

Geological study and characterization of septary concretions in the Aguas Calientes area, Eduardo Villanueva, San Marcos, Cajamarca

Portilla Castañeda, Miguel Ricardo¹  Flores Bustamante, Alexis² ; Tejada Malon, Norbil Jesus³ 
^{1,2,3}Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. miguel.portilla@upn.edu.pe, N00341390@upn.pe,
N00326559@upn.pe

Abstract– This research focused on the study of six septate concretions found in fluvio-colluvial deposits of the Crisnejas River, in the Aguas Calientes area (Eduardo Villanueva district, San Marcos province, Cajamarca region), with the objective of determining their formation conditions and their relationship to the Chicama Formation (Upper Jurassic). Using a descriptive and analytical methodology, which included fieldwork with georeferencing, macroscopic characterization, and laboratory petrographic analysis, it was determined that these structures correspond to authigenic diagenetic concretions, formed in situ within deep-sea, anoxic marine black shales. The samples exhibit an ellipsoidal morphology (12–18 cm), a smooth external surface of primary origin, and radial internal fractures (septa). The infilling of these fractures is composed exclusively of calcite in Groups I and II, while in Group III the septa contain kaolinite and chlorite, resulting from the diagenetic alteration of silicates, feldspars, and micas. The presence of relict pyrite indicates early reducing conditions, and the iron oxides (hematite, jarosite, goethite) that stain the crusts and margins derive from the late supergene alteration of ferrous ankerite. Three morphological groups were distinguished: Group I with regular polygonal septa, Group II with two populations of fractures, and Group III with fine chaotic septa. Geological mapping revealed that the specimens originate from the Chicama Formation, exhumed and concentrated by the seasonal dynamics of the Crisnejas River, which acts as an erosive and transport agent, preserving primary textures through short-distance transport. The results confirm that the septaries originated during early diagenesis through differential cementation and circulation of carbonate fluids for Groups I and II, and silicate fluids for Group III, with syneresis fracturing associated with compaction. This study contributes to the knowledge of diagenetic processes in Jurassic basins of northern Peru and highlights the value of these structures as paleoenvironmental and fluid evolution indicators.

Keywords– Septarian concretions, Chicama Formation, early diagenesis, fluid circulation, petrological characterization.

Estudio geológico y caracterización de concreciones septarias en la zona Aguas Calientes, Eduardo Villanueva, San Marcos, Cajamarca

Portilla Castañeda, Miguel Ricardo¹  Flores Bustamante, Alexis² ; Tejada Malon, Norbil Jesus³ 
^{1,2,3}Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. miguel.portilla@upn.edu.pe, N00341390@upn.pe,
N00326559@upn.pe

Resumen— La presente investigación se centró en el estudio de seis concreciones septarias halladas en depósitos fluvio coluviales del río Crisnejas, en la zona de Aguas Calientes (distrito de Eduardo Villanueva, San Marcos, Cajamarca), con el objetivo de determinar sus condiciones de formación y su relación con la Formación Chicama (Jurásico superior). Mediante una metodología descriptiva y analítica, que incluyó trabajo de campo con georreferenciación, caracterización macroscópica y análisis petrográfico de laboratorio, se determinó que estas estructuras corresponden a concreciones diagenéticas autógenas, formadas in situ dentro de lutitas negras marinas profundas y anóxicas. Las muestras presentan morfología elipsoidal (12-18 cm), superficie externa lisa de origen primario y fracturas internas radiales (septos) cuyo relleno está compuesto exclusivamente por calcita en los Grupos I y II, mientras que en el Grupo III los septos contienen caolinita y clorita, procedentes de la alteración diagenética de silicatos, feldespatos y micas. La presencia de pirita relicta evidencia condiciones reductoras tempranas, y los óxidos de hierro (hematita, jarosita, goethita) que tienen cortezas y bordes derivan de la alteración supergénica tardía de la ankerita ferrosa. Se distinguieron tres grupos morfológicos: Grupo I con septos poligonales regulares, Grupo II con dos poblaciones de fracturas y Grupo III con septos caóticos finos. La cartografía geológica reveló que los ejemplares proceden de la Formación Chicama, exhumados y concentrados por la dinámica estacional del río Crisnejas, que actúa como agente erosivo y de transporte preservando texturas primarias por transporte corto. Los resultados confirman que las septarias se originaron durante la diagénesis temprana por cementación diferencial y circulación de fluidos carbonatados para los grupos I y II, y silicatados para el grupo III, con fracturamiento por sinéresis asociado a compactación. Este estudio aporta al conocimiento de los procesos diagenéticos en cuencas jurásicas del norte peruano y destaca el valor de estas estructuras como indicadores paleoambientales y de evolución de fluidos.

