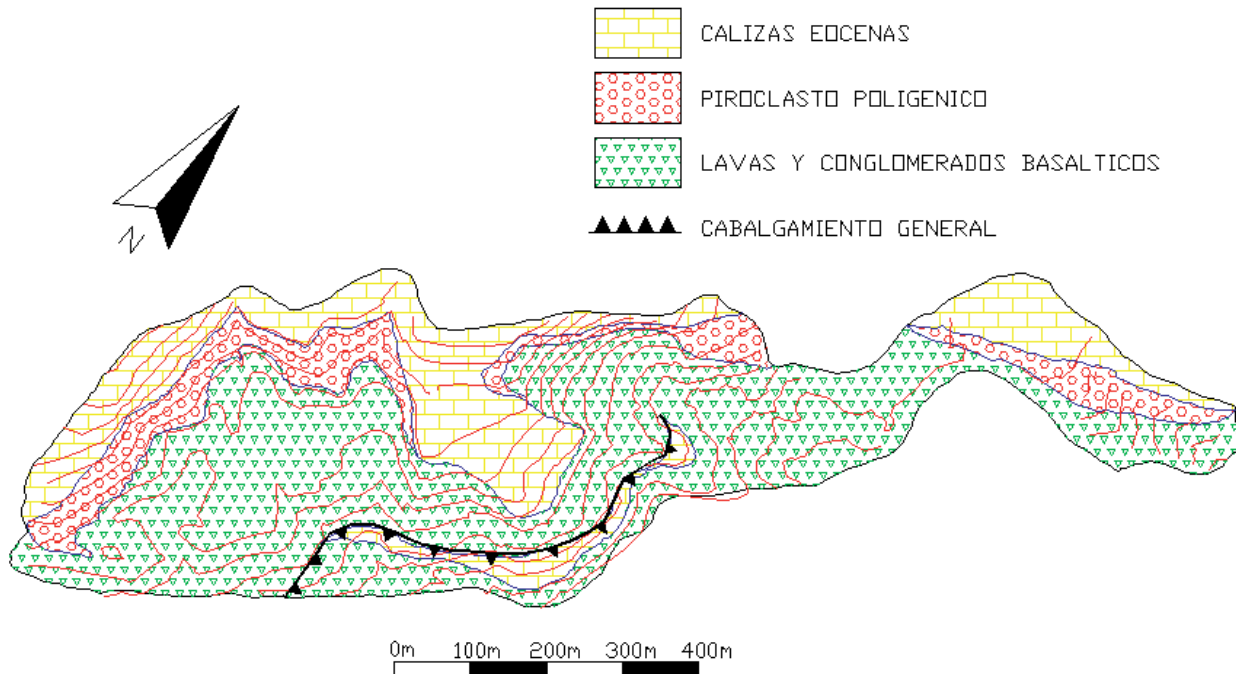
### Disposición general

Fisiográficamente, el yacimiento de Larimar de Los Checheses se encuentra situado en el interior de la Sierra de Bahoruco, en su parte nororiental, no lejos de la costa. Además, se encuentra incluido en la unidad tectono-estratigráfica de Hôte-Selle-Bahoruco. A su vez, esta serie geológica comprende los siguientes episodios (Fig. 6):

- Un sustrato volcánico, de composición basáltica en donde arman las mineralizaciones de Larimar. Se encuentra aflorante en no más de un kilómetro y desgajado en unidades estructurales que se describirán a continuación. Además, hacia el noroeste, siguiendo la falla del río Cito aparecen otros asomos volcánicos de tipo básico de escasa magnitud que nunca han producido mineral pectolítico alguno. Se asimila a la Formación Dumisseau en la Hoja de La Ciénaga. En cuanto su edad, para Marc Joubert los basaltos de la Formación Dumisseau son del Cretácico Final, generalmente coincidente con otros autores con cierta imprecisión, como Segundo Maurrasse *et al.*, (1979), Cretácico Inferior a Cretácico Superior, y para Mann *et al.*, (1991) los basaltos se sitúan en el Cretácico terminal a Mioceno. Además, sobre su origen, también existe una controversia, ya que en la hoja geológica de la ciénaga Marc Joubert da como posible basaltos pertenecientes a arcos isla o de plateau, coincidentes con otros autores como para Maurrasse *et al.*, (1979) y Mann *et al.*, (1991) mientras que para Girard *et al.*, (1982) son de tipo no orogénico, toleíticos oceánicos, y para Sem *et al.*, (1988), en la Selle, derivan de un punto caliente de una dorsal oceánica.

Existen dos términos muy diferenciados:

- La parte inferior, constituida por basaltos masivos vacuolares (sobre todo en zona más profunda), brechas volcánicas, materiales de sedimentación de ladera con diversas granulometrías y pillow-lavas en su parte inferior aflorante. No obstante, existen abundantes señales de emersión: diferenciaciones columnares y, sobre todo, paleosuelos y paleocauces formados por materiales arcillosos de color rojizo y clastos superficiales con arcilla en los



**Figura 6.** Geología del área del yacimiento. En este entorno, caracterizado por un apilamiento de escamas tectónicas, las series volcánicas pueden contener pectolita coloreada en distintas variedades, no siempre comercializables.

**Figure 6.** Geology of deposit area. In this environment, characterized by a stack of tectonic flakes, volcanic series may contain coloured pectolite in different varieties, not always marketable.

suelos y en los cauces, arcillas y arenas. Hay en todos ellos señales de materia vegetal carbonizada primero y sustituida por pectolita después.

Además se han localizado diques de microbasaltos sin alterar que atraviesan los materiales ya descritos. Sin embargo, toda la serie volcánica se encuentra intensamente alterada hidrotermalmente con serpentinizaciones, cloritizaciones, silicificaciones y movilizaciones de hierro.

- Un piroclasto poligénico relativamente potente (15-30m) que discordantemente se apoya en las rocas basálticas verdes. Existe una ligera diferenciación granulométrica en los clastos cementados por una fina matriz tobácea. Con este episodio se acaba la deposición volcánica.
- Un episodio sedimentario calcáreo denominado formación Polo del Eoceno Medio, siguiendo la denominación aceptada en la Hoja de La Ciénaga. Esta formación del Eoceno Medio se compone de calizas masivas con rodolitos y foraminíferos, presentándose como una potente barra de calizas masivas de color beige a blanco y pátina gris con una potencia de poco menos de 500 m.

### Las volcanitas

En los Cheseses, en la Mina Larimar, la serie volcanosedimentaria surge merced a las consecuencias del desgarre provocado por la falla del río Cito, en una zona de convergencia de escamas de "flor tectónica" (de dimensiones limitadas, dentro de un área afectada mucho mayor). El afloramiento, estirado, posee casi un kilómetro de desarrollo longitudinal. Los términos volcánicos que se han observado a partir de los sondeos, del avance de la galería de 420m, de los frentes de la pequeña minería subterránea y de los escasos afloramientos en la zona de explotación, rara vez producen una diferenciación neta y, más aún, una secuencia clara de formación. Ello se debe a la acomodación interna de lentejones secundarios en la masa lávica de basaltos y, en otra escala, a la superposición de escamas tectónicas.

No obstante se pueden diferenciar los siguientes términos, de más modernos a más antiguos:

- Una serie piroclástica poligénica que recubre a los términos fundamentalmente lávicos. Existe una leve clasificación en la granulometría de los clastos sobre la matriz fina que los empasta y que, a grandes rasgos, son más gruesos en la zona inferior, cercana



a los episodios lávicos. La serie presenta en su máxima potencia unos 30 metros de espesor sin sufrir variaciones de importancia y no se encuentra alterada hidrotermalmente, aunque en sus clastos angulosos aparecen diferentes materiales lávicos, incluso contiene en ellos material pectolítico. Aparentemente, en episodio señala el punto final de la actividad volcánica.

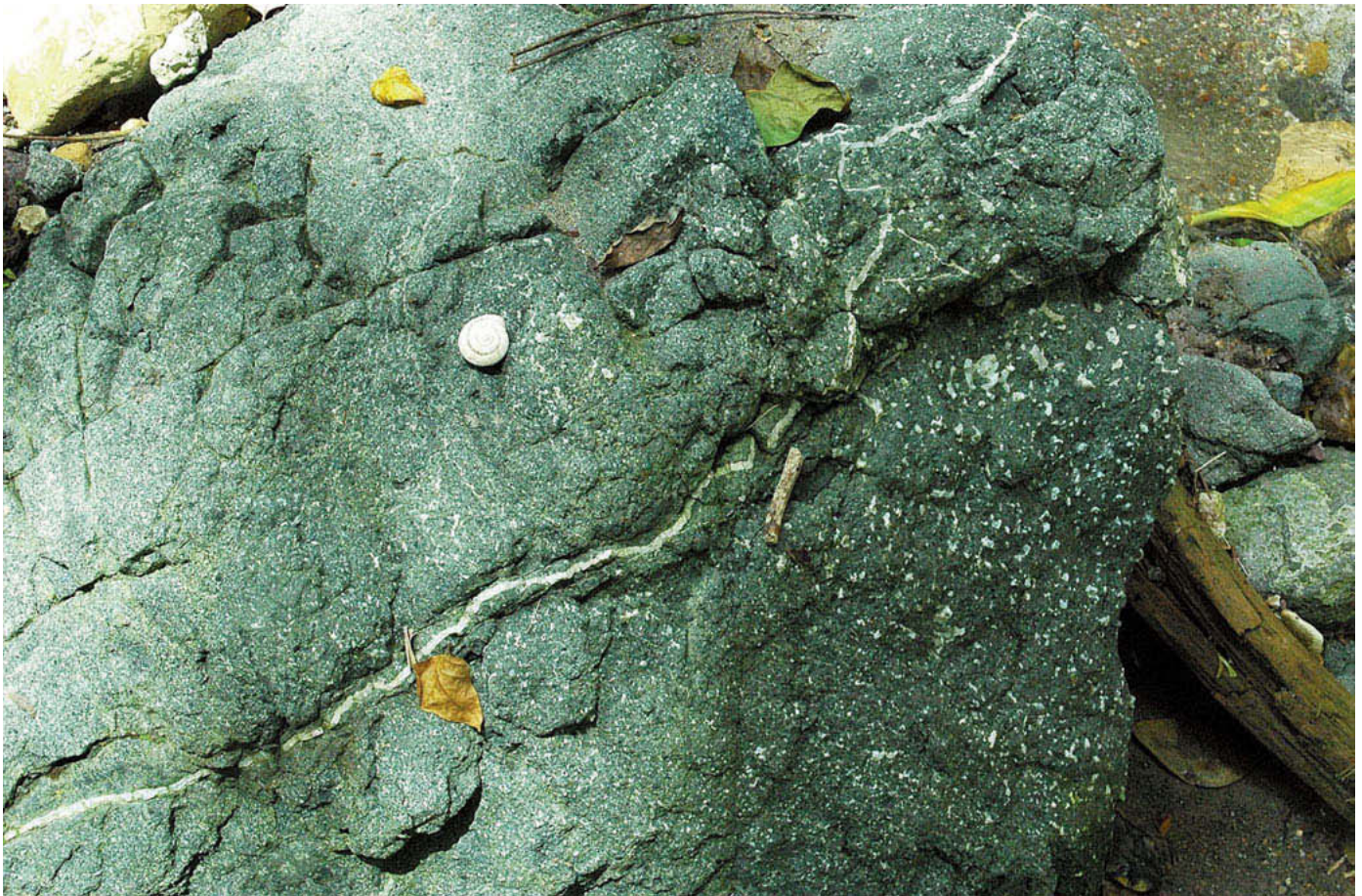
- Diversos episodios de lavas basálticas, rara vez intactas, masivas, brechoides y casi siempre alteradas hidrotermalmente. Presentan notables concentraciones de vacuolas rellenas de zeolitas, calcita y sílice, más abundantes hacia los términos más inferiores, en donde se comunican y llegan a formar filoncillos de estos minerales. En parte son atravesados por filones y venas que ascienden aprovechando las discontinuidades en su masa. También en la parte más inferior de los afloramientos se ha detectado figuras almohadilladas (Fig. 7). Su potencia real no ha