Palabras clave: Concreciones septarias, formación Chicama, diagénesis temprana, circulación de fluidos, caracterización petrológica.

I. INTRODUCCIÓN

Las concreciones septarias son estructuras diagenéticas en secuencias sedimentarias, definidas por fracturas radiales o poligonales. Se forman durante la diagénesis temprana por compactación diferencial, variaciones de presión de poros, temperatura y circulación de fluidos ricos en iones, generando fracturas y precipitación mineral [1]. Son reconocidas como indicadores paleoambientales [2]. La circulación de fluidos con

cationes divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+}) permite rellenos polifásicos [3]. Los fluidos migran a zonas de menor presión efectiva, precipitando cementos sucesivos [1,3]. La termometría de isótopos estables en inclusiones fluidas documenta temperaturas crecientes (25-35°C a 60-95°C), evidenciando mineralización policíclica [3,4,5].

Las septarias indican variaciones redox, contenido de materia orgánica y sedimentación lenta [6]. La formación de fracturas septarias está fuertemente asociada a sobrepresión generada por enterramiento rápido, lo que favorece la fracturación en concreciones carbonatadas [7]. Pueden formarse en plataformas marinas con baja sedimentación [8]. La actividad microbiana contribuye a su génesis [2]. Conservan firmas isotópicas que permiten reconstruir temperaturas y evolución diagenética [5]. Muchas presentan crecimiento multietapa con rellenos sucesivos [5,8].

La tectónica regional puede facilitar la circulación de fluidos mineralizantes [9]. Las septarias se diferencian de otras concreciones por su fracturación sistemática [10]. Son indicadores clave de evolución diagenética de cuencas [9]. En mudrocks, están controladas por cementación temprana, difusión y fluidos intersticiales [11]. Algunas septarias ricas en sílice pueden vincularse a actividad hidrotermal en márgenes extensionales [12]. Han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para registrar condiciones físico-químicas [13]. Su crecimiento está vinculado a la dinámica de fluidos y fluctuaciones fisicoquímicas durante el enterramiento [14]. La morfología concrecionaria es diagnóstica para reconstruir condiciones deposicionales y dirección de compactación [15]. Los isótopos estables permiten establecer el origen y evolución de los fluidos mineralizantes [16].

El Perú se ubica en un contexto de subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana, que ha originado los Andes y una diversidad geológica [17]. Esta interacción genera deformación cortical, sismicidad y magmatismo de arco [18], explicando la presencia de distintos ambientes sedimentarios, volcánicos y metamórficos [19].

En Cajamarca, su geología incluye unidades paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas, con formaciones clásticas,

carbonáticas y volcánicas, y depósitos cuaternarios [20]. La diversidad litológica se asocia a la tectónica activa [21]. En la zona de Aguas Calientes dentro de la cuenca del río Crisnejas, se han expuesto unidades jurásicas y cretácicas [22]. El río Crisnejas, en lluvias de diciembre a marzo es el agente erosivo y de transporte; en estiaje de mayo a setiembre permite observar concreciones nodulares oscuras [23]. Destaca la Formación Chicama del Jurásico superior al Cretácico inferior, con areniscas grises, horizontes arcillosos y lutitas negras de ambiente marino [24]. Los sedimentos de la Formación Chicama derivan principalmente del Complejo Metamórfico del Marañón, evidenciando una fuente proterozoica dominante en su proveniencia [25].

La evolución de la cuenca Chicama comprende tres etapas: subsidencia inicial rápida, relleno turbidítico y posterior colmatación durante el tránsito Jurásico-Cretácico [26]. La presencia de septarias en la Formación Chicama, en Aguas Calientes, es relevante para interpretar procesos diagenéticos marinos [27]. Son indicadores de compactación y circulación de fluidos [28]. Su estudio aporta información sobre evolución sedimentaria y tectónica regional [9], y contribuye a entender la evolución geomecánica [7]. La diversidad litológica de Cajamarca se vincula con la tectónica activa [29]. La Carta Geológica Nacional contextualiza estos hallazgos [30].

Con lo mencionado anteriormente, se pretende responder a la siguiente formulación del problema: ¿Cuáles fueron las condiciones de formación de las concreciones septarias halladas en la formación Chicama, expuestas por el río Crisnejas en la zona de Aguas Calientes?. Asimismo, se ha planteado el siguiente objetivo general: Determinar las condiciones de formación de las concreciones septarias de la Formación Chicama, a partir de su caracterización petrológica, mineralógica, litológica y cartográfica en la zona de Aguas Calientes. Teniendo como partida este objetivo se busca: describir las características petrológicas y mineralógicas externas e internas de las concreciones septarias; determinar las características litológicas del entorno estratigráfico de la Formación Chicama; cartografiar la zona de estudio y la distribución espacial de las concreciones septarias en el área de estudio; evaluar la relación diagenética entre las concreciones septarias y la estratigrafía local; y examinar el papel del río Crisnejas en la exposición y preservación de estas concreciones septarias. De igual manera, la hipótesis general de la investigación plantea que las concreciones septarias de la Formación Chicama se formaron en ambientes marinos bajo condiciones diagenéticas particulares de circulación de fluidos y cementación diferencial, y su preservación actual se debe a la acción erosiva del río Crisnejas. Por lo que, las hipótesis específicas planteadas son las siguientes: primero, las concreciones septarias presentan rellenos que evidencian procesos de cementación diferencial en ambientes marinos; segundo, la morfología y fracturación interna reflejan condiciones de compactación y circulación de fluidos durante

la diagénesis temprana antes de la consolidación de la roca; tercero, la distribución espacial de las septarias está controlada por la estratigrafía de la Formación Chicama y la tectónica local; y cuarto, el río Crisnejas ha sido un agente clave en la exposición y preservación de estas concreciones, permitiendo su estudio actual.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo descriptivo, orientado a la caracterización geológica y análisis de concreciones septarias mediante observaciones directas en campo y el estudio de muestras recolectadas. El enfoque metodológico es descriptivo y analítico, ya que busca reconocer las características morfológicas, estructurales y sedimentológicas de las concreciones, así como interpretar los procesos diagenéticos relacionados con su formación. El diseño del estudio es no experimental, debido a que no se manipularon variables, centrándose únicamente en la observación, registro y análisis de las condiciones naturales del área investigada. Asimismo, presenta un carácter transversal, dado que la información fue recopilada durante campañas de campo realizadas en un periodo específico por condiciones de la zona.

El área de estudio se localiza en la zona de Aguas Calientes del río Crisnejas, distrito de San Marcos, región Cajamarca. En esta zona se desarrollaron diversas salidas de campo orientadas al reconocimiento geológico regional, identificación de afloramientos y localización de concreciones septarias. Durante estas actividades se efectuó el levantamiento de información mediante observación directa, registro fotográfico y descripción litológica de los materiales presentes.



Fig. 1 Foto satelital zona de estudio.

La población de estudio estuvo constituida por los afloramientos sedimentarios de la Formación Chicama que contienen concreciones septarias dentro del área delimitada. La selección de muestras se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, priorizando aquellas concreciones que presentaban fracturación (septos) visible, buen estado de preservación y accesibilidad en campo. Cada punto de muestreo fue georreferenciado mediante un sistema de posicionamiento global (GPS), registrando coordenadas UTM

y describiendo el contexto estratigráfico específico, estructuras sedimentarias y espesor de los niveles muestreados.

La recolección de muestras se efectuó de forma manual utilizando herramientas de campo como martillos geológicos y cinceles, se recolectaron seis muestras representativas (designadas S-1 a S-6). Este tipo de muestreo resulta común en investigaciones geológicas exploratorias, donde la disponibilidad y conservación de los ejemplares condicionan el proceso de recolección. Las técnicas empleadas para la obtención de datos incluyeron diversas actividades sistemáticas. En primer lugar, se llevó a cabo el reconocimiento geológico superficial, mediante el mapeo y descripción de las unidades litológicas aflorantes, identificando la estratigrafía local y la relación de las concreciones con la roca hospedante. Asimismo, se registraron datos relacionados con la orientación, densidad y distribución espacial de las concreciones dentro de los niveles sedimentarios.



Fig. 2 Mapa geológico zona de estudio.

Posteriormente, se aplicaron técnicas orientadas a la caracterización petrológica y mineralógica de las muestras, este enfoque petrográfico resulta fundamental para interpretar los procesos diagenéticos involucrados en la formación de las concreciones, incluyendo mecanismos como compactación, contracción del sedimento o cementación mineral posterior. De manera complementaria, en laboratorio se procedió al uso del microscopio estereoscópico universal, lo que permitió documentar con detalle las estructuras internas y externas, prestando especial atención a la presencia, morfología, orientación de las fracturas septarias y a los rellenos minerales observables. Para el caso de la muestra más compacta y sólida (S-4), se realizó un corte controlado transversal, dividiendo el espécimen en dos mitades. Esta operación permitió exponer su núcleo interno, originalmente no visible, y observar la distribución de los minerales, la textura de la matriz y la geometría de los septos de escasa potencia.