sido posible determinarla, ya que ningún sondeo los ha atravesado en su integridad. Además, el grado de fracturación y acomodación estructural impide una determinación veraz de su geometría original.

- Fases más tobáceas, intercaladas en los anteriores episodios, a veces confundidos con los fenómenos de deposición de ladera. La abundancia de aguas intersticiales y las alteraciones hidrotermales ya mencionadas provocan una transformación arcillosa muy generalizada.

- En la galería del proyecto SYSMIN, apareció un dique de microbasalto, muy homogéneo y sin presentar alteración alguna. Este dique de al menos cinco metros de potencia, atravesaba la serie basáltica sin provocar alteración alguna en su contacto con el resto de los basaltos. También, en la Mina Vieja, en los primeros trabajos realizados en la búsqueda del Larimar, aparecen restos de estos diques.

- Materiales volcánicos de flujo de ladera. Se han



**Figura 7.** Lavas almohadilladas en la parte inferior de los basaltos de la escama la escama central. Mina Nueva.  
**Figure 7.** Pillow lavas at the base of basalts corresponding to the central structural sheet. Mina Nueva.

reconocido diversos tipos de fenómenos de deposición ligados al flujo de ladera: "avalanche flow", "debris flow", "lahar". J. A. Espi (1997 y 2008), ha dedicado gran atención a definir y reconocer cada uno de los términos anteriores, llegando a la conclusión de que la sedimentación de ladera se sitúa entre los fenómenos de avalancha y otros de menor granulometría y mayor extensión, siempre con abundancia de líquido entre los espacios intergranulares. Además, se reconocen morfologías de tipo inter-eruptivo. El fluido que embecía el sedimento, probablemente estaba caliente y contribuía a la desestabilización de la ladera. También se piensa que el nivel general del perfil de ladera correspondería a una situación entre media y baja pendiente y marcaría la zona de confrontación entre la desestabilización del suelo y una intensa colonización vegetal.

- Paleosuelos, cauces y costras superficiales. Estos fenómenos son repetitivos a la escala del afloramiento y, en líneas generales, presentan en los suelos antiguos una estructura muy parecida: arcilla, materiales arcillosos, fragmentos de la roca de base y saprolitos alterados (Fig. 8). La presencia de señales de materia orgánica (tallos vegetales coquizados, frutos y materia orgánica diversa de índole) se encuentra totalmente generalizada en estos niveles, indicando el grado de colonización vegetal que existía en ese periodo. Por ello se ha propuesto el desarrollo en la Mina de Larimar de una zona de equilibrio entre la colonización vegetal exuberante y la altura de su destrucción por deslizamientos de ladera.



**Figura 8.** Paleocauce relleno de arcillas y arenas dentro de la serie volcánica.

**Figure 8.** Paleo-channel filled with clays and sands within the volcanic series.

### **El carácter de las series volcánicas**

La petrografía, la geoquímica, la caracterización de la materia orgánica y el análisis RX de sus fracciones arcillosas han sido las técnicas de apoyo a las observaciones de campo, a fin de definir el carácter general de las series, de su evolución (fundamentalmente alteraciones) y disposición final.

Tanto las series volcánicas que forman la parte más inferior del conjunto, como los últimos episodios piroclásticos, que cierran el ciclo, poseen el mismo carácter.

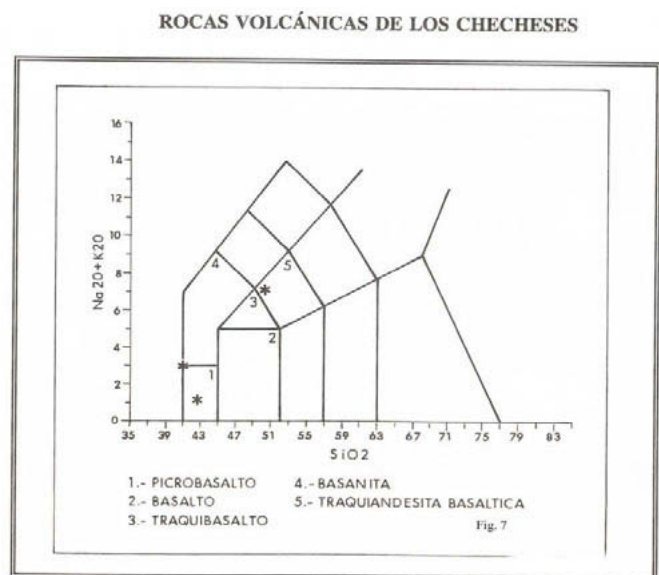
### **Las volcanitas de carácter basáltico**

La petrografía encuentra en todo el conjunto su carácter máfico intensamente alterado hidrotermalmente. La muestra estudiada con menor grado de alteración, en uno de sus clastos, se clasifica como una diabasa, con textura ofítica, pero de manera generalizada conserva fenómenos de alteración hidrotermal, incluso se identifica calcita y pectolita.

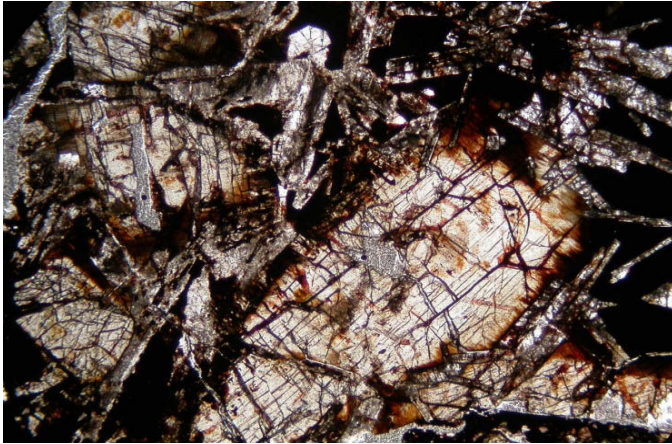
La clasificación obtenida se sitúa entre una roca picrobasáltica y un término andesítico básico (Fig. 9 y 10). Es decir, son basaltos algo alcalinos derivados del manto superior.

### **La estructura**

Tomando como primera referencia los estudios estructurales realizados en los últimos años, sobre



**Figura 9.** Clasificación modal de las volcanitas de Los Checheses.  
**Figure 9.** Modal classification of the Los Checheses volcanic rocks.



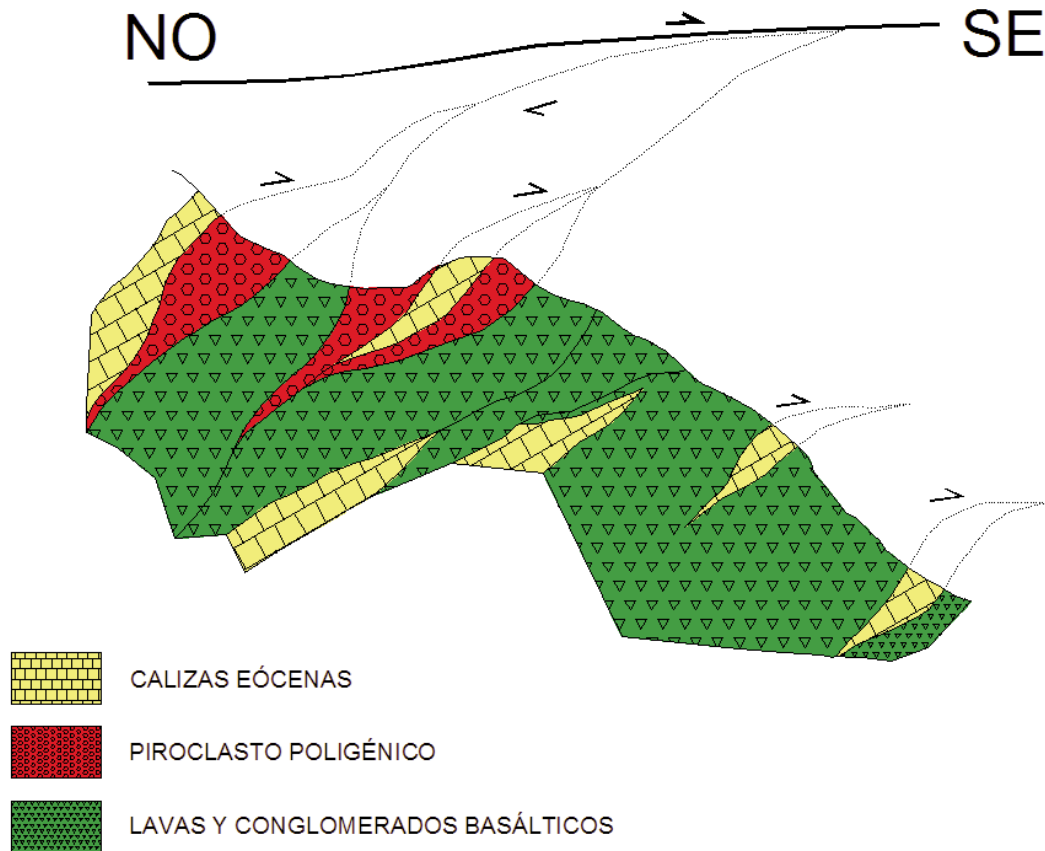
**Figura 10.** Una de las pocas muestras relativamente no afectada por la alteración hidrotermal la encontramos en los clastos del piroclasto de las cercanías a Bonyó. Piroxenos y Plagioclasas. Lámina delgada Obj. x2,5.

**Figure 10.** One of the few examples relatively unaffected by hydrothermal alteration found in one the of pyroclastic clasts near Bonyo. Pyroxene and Plagioclase. Thin slide Obj x2,5.

todo a raíz de la cartografía geológica 1/50.000 del proyecto SYSMIN de la Unión Europea, la estructura de la Sierra de Bahoruco consiste en grandes anticlinales que conviven con estructuras de menor porte, formando anticlinales y sinclinales de amplitud, entre los 5 y 10 km. Derivadas de estos grandes accidentes, aparecen fallas de menor rango, a veces normales, con direcciones predominantes nortenoeste (P. Mann, PP. Mc Laughlin y Cooper, 1991), y en otras ocasiones son rumbo-deslizantes.

En nuestra opinión, la estructura general de la Sierra corresponde a un apilamiento de escamas tectónicas, originado y limitado por desgarres de una extraordinaria magnitud, de ahí la forma aparentemente cónica de los pliegues que, en realidad, se apartan de un sistema dúctil deformado en curvaturas variables (Fig. 11, 12 y 13). Con ello, además, se explican los escalonamientos según fracturas que intersectan los pliegamientos.

Naturalmente, en este caso, los pétalos de “la flor



**Figura 11.** Perfil integrado NO-SE recogiendo la mayoría de las escamas tectónicas detectadas parcialmente en el yacimiento. La discontinuidad superior se presume a partir de los datos de la galería de la Unión Europea.

**Figure 11.** N-S integrated geological section including most of the tectonic sheets affecting the ore deposit. The top discontinuity is presumed from the UE gallery data.



**Figura 12.** La falla del río Cito, aunque de carácter de cizalla sinistral, forma parte de un apilamiento general de escamas tectónicas de gran magnitud.  
**Figure 12.** Cito fault, although of a sinistral nature, forms part of a thrust-slice stacking associated to the Cito River.

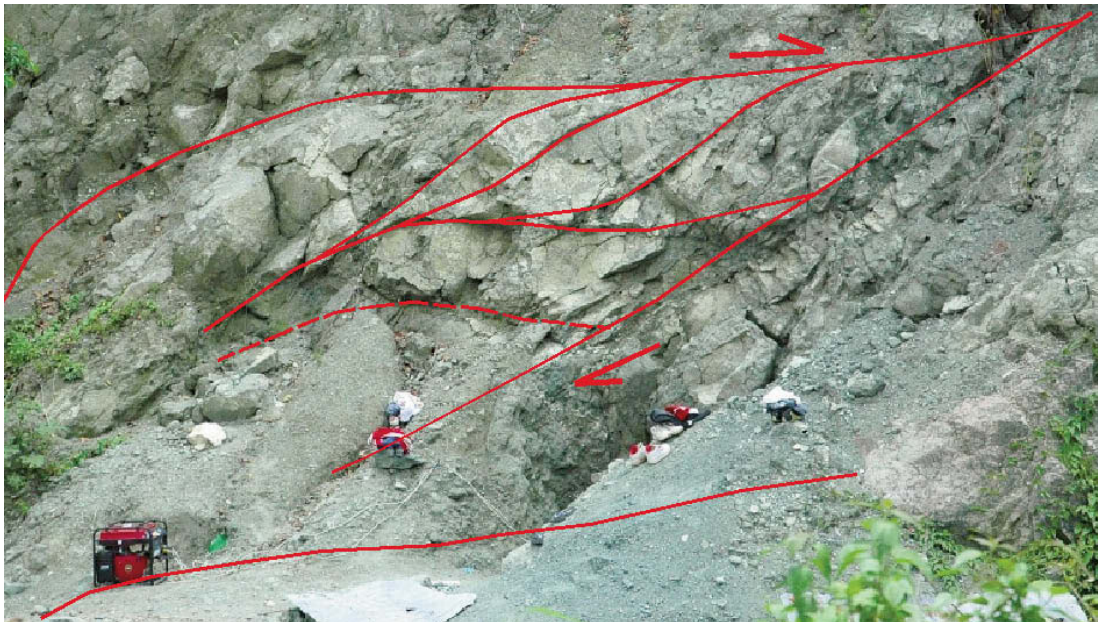


**Figura 13.** Escama superior con los tres elementos: caliza brechificada (amarillo), piroclasto potente (violáceo) y episodio volcánico básico (azulado en la fotografía).  
**Figure 13.** Upper tectonic sheet with three elements: brecciated limestone (yellow), thick pyroclastic rocks (violet) and basic volcanic episode (blue in the picture).

tectónica” poseen un gran desarrollo respecto a su potencia y se imbrican a partir de direcciones de fallas de considerable desarrollo, como es el caso de el río Cito y sus escamas asociadas.

En principio, el área ocupada por las explotaciones

mineras de Larimar se estructura en cinco escamas bien diferenciadas, además de presentar acoplamientos internos dentro de ellas y zonas de transición. Dentro de cada una, al menos se reconocen dos de los tres términos estratigráficos presentes en todo el



**Figura 14.** Afloramiento de materiales volcánicos en la zona minera mostrando deformaciones dúctiles-frágiles en disposición en dúplex.  
**Figure 14.** Volcanic rocks showing duplex deformations.

área circundante a las explotaciones principales: volcanitas de tipo básico comprendiendo tanto a efusiones basálticas como deposiciones de ladera de diversos tipos, con o sin flujo. Encima de esta fase heterogénea se superpone una deposición piroclástica de casi 30 metros en su zona más potente. Encima de ella aparecen las series sedimentarias de calizas enormemente tectonizadas. En alguna zona no aparecen los piroclastos del techo de los basaltos.

La morfología general de estas escamas debe ajustarse con bastante probabilidad a la observada en el afloramiento de la Figura 14, en donde se aprecian roturas sigmoidales (dúplex en muchos casos) que en su conjunto conforman otras unidades de superior orden de magnitud.

Además, presentando disconformidades muy evidentes, en las labores subterráneas de las estrechas galerías de la minería artesanal, son frecuentes los bloques sueltos y estirados con separación de los niveles de arcillas rojas en unidades que envuelven a enormes fragmentos "boudinados" de materiales volcánicos. También en ellas resulta evidente la sistemática sucesión de pendientes muy suaves ("llanos") con los súbitos descensos ("rampas" de pendientes de 55°-75°) en las galerías que siguen los niveles de arcillas rojas de los paleosuelos. Es decir, son zonas de despegue.

En la tercera escama tectónica del yacimiento, en sus términos calizos que la hace reconocible, se aprecian los pequeños lóbulos que indican la disposición de la escama, siempre con dirección NNO-SSE a NO-SE. Además, en algunos "boudines" calizos aparecen



**Figura 16.** Paso a las calizas de la formación Polo desde la serie volcánica productiva en el sondeo SL 1.

**Figure 16.** Limestone Polo formation under productive volcanic series in the SL 1 drill hole.

más de una dirección de estiramiento y diversas esquistosidades de fractura, señalando la complejidad del movimiento. Fig. 15.

Las escamas reconocidas por sus términos carbonatados, se superponen estirando el conjunto en dirección NE-SO y acuñándose en los extremos (oeste y este). El asomo de materias volcánicas se emplaza en una convergencia de ramas finales de escamas de orden superior. Esto viene a comprobarse en los sondeos SL-1 y SL-2 que, a pesar de estar en los extremos de los afloramientos de volcanitas,



**Figura 15.** "Boudines" en el interior de la parte caliza de una escama constituyente de la mina de Larimar. Obsérvese el grado de rotura y la intersección de varias esquistosidades de fractura.

**Figure 15.** "Boudines" inside the limestone part of a tectonic sheet constituent of the Larimar mine. Note the breakage degree and the intersection of several fracture sets.



**Figura 17.** Tránsito desde la serie volcánica a las calizas de la Formación Polo al sur del yacimiento de Larimar. Sondeo SL3.

**Figure 17.** Change from the volcanic series to the limestone pole formation in the south of the Larimarr mine. SL3 drill hole.

separados casi un kilómetro, atraviesan los basaltos y penetran en los sedimentos calizos de la Formación Polo (Fig. 16 y Fig. 17).

Los escasos afloramientos y los datos suministrados por la galería y los sondeos han mejorado notablemente la imagen geométrica de los cuerpos de la serie basáltica. Para ello se han utilizado los afloramientos de materiales calizos, marcando de esta forma las escamas imbricadas, desde las explotaciones, hasta la última escama cercana al fondo del barranco del río Cito. (Fig. 18)



**Figura 18.** Resaltes de calizas de hasta 20 metros, producto de la presencia de las terminaciones de escamas tectónicas en el lecho del río Cito.

**Figure 18.** Limestone ridges up to 20 meters, due to the presence of tectonic sheet terminations in the Cito riverbed.

En la gran galería aparecen estiramientos, imbricaciones, desdoblamientos, y fragmentos aislados del paleosuelo (Fig. 19), marcando, sobre todo a partir de los 250 metros de su entrada, una serie de desdoblamientos en escamas interiores.

La Fig. 20 representa en proyección estereográfica las medidas de posición de los lechos de arcillas rojas que aparecen en el interior del episodio volcánico básico (en este caso la superficie del edificio volcánico) tomadas en diversos lugares del área de explotación. Si se asume una configuración de escamas superpuestas con una geometría semejante, la beta del círculo máximo representaría aproximadamente la dirección predominante de las escamas. En este caso sería ONO-ESE, buzando  $38^\circ$  al SE, mientras que en la traza de la nueva galería se mantiene groseramente en la misma dirección SSE buzando  $40^\circ$  en sentido contrario a las medidas exteriores, es decir, al NO.



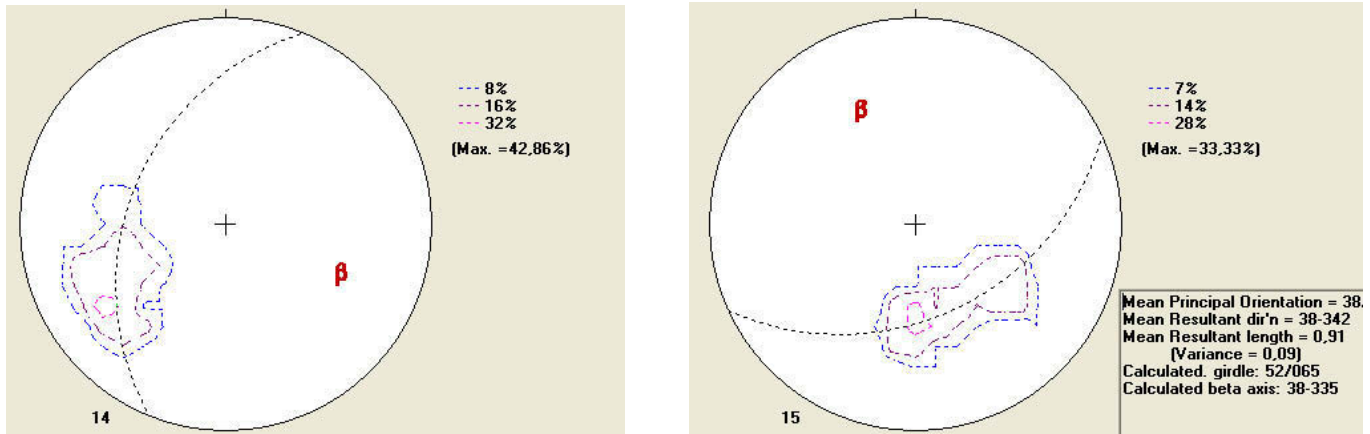
**Figura 19.** "Duplex" de arcilla roja y roca volcánica en el frente de la nueva galería (SYSMIN).

**Figure 19.** "Duplex" red clay and volcanic rock in the new gallery front (SYSMIN).

Hay que añadir que, en su aspecto práctico, la perforación de la galería SYSMIN, a los 300m comienza a atravesar una serie de terminaciones de láminas imbricadas, repitiéndose los niveles rojos o paleosuelos sobre más de 50 metros, horizontalizándose o incluso cabeceando en sentido contrario al buzamiento general de los lóbulos o escamas tectónicas, produciendo por lo tanto una gran cantidad de Larimar ligado a ellas.

Respecto al origen espacial de las series imbricadas, en un desplazamiento sinistral ligado a la falla del río Cito, la manifestación aflorante de las volcánitas debería ser escalonada pero continua río arriba. De hecho así ocurre con el afloramiento de la zona minada, comenzando con los basaltos de la mina antigua, que el sondeo SL1 los corta sobre las calizas de la escama inferior.

La posición del bloque general de volcánitas aflorante en posición cercana a la falla principal y en una zona de convergencia de terminaciones de las escamas tectónicas, resulta coherente a nivel regional con la explicación de apilamientos generalizados, ya que río abajo no existen manifestaciones volcánicas. Además, para justificar su escasa continuidad y dentro del esquema del origen de la Formación Dumisseau, se debe recurrir a la hipótesis de una zona del plateau francamente emergente y de escaso desarrollo lateral.



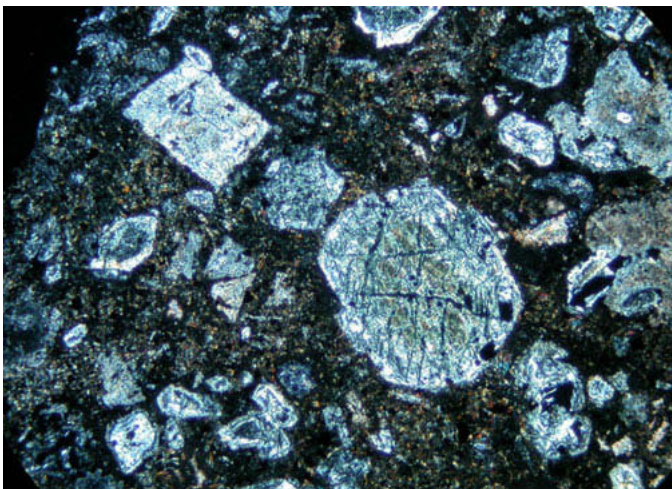
**Figura 20.** Diagramas de densidad de polos de planos de arcillas rojas tomados en labores exteriores a la nueva galería (izquierda) y en el mismo túnel (derecha).  
**Figure 20.** Stereographic pole density diagrams of mine red clay planes, measured outside the new gallery (left) and in the tunnel (right).

### Estudio de las alteraciones y la geoquímica de las series volcánicas

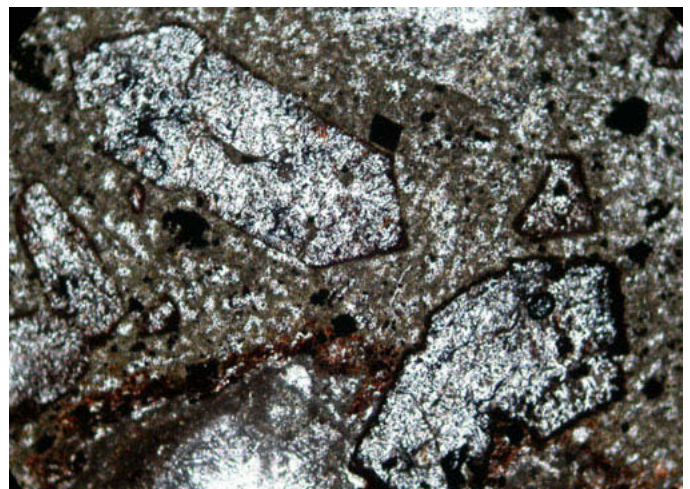
Ya se ha avanzado que toda la serie volcánica, o al menos la que se manifiesta en el área minada, generalmente, se encuentra hidrotermalmente muy alterada. Se salvan de estas transformaciones, al menos parcialmente, la serie piroclástica final, aunque se ha comprobado en sus clastos abundantes señales de las alteraciones de la serie basáltica inferior.

Atendiendo a las experiencias obtenidas en el estudio petrográfico, esta alteración se traduce en la aparición de minerales hidratados dominados por la serpentina, clorita, talco y limonita. Además, en menor proporción, existen anfíboles y pectolita. Aún en menor cantidad, se distinguen calcita, thomsonita o natrolita y cuarzo. Todos ellos han sustituido a las asociaciones primitivas de plagioclasas, olivino y piroxeno (estudio de R. Castroviejo). Fig. 21 y 22.

Según los resultados de la analítica de Rayos X, la



**Figura 21.** Fenocristales de olivino y piroxeno en el antiguo afloramiento de rocas básicas alteradas de Bonyó. Los Checheses. Lámina delgada x 2,5 Nic. cruz.  
**Figure 21.** Olivine and pyroxene phenocrystals belonging to altered basic rocks in the Bonyo ancient mine. The Checheses. Thin slide x 2.5 Nic. cross.



**Figura 22.** Fenocristales de olivino en una matriz vítrea totalmente alterada. Pertenece a los fragmentos de base del paleosuelo. Mina Vieja. Lámina delgada x 10.  
**Figure 22.** Completely altered olivine phenocrystals in a glassy matrix. Fragments belonging to paleo-soil base. Mina Vieja. Thin slide x 10.

modificación más sustancial que opera en la roca volcánica es la *cloritización* de los minerales máficos (olivino y piroxenos) formando interestratificados con vermiculita. Esta alteración se extiende a los sedimentos formados a partir de las rocas volcánicas y, como ellas, presentan los mismos productos minerales interestratificados. No obstante, aparecen también arcillas esmectíticas ligadas a tallos vegetales carbonizados y, quizás también en el nivel inferior, en los "horizontes rojos" (sedimentos superficiales).

La repetición de la presencia de interestratificados de clorita-vermiculita en todas las series analizadas, se puede interpretar como una alteración hidrotermal sobre series volcánicas basálticas y a niveles no muy profundos. Según K. Fujishima y P. Fan, 1977, en las lavas básicas de Hawai, existe una zonalidad vertical, apareciendo los interestratificados clorita-vermiculita como alteraciones hidrotermales a profundidades no superiores a 50 metros. También, G.J. Ross y H. Kodama, 1976, se presenta la producción de este tipo de interestratificados como producto del experimento del ataque sobre metabasaltos de aguas saturadas en bromo a temperatura superior a la vaporización. La esmectita bien podría ser un indicador de la alteración supergénica, sobre todo, en los paleosuelos, aunque no se encuentra del todo generalizada en los niveles interpretados como de alteración superficial, quizás debido a la transformación hidrotermal posterior.

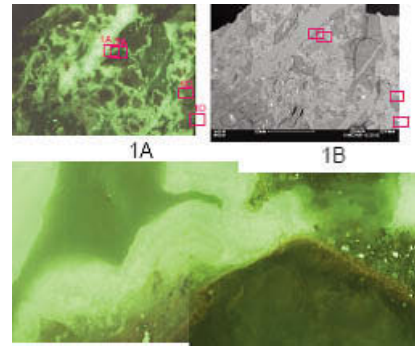
### Aportaciones de los estudios del INCAR

El Instituto Nacional del Carbón, perteneciente al CSIC, ha estudiado muestras seleccionadas que contienen restos de materia orgánica de los materiales en ladera de las series deposicionales volcánicas del yacimiento de Los Checheses. La Doctora María Ángeles Borrego y el Doctor Diego Álvarez investigaron aspectos relacionados con la composición de los restos vegetales que aparecen en las zonas explotadas y, al mismo tiempo, también definieron la composición de los materiales geológicos en donde aparecen. Por ello, su aportación resulta muy valiosa, ya que tanto las imágenes como los ensayos de caracterización de las especies minerales, que aparecen relacionadas con la materia orgánica, son de gran calidad.

Las conclusiones más importantes para el estudio de la génesis del yacimiento son las siguientes:

El calentamiento de la materia orgánica, carbonosa, debió ser muy rápido. Las condiciones no debieron ser muy oxidantes o el tiempo ser muy largo.

Los volátiles condensados depositados en zonas



**Figura 23.** Muestra La-A2. Imágenes de microscopio óptico-SEM.  
**Figure 23.** La-A2 sample. Images-SEM microscope.

de grietas o interfases, probablemente se formaron por un procedimiento similar al carbono pirolítico que se depositan en huecos y cavidades durante el proceso de coquización del carbón (Fig. 23). La temperatura asimilable al proceso se sitúa alrededor de los 300 °C.

Este material está depositado en la interfase entre la pectolita masiva que rellena grietas y las zonas que mantienen la estructura vegetal que tienen un relleno predominante de calcita, aunque puede estar impurificada con pectolita.

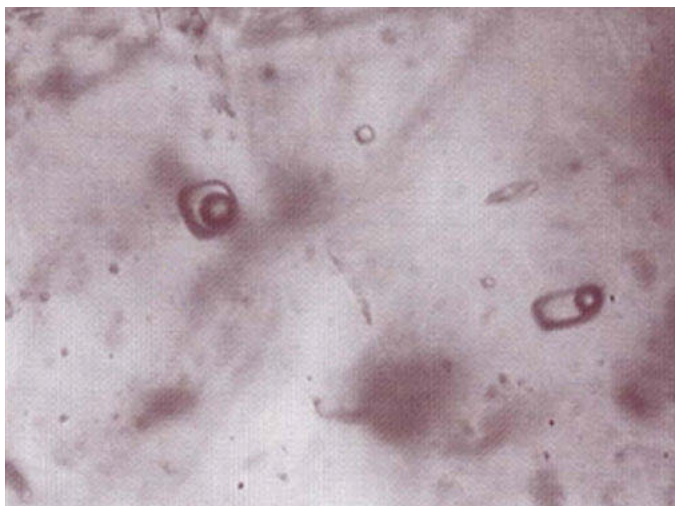
### Inclusiones de Fluido

Para el estudio microtermométrico de inclusiones fluidas se trabajó con una muestra de calcita de 2ª generación (posterior a la pectolita coloreada) ya que la pectolita, aun siendo el mineral a estudio, por su morfología fibrosa no dispone de un crecimiento apto para la localización de inclusiones de fluido válidas para su estudio.

Se han estudiado inclusiones de fluido atrapadas en planos cristalográficos de la calcita, evitando las posibles candidatas a haber sufrido contaminación por fluidos relleno de fisuras en la calcita. Para realizar este trabajo se han considerado inclusiones de fluido bifásicas (ricas en agua y con una burbuja de vapor, que homogenizan al estado líquido); también se ha localizado una inclusión de fluido trifásica (con un pequeño cristal de halita) (Fig. 24).

Los datos obtenidos han sido de salinidad (en equivalentes de peso de cloruro sódico, NaCl) y de temperatura de homogenización. La salinidad varía entre 3,5 y 5,5 % eq. NaCl, situándose la gran mayoría de valores en torno al 5 % eq. NaCl; lo que indica un fluido de salinidad moderada, aunque algo superior a la marina, que parece señalar (a falta de confir-



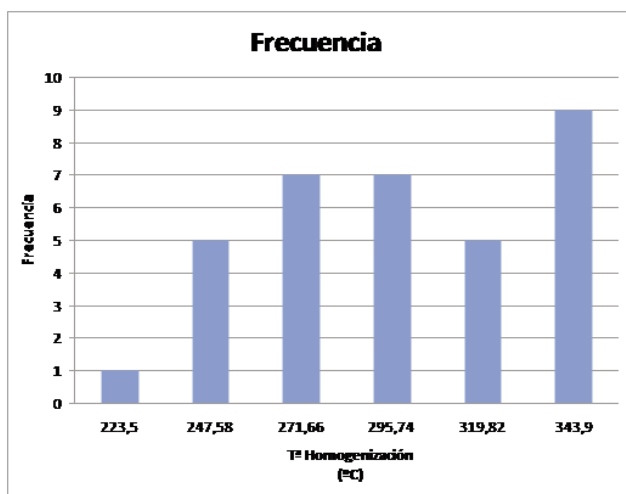


**Figura 24.** Microfotografías de inclusiones de fluido bifásicas y trifásicas (con el cristal de halita señalado por la flecha).

**Figure 24.** Photomicrographs of fluid inclusions with two and three phases (arrowed halite crystal).

mación mediante otros ensayos) que el origen de fluidos puede ser hidrotermal o de mezcla.

Aquí, (Fig. 25), se reconocen dos familias de temperaturas, una (la más abundante) en el rango de los 280 °C a 290 °C, y otra en torno a los 340 °C. Como la muestra estudiada se encuentra en un mismo cristal, estas dos familias (y los valores intermedios) muestran la evolución de la temperatura del sistema, tal y como se muestra la variación detectada dentro de una parte de la calcita.



**Figura 25.** Histograma de temperaturas de homogenización y evolución de temperatura detectada en la medición de inclusiones de fluido en la calcita.

**Figure 25.** Histogram of homogenization temperatures and changing temperature detected by measuring fluid inclusions in calcite.

Estas medidas están conformes con los resultados obtenidos por M<sup>a</sup> Ángeles Borrego (2006) quien, en base a estudios sobre materia orgánica, específicamente composición y textura de los restos orgánicos coquizados y deposición de sublimados, determinan la existencia de un proceso similar a la coquización que tuvo lugar en torno a 300 °C.

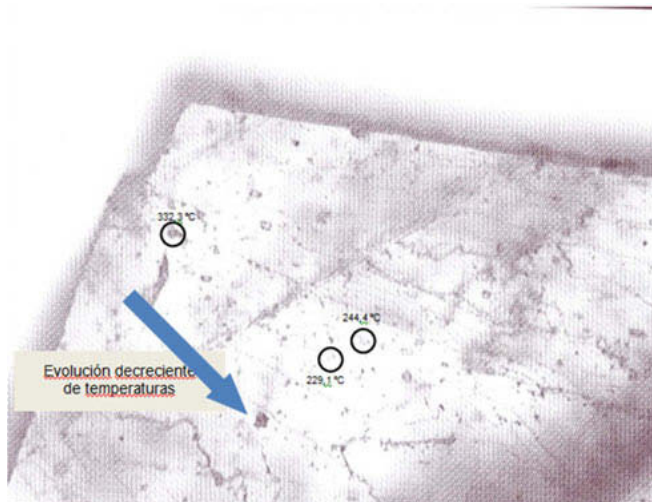
### Secuencia en la formación de la pectolita

Se han observado dos ambientes en la formación de la pectolita: en la formación de distintos tipos de pectolita depositada en los tallos y restos vegetales de la ladera del aparejo volcánico (bien en los huecos formados por la desaparición de los mismos) y las vetas que atraviesan tanto a las lavas de basalto como a los sedimentos volcánicos de ladera.

Las fases diferenciadas son las siguientes:

- Vacuolas con pectolita

En los tramos de volcanitas básicas atravesados, bien por las labores artesanales o por el Sondeo n<sup>o</sup>1, a los 75m, se han encontrado basaltos vesiculares con vacuolas de tamaño a veces apreciable (Fig. 26), conteniendo diversos minerales, pero con un predominio de la pectolita blanca y calcita. Las vacuolas se unen para formar venas de corto alcance o vacuolas de tamaño superior a los 2cm. Además, cuando esto ocurre pueden aparecer coloreadas en verde o en azul y asociadas a calcita. También aparecen con dimensiones apreciables en varios puntos del yacimiento, manteniendo casi siempre una coloración verde dominante. Figura 27.





**Figura 26.** Vacuolas de considerable tamaño y coloreadas en azul. Sondeo N°1.  
**Figure 26.** Vacuoles of considerable size and coloured in blue. Drill hole No. 1.

- En los restos orgánicos, generalmente tallos de plantas

1ª Fase: *Se conservan señales de la materia vegetal o el vacío producido.*

La materia orgánica en gran medida ha desaparecido, sin embargo, la coloración primera resulta totalmente negra, siendo en gran parte pectolita de ese color. El carbón ha coquizado y los trozos del mismo se presentan sueltos (grietas concéntricas y radiales) en una matriz de material inorgánico y plástico (Fig. 28 y 29). En los tallos muy definidos se identifica un aplastamiento final y aplanamientos en su base.

Sin duda, la sustitución de la materia orgánica se realizó desde la misma pasta de color verde claro, al mismo tiempo que segregaba núcleos de pectolita independizada. A esta fase también le asignamos la aparición de grumos de pectolita primaria, estirados según figuras fluidales o redondeados dentro de una pasta arcillosa de relleno (Fig. 30). Existen también grumos de pirita, a veces muy abundantes con señales de rodadura y estiramiento. La calcita aparece muy frecuentemente. En esta etapa, la pasta o barro caliente y cargado de líquido presenta láminas segregadas de deposición por gravedad en el apoyo del tallo, con aparición de segregaciones de pectolita blanca y, a veces, de color azul muy intenso.

2ª Fase: *La aparición de la pectolita blanca y traslúcida*

Esta tipología de pectolita sustituye, frecuentemente, a la de color negro o carbonosa. Procede del mismo relleno que se intruyó en las primeras etapas de enterramiento. La propia pasta de relleno arrastra pectolita blanca redondeada, señalando una etapa intermedia. Los sulfuros ya existían y, a veces, recubren a los fragmentos de la materia orgánica pectolita-



**Figura 27.** Gran vacuola de coloración verdosa y de composición pectolítica.  
**Figure 27.** Large greenish vacuole with pectolytic composition.

tizada. Aparecen cristales de calcita. En los tallos y de manera casi generalizada, la pectolita blanca o transparente penetra tangencialmente y tapiza las paredes del hueco (Figura 31).

3ª Fase: *La pectolita claramente azulada*

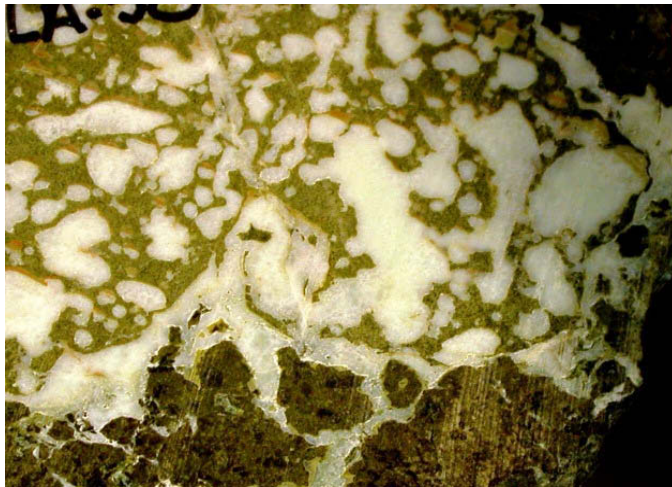
Netamente sustituye a la pectolita blanca (a veces rosada) anterior. Sin embargo, a veces este tipo de pectolita se agota sin llegar a sustituir en su totalidad a



**Figura 28.** El tallo vegetal ha coquizado y el hueco ha sido invadido por una pasta que provocó la sustitución del carbón vegetal por pectolita.  
**Figure 28.** The plant stalk was coked and the voids were invaded by a paste transforming into charcoal by pectolite.



**Figura 29.** La materia orgánica coquizó primero y luego fue sustituida por la pectolita temprana.  
**Figure 29.** Organic matter first coked and then replaced by early pectolite.



**Figura 30.** La pasta o barro volcánico ha segregado la pectolita que sedimenta en el fondo.  
**Figure 30.** Volcanic mud has segregated pectolite which settles to the bottom.

la pectolita blanca. La pectolita procede sin duda del barro o pasta que rellena los huecos dejados por la coquización de la materia orgánica. Esta pasta es de color claro y se distingue de alguna otra invasión de color más oscuro que, generalmente, no aporta más pectolita. Las sustituciones acaban en cristalizaciones de calcita muy abundantes. Existen núcleos de sulfu-



**Figura 31.** Se observa muy bien como la pectolita blanca penetra por un canal y comienza a tapizar el hueco de un tallo orgánico.  
**Figure 31.** The white pectolite penetrates through a channel coating the hollow of an organic stalk.

ros depositados en subfases más tardías, depositándose sobre la pectolita blanca o bien forman núcleos con señales de movimiento. La cristalización de la pectolita azulada progresa desde cualquier pared o núcleo sólido en cualquier dirección creando figuras poligonales o nidos de abeja. El color cambia en la cristalización a medida que progresa la longitud de la fibra, denotando un cierto "agotamiento" de color (Fig. 32)

Esta última avenida posee una coloración azul o verde muy intensa y puede llegar a rellenar completamente el hueco del tallo si éste es de pequeñas dimensiones (<4cm). Esta coloración, a veces, coexiste con otras de colores diferentes (marrón, beige, por ejemplo). El cobre nativo aparece siempre en esta fase. Resultan muy características las figuras en nido y las variaciones de los tonos azules, siempre relacionadas con la longitud de la fibra (Figura 33).

- En los rellenos de grietas o filones

Se pueden separar dos tipos de rellenos, bien por emplazarse en discontinuidades muy definidas, formando filones de muchos tipos o un conjunto de vetas con introducción del material de relleno en su roca de caja (Fig. 34).

Rellenos de diversos minerales, generalmente pectolita y calcita de grano fino con fuerte interacción de la roca de caja (Fig. 36). A veces la invade totalmente, englobando parte de las rocas volcánicas en sus zonas más cercanas al filón. Su apariencia es diseminada y la coloración varía entre beige-blanco a azul suave. Nuestra interpretación se dirige a considerarlos verdaderos "alimentadores" de los procesos de alteración pectolítica de la pila volcánica.



**Figura 32.** La sección del tallo muestra la pectolita transparente que sustituyó totalmente a la pectolita negra carbonosa y, después, se sustituye por la azulada, al menos parcialmente. La calcita ocupa el centro de esta última sustitución.

**Figure 32.** Stem section shows transparent pectolite replacing completely the black carbonaceous pectolite, and then is replaced by the blue, at least partially. Calcite occupies the center of the latter substitution.

Rellenos de pectolita azulada y verdosa albergada en grietas, sin afectar sustancialmente a la roca de caja. Estas vetas discurren por la pila de materiales volcánicos y, a veces, se bloquea debajo de los niveles arcillosos que componen el paleosuelo y el material de su base. El crecimiento en las venas es "en peine" y la calcita ocupa el último lugar en la deposi-



**Figura 33.** La última pectolita azulada, sobre todo en los tallos de escaso calibre sustituye la totalidad de su interior.

**Figure 33.** The last blue pectolite replaces especially low caliber stems.



**Figura 34.** Filones de diversos tipos. Aparecen en la potencia de las rocas basálticas y en una parte de su recorrido la pectolita no toma ningún color vistoso.

**Figure 34.** Various types of veins. They appear in the thicker part of basaltic rocks and in part of the way the pectolite does not take any bright colour.

ción. El cobre también puede aparecer. Son características las figuras de crecimiento de las cristalizaciones "en estrella", marcando dilataciones de la vena en la conjunción de varias de ellas o en el conglomerado-brecha situado debajo de los paleosuelos (Fig. 36). Dependiendo del color se aprovecha como joya.



**Figura 35.** Las avenidas de pectolita azulada atraviesan los episodios volcánicos y una fase anterior de alteración pectolítica sustituyendo en su ascenso a la roca de caja.

**Figure 35.** Bluish pectolite avenues traverse volcanic episodes and in an earlier alteration stage pectolyte substitutes the rock.

## Discusión y propuesta de un modelo

Reuniendo todos los datos aportados por la analítica y los estudios de campo, se propone un modelo genético, cuya secuencia de acontecimientos geológicos relacionados con la formación del yacimiento es la siguiente:

El proceso se inicia en el edificio volcánico con la deposición de flujos de ladera de materiales finos tipo lahar ("de ladera") sobre episodios de productos gruesos de inestabilidad de ladera, a veces con desprendimiento de grandes bloques, "flow avalanche" o "debris flow". El flujo de materiales finos se inicia en la parte superior del edificio volcánico y, discurriendo por un canal, avanza rápidamente ladera abajo. En el lugar en lo que hoy corresponde con los trabajos mineros, el flujo de materiales disminuía su energía al ensancharse el cauce, y éstos se depositaron preferentemente en los pequeños tramos de poca pendiente, entre los grandes bloques de desestabilizaciones ya pasadas.

En estos cauces rellenos parcialmente de materiales finos, cineritas, se desarrolla rápidamente un tupido bosque tropical. El mantenimiento de la actividad volcánica produce temblores de la ladera y nuevos flujos de agua y barro, arrastrando materiales de grandes dimensiones aplastan y transportan a no gran distancia el material orgánico abatido, conservando parte del suelo en dónde se desarrollaba (niveles rojos entre grandes bloques con vegetación en su

parte superior; zonas de lechos de materia orgánica entre clastos o gravas de la serie depositada anteriormente).

Este proceso se desarrolló en varias ocasiones, cerrando el ciclo la avalancha de bloques que sepulta a los últimos horizontes de paleosuelo. Los barros formados por acumulaciones de agua en la cumbre o en espacios laterales, pudieron estar calientes y contener vapor, propiciando las desestabilizaciones de ladera. Estos episodios se repitieron en intervalos de tiempo no muy grandes ya que los espesores de materiales entre secuencias no son muy importantes.

A veces, coinciden espacialmente en su desarrollo lateral, sobre todo los más próximos, temporalmente hablando. La materia vegetal se encuentra en zonas arcillosas pero emparedada entre flujos de bloques de dimensiones variables. Es decir, con una permeabilidad ligada a la textura creada por los "debris flow" y limitada por los lodos procedentes de las cineritas del episodio tipo lahar. Por otra parte, los flujos de lava incorporan y carbonizan la materia vegetal y dejan huecos que se unirán a las discontinuidades provocadas en el enfriamiento de la lava.

Poco después del enterramiento de la materia vegetal, se produce una litificación de todo el espesor de sedimentos finos. Probablemente en este episodio se carboniza, al menos parcialmente, la materia orgánica, liberando espacio en el interior del molde interno de los tallos enterrados y propiciando la invasión de fluidos y partículas finas. La presencia de esmectita sin evolucionar, en el interior de esos huecos, indica una escasa temperatura, aunque el avance de lodos calientes (debido a la llegada de flujos de lava sobre los suelos o acumulaciones de agua) es otra posibilidad que propiciaría la aparición de las primeras transformaciones en la roca primaria, incluyendo una primera fase de formación de pectolita.

De esta manera, lodos cargados de pectolita procedentes de niveles inferiores invaden los huecos dejados por la expansión de la materia orgánica



**Figura 36.** Estrella de cristalización de pectolita azulada entre cruce de grietas. El color no alcanza más de 20 mm en la misma fibra.

**Figure 36.** Bluish pectolite crystallization star situated between crack junction. The colour does not reach more than 20 mm in the same fiber.



**Figura 37.** Pectolita temprana mostrando una textura fluidal.  
**Figure 37.** Early pectolite showing a fluid texture.

coquizada sustituyen en secuencia creciente a la materia carbonosa primero, y luego, en varias ocasiones, a las sustituciones anteriores, aportando color desde los claros y tímidamente azulados a los verdes y francamente turquesa al final.

En las primeras aportaciones de barros volcánicos, el exceso de pectolita fue tan importante que, al margen de las sustituciones, produjo grumos estirados con figuras fluidales (Fig. 37) y acumulaciones de piritita (parcialmente orgánica). Además, existen figuras de sedimentación de pectolita en la bases de los tallos rellenos de materiales volcánicos con consistencia plástica o fluida (Fig. 40). La aportación del Instituto del Carbón (M<sup>o</sup> de los Ángeles Borrego, 2006) señala el proceso de carbonización en casi ausencia de oxígeno y una temperatura de 300 °C.

Otra posibilidad que no cambia sustancialmente la anterior propuesta se refiere a considerar que el flujo calorífico casi siempre estuvo ligado a la invasión de las lavas, en un proceso muy defendido para la formación de yacimientos de zeolitas en Watchung Mountain en USA. En este caso y apoyado en muchas evidencias, las coladas invadieron depósitos de arcillas en lagunas muy someras provocando el flujo de barros y soluciones calientes de sentido ascendente, con reacción sobre la roca de caja y deposición de los productos zeolíticos en grietas y lechos.

La pectolita y otros minerales hidrotermales procede de niveles poco profundos (Fig. 38 y 39), pero relativamente alejados a las deposiciones de ladera. Los basaltos vacuolares presentan huecos rellenos de zeolitas, carbonatos y pectolita que en varios casos,

curiosamente, ya comienza a tomar el color azul. Las vacuolas se comunican agrandando el tamaño y, posiblemente, los fluidos hidrotermales comienzan a ascender por el paquete de fracturas, invadiendo parcialmente los macizos de materiales volcánicos de cierta porosidad y deteniéndose en los niveles más arcillosos (paleosuelos, por ejemplo). De todas maneras, gran parte del edificio volcánico se encuentra penetrado por las avenidas hidrotermales (alteraciones descritas) y los barros saturados de fluidos hidrotermales han invadido los huecos ya descritos y, también, la base de los antiguos suelos, de estructura brechoide y parcialmente porosa. Esta *primera fase* transformativa coincidiría con la señalada en los basaltos vesiculares de Islandia por P. S. Neuhoff y otros (1999).

Se puede considerar una *segunda fase* con una generalizada transformación de carácter hidrotermal, con la alteración de los minerales primarios de las volcanitas y la formación de inter-estratificados de clorita-vermiculita, equivalente a los inter-estratificados clorita-esmectita islandeses. En este caso, por las razones de acceso, todavía no se han podido definir zonalidades, ni en profundidad ni lateralmente.

Según Joaquín Proenza (comunicación personal, 2007) a pesar de no encontrar geotermómetros de intercambio iónico en las especies cristalinas observadas, la pectolita y la calcita son el resultado de una etapa tardía que se encuentra relleno la porosidad final. Así, el proceso de zeolitización es anterior a la deposición de la pectolita, que, en algunos casos, crece pasivamente sobre minerales del grupo de la zeolita, tal como anteriormente se ha mencionado.



**Figura 38.** Tres tallos vegetales sustituidos parcialmente por pectolita coloreada. Zona oeste de Mina Nueva.

**Figure 38.** Three plant stems partially substituted by coloured pectolite. New Mine, west zone.



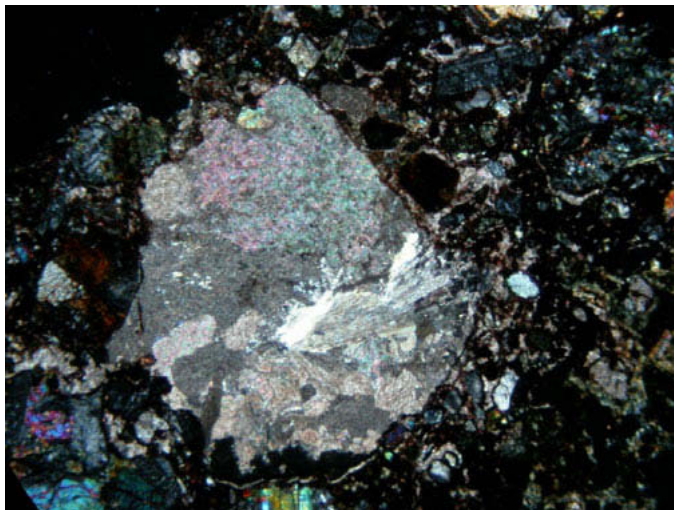
**Figura 39.** En el interior de las explotaciones de Mina Nueva, obsérvese la progresión de la pectolita coloreada hacia el molde de un tallo vegetal al que sustituirá.

**Figure 39.** Inside the New Mine, note the progression of coloured pectolite into a plant stem mould that replaced the stem.

El estudio de inclusiones fluidas realizado sobre la calcita perteneciente a la última deposición, señala una temperatura coherente con la coquización de la materia orgánica (250 °C-300 °C). Es decir, con casi seguridad, con momentos de generación muy próximos entre sí. La salinidad de este fluido invita a pensar en una celda de convección en donde participase también el agua marina próxima. La presencia del cobre nativo en la última fase coloreada, tanto dentro de los tallos sustituidos como en las venas exteriores, es una de las peculiaridades de esta fase. El generador de calor podrá ser la llegada de lavas y la invasión de diques póstumos.

Con el enterramiento de todas las primeras series volcánicas por la deposición de un potente nivel piroclástico desaparece la etapa hidrotermal principal. En la matriz de este piroclasto aparecen fragmentos con pectolita y calcita (Fig. 40). Este hecho nos indica que la fase de alteración ya había ocurrido y que tenía una considerable extensión.

La estructura actual del yacimiento se encuentra totalmente afectada por la fase de deformación ligada a la falla del río Cito y el apilamiento de las escamas en cuyo interior se emplazan las dispersiones y concentraciones de pectolita coloreada. Estas transformaciones son de efectos puramente mecánicos, dislocando los niveles o venas portadoras y, en todo

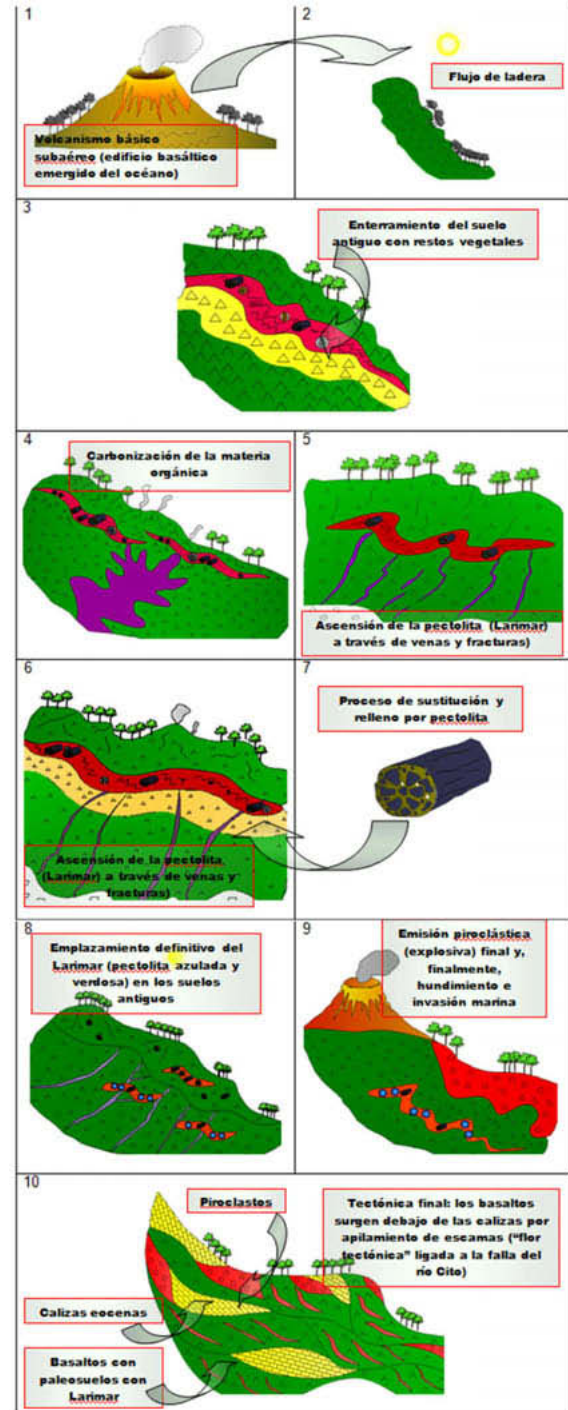


**Figura 40.** Fragmento que contiene pectolita y calcita. Ello es de gran interés, pues pertenece a la última fase reconocida de la secuencia volcánica, desprovista de todo interés minero, sin embargo, cuando se depositó ya existía una fase regional de transformaciones de bajo grado Lámina delgada x 2,5.

**Figure 40.** Sample containing pectolite and calcite. This is very interesting, because it belongs to the last phase of the volcanic sequence, devoid of any mining interest. However, when it was already deposited a regional phase with low-grade transformations already existed. Thin slide x 2,5.

caso, fragmentando y estriando algunos bloques o fragmentos de Larimar.

**Esquema general de la formación del Larimar**



**Figura 41.** Fases principales en la formación del Larimar y su evolución posterior.

**Figure 41.** Main stages in the Larimar formation and its subsequent evolution.

## Conclusión

Ante las singularidades de la aparición de la pectolita coloreada en azul, quizás única en el mundo, cabe preguntarse cuales han sido las condiciones que se han acumulado para producir este caso tan excepcional. Sin expresar la totalidad de hechos, sí podemos resaltar los siguientes:

Existencia de un plateau oceánico en ascenso que, en este caso, provoca aportes basálticos en medio continental (superficies de erosión aérea y formación de paleosuelos) y la coexistencia con efusiones sumergidas (pillow-lavas).

Alteración rápida de las superficies emergidas y colonización vegetal a gran velocidad, tal como lo demuestran los abundantes vestigios orgánicos que tapizan los suelos, rápidamente enterrados, bien por coladas de barro o por flujos de lava.

Repetición casi sistemática de los acontecimientos ligados a una secuencia de arrasamiento y efusión lávica.

Concentración de energía en determinados lugares que, juntamente con una fase fluida agresiva (5% salina y 200 °C-300 °C de temperatura) facilita su movimiento, normalmente hacia niveles superiores, reaccionando con la roca de caja y desestabilizando sus minerales.

Cantidades suficientes de metales en la roca de caja (Cu, Mn, Va, Fe) que pueden determinar condiciones de cambio de coloración, todavía en fase de estudio. Extensión del fenómeno de transporte y limitación de la cantidad: existencia de niveles no productivos y también agotamiento del color. La norma es la aparición de tallos vegetales no totalmente sustituidos por pectolita coloreada y en el caso de fuese así, éstos son de escaso diámetro. Existen también sustituciones de frutos y semillas con figuras y tonalidades diferentes.

## Agradecimientos

Al referirnos a los investigadores de variadas especialidades que han ayudado en la comprensión del proceso de formación de esta piedra preciosa, corremos el peligro de olvidarnos de mucha gente. La Unión Europea en su programa de apoyo a la minería dominicana contó con gestores de gran calidad técnica que apoyaron el proyecto de Bahuco dentro de los programas SYSMIN I y II, tales son los casos de Manuel del Campo y Enrique Burkhalter; además, el excelente y desinteresado trabajo de la Doctora María Angeles Borrego y el Doctor Diego Álvarez del INCAR sobre las condiciones genéticas de las sustancias

orgánicas relacionadas con el Larimar, el profesor Ricardo Castroviejo de la UPM, el investigador del IGME Félix Bellido, Marc Joubert ahora especialista en la zona estudiada y otros más.

## Referencias

- Bellon, H., Vila, J.M., & Mercier de Lepinay B., 1985. Chronologie K-Ar et affinités géochimiques des manifestations magmatiques au Crétacé et au Paléogène dans l'île d'Hispaniola. En: *Géodynamique des Caraïbes*. Editions Technip. Géodynamique des Caraïbes. pp. 329-340.
- Bernhard Heinz-Jürgen. 2009. Universidad Ru-Bochum. Informe interno
- Bente K., Thum R., Wannemarchaer J. 1991. Colored Pectolites so called Larimar, from Sierra de Bauruco, Barahona Province, southern Dominican Republic. N. Jb. Miner. Mh, Jg, , H-1. Stuttgart, January 1991
- Borrego M. A. y Alvarez D. 2006. Informe del INCAR, aún sin publicar
- Burke, K., Fox, P.J., Sengor, M.C., 1978. Buoyant ocean floor and the origin of the Caribbean J. *Geophys. Research*, 83, pp. 3949-3954.
- Byrne, D. B., Suarez, G., McCann, W. R. 1985. Muertos through subduction-microplate tectonics in the northern Caribbean nature, 317, pp. 420-421.
- Calmus, T. 1983. Décrochement senestre sud-haitien: analyses et conséquences paléogéographiques dans la région de Camp Perrin. Extrait *Ann. Soc. Geol. Nord* pp. 309-316.
- Cooper, C. 1983. Geology of the Fondo Negro region, Dominican Republic. MSc. Thesis, State University of New York, Albany, 145 p.
- D.G. de Minería de la R. Dominicana y BGR, 1991. *Mapa Geológico de la República Dominicana 1/250.000*. BGR Hannover, 1991
- Dolan, J., Mann, P., De Zoeten, R., Heubeck, C., Shiroma, J. & Monechi, S., 1991. Sedimentologic, stratigraphic, and tectonic synthesis of Eocene-Miocene sedimentary basins, Hispaniola and Puerto Rico. *Special Paper Geological Society of America*, 262, pp. 217-263.
- Dolan, J. F., Mullins, H.T. y Wald, D. J., 1998. Active tectonics of the north-central Caribbean: Oblique collision, strain partitioning and opposing subducted slabs . En: Dolan, J. F. y Mann, P. (Eds) Active Strick-Slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone, *Geological Society of America. Special Paper*, 326. pp. 1-61.
- Donnelly, T.W., Beets, D., Carr, M.J., Jackson, T., Klaver, G., Lewis, J.F., Maury, R., Schellenkens, H., Smith, A.L., Wadge, G. & Westercamp, D., 1990. History and tectonic setting of Caribbean magmatism. En: Dengo G. and Case J. E. eds. *The Caribbean region, Geol. Soc. Am.*, Boulder, CO, United States (USA), United States (USA)
- Draper, G., Mann, P. and Lewis, J. F. 1994. Hispaniola: in Donovan S.K. and Jackson, T. A. (eds.) *Caribbean Geology: an introduction*, University of the West Indies



- Publishers Association/University of the West Indies Press, Kingston, Jamaica, pp. 129-150
- Espí J.A. 1997. Análisis y Ordenación de la Minería Artesanal de la República Dominicana. *Dirección General de Minería de la R. Dominicana*. SYSMIN I
- Espí J.A. y Pérez-Puig C. 2009. Estudio geológico e infraestructuras de apoyo en la minería del Larimar en la República Dominicana. *Revista de la Escuela de Minas de Madrid*, n° 6, pp. 101-113
- Fujishima L. y Pow-Fong F. 1997. Hidrotermal mineralogy of Keolu Hills, Oahu, Hawaii. *American Mineralogist*. Vol. 62. pp. 574-582
- García-Senz J., Monthel J., Díaz de Neira J.A., Hernaiz Huerta P. P., Escuder Viruete J., Pérez- Estaún A. 2007. La estructura del Suroeste de la República Dominicana: un ejemplo de deformación en régimen transpresivo. *Boletín Geológico y Minero* Vol. 118, N° 2, 2007, pp. 293-311
- girard, D., Beck, C., Stephan, J. F., Blanchet, R. y Maury, R. 1982. Pétrologie géochimie et signification géodynamique de quelques formations volcaniques crétaées peri-caraibes, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 24, pp. 535-544.
- Heinz-Jürgen Bernhard, 2009. Universidad RU-Bochum. Informe interno
- Hernaiz Huerta P.P., Díaz de Neira J.A., García-Senz J., Deschamps I., Genna A., Nicole N., Lopera E., Escuder Viruete J., Ardévol Oró LL., Pérez-Estaún A. 2007. La estructura del suroeste de la República Dominicana: un ejemplo de deformación en régimen transpresivo. *Boletín Geológico y Minero*, 118 (2), pp.337-358
- Joubert M. 2010. R. Dominicana. Cartografía Geotemática. Hoja de La Ciénaga. 5970-II. Proyecto SYSMIN II. Consorcio IGME-BRGM-INYPSA
- Lewis, J. F., 1982. Ultrabasic and associated rocks in Española. *Transactions of the Caribbean Geological Conference. Memorias - Conferencia Geológica del Caribe*, 9, pp. 403-408.
- Mann, P., McLaughlin, P.P. y Cooper, C. 1991c. Geology of the Azua and Enriquillo basins, Dominican Republic; 2, Structure and tectonics. *Geological Society of America. Special Paper* 262.
- Mann, P., Draper, G. y Lewis, J. F., 1991a. An overview of the geologic and tectonic development of Hispaniola. *Special Paper Geological Society of America*, 262, pp. 1-28.
- Masson, D.G., y Scalonn, K.M. 1991. The neotectonic setting of Puerto Rico. *Geological Society of American Bulletin*, 103, pp.144-154.
- Maurrasse, F., Husler, J., Georges G., Schmitt, R. Y damond, P. 1979. Upraised Caribbean Sea floor below acoustic reflector B in the *Southern Peninsula of Haiti*, Geology en Mijnbuow, 58, pp. 71-83
- Mercier de Lepinay, B.1987. L'évolution géologique de la bordure Nord-Caraïbe: Exemple de la transversale de l'île Española. Thèse doctorat, Université Pierre et Marie Curie, pp. 378.
- Neuhoff P.S., Fridriksson T., Arnorsson, S., Bird D.K. 1999. Porosity evolution and mineral paragenesis during low-grade metamorphism of basalt lavas at Teigarhorn, eastern Iceland. *American Journal of Science*, V. 299, June 1999, pp. 467-501
- Pérez-Estaún A., Hernaiz Huerta P. P, Lopera E., M. Joubert, Escuder Viruete J., Díaz de Neira J.A., Monthel J., García-Senz J., Ubrien P., Contreras F., Bernárdez E., Stein G., Deschamps Y., García Lobón J. L., Ayala C. 2007. Geología de la República Dominicana: de la construcción de arcos-isla a la colisión arco-continente. *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 118, N° 2, 2007, pp. 157-173.
- Sen, G.R., Hickey-Vargas G., Waggoner y Marausse F. 1988. Geochemistry of basalts from the Dumisseau formation, southern Haiti; implications for the origin of the Caribbean crust. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 59, 403 pp..
- Van den Berghe, B. 1983. Evolution sédimentaire et structurale depuis le Paléocène de secteur Massif de la Selle-Bahoruco-Nord de la Ride Beata dans le orogénie nord Caraïbe. These Doctoral. Paris France. Université Marie et Pierre Curie, 205 pp.
- Woodruff, R.E. y Fritsch, 1989. Blue Pectolite from the Dominican Republic. *Gems and Geology*. Winter 1989. pp. 216-225.

Recibido: marzo 2015

Revisado: junio 2015

Aceptado: julio 2015

Publicado: septiembre 2017