Fig. 3 Uso de microscopio estereoscópico universal.

Finalmente, el desarrollo de la investigación se llevó a cabo bajo principios de rigurosidad científica y ética académica, asegurando el adecuado registro de la información y la correcta citación de fuentes conforme a normas vigentes, garantizando la transparencia y reproducibilidad del estudio.

III. RESULTADOS

3.1. Descripción Petrográfica Y Mineralógica De Las Muestras

De manera general las muestras del presente estudio comparten características similares, como son un alto peso específico por la concentración de minerales como pueden ser carbonatos, óxidos o sulfuros en la matriz, corteza y relleno.

3.1.1. Muestra S-1

TABLA I
CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS Y MINERALÓGICAS DE SEPTARIA MUESTRA S-1

Propiedades	Descripción
Generales: Nivel Macroscópico	La muestra analizada presentó una forma elipsoidal con dimensiones de 16 cm de largo, 15 cm de ancho y 10 cm de alto, con una superficie externa de textura lisa levemente alterada y fracturas de 3 mm a 4 mm de ancho, teniendo un color externo marrón oscuro y tonalidades rojizas por partes, rasgo indicativo de procesos de alteración supergénica, además de su alto peso específico y su alta competencia. Nota: La muestra se encontró fracturada aproximadamente por la mitad del elipsoide.
Matriz: Parte Interna de la Concreción	El núcleo interno de la septaria tiene unas dimensiones de sección de 8 cm de ancho y 6 cm de alto, está compuesto por minerales de depósitos calcarios, como son principalmente; calcita en un hábito hojoso y ankerita, como presencia secundaria minerales y accesorios comunes como; cuarzo y pirita, presentando además una pátina de hematita superficial.
Corteza: Parte externa lisa oscura	La corteza externa está compuesta por ankerita masiva compacta de origen diagenético primario, con cantos redondeados, que no efervesce con ácido clorhídrico en frío, pero sí reacciona con ácido clorhídrico caliente, y con presencia superficial de hematita.
Septos: Fracturas rellenadas	En el relleno de las fracturas se encontró la presencia de carbonatos como calcita y teniendo en la parte externa la presencia de hematita, además se observó que todas

	tienen un ancho de 3 mm a 4 mm, con un patrón de fracturas poligonales regulares.
--	---



Fig. 4 Septaria muestra N° 1

Nota. La muestra presenta forma de elipsoide, color oscuro dominante y cierta textura lisa.



Fig. 5 Septaria muestra S-1 bajo el microscopio estereoscópico universal con aumento por 12

Nota. En la parte del núcleo la muestra presenta diversos fenocristales correspondientes a calcita y ankerita con cuarzo y la presencia de hematita superficial por alteración química del ambiente.

3.1.2. Muestra S-2

TABLA II
CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS Y MINERALÓGICAS DE
SEPTARIA MUESTRA S-2

Propiedades	Descripción
Generales: Nivel Macroscópico	La muestra analizada presentó una forma elipsoidal con dimensiones de 14 cm de largo, 10 cm de ancho y 7 cm de alto, con una superficie externa de textura lisa levemente alterada y fracturas de 3 mm ancho, teniendo un color externo marrón oscuro y tonalidades rojizas por partes, rasgo indicativo de procesos de alteración supergénica, además de su alto peso específico y su alta competencia. Nota: La muestra se encontró entera y sin fracturas con leve alteración superficial.
Matriz: Parte Interna de la Concreción	Como la concreción no está fracturada, no se puede observar a detalle la parte interna, pero se asume que es similar a la muestra S-1.
Corteza: Parte externa lisa oscura	La corteza externa está compuesta por ankerita masiva compacta de origen diagenético primario, con cantos redondeados, que no efervesce con ácido clorhídrico en frío, pero sí reacciona con ácido clorhídrico caliente, y con presencia superficial de hematita.
Septos: Fracturas rellenadas	En el relleno de las fracturas se encontró la presencia de carbonatos como calcita y teniendo en la parte externa la presencia de hematita, además se observó que todas tienen un ancho de 3 mm, con un patrón de fracturas poligonales regulares.



Fig. 6 Septaria muestra S-2

Nota. La muestra presenta forma de elipsoide, color oscuro dominante y cierta textura lisa.

3.1.3. Muestra S-3

TABLA III
CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS Y MINERALÓGICAS DE
SEPTARIA MUESTRA S-3

Propiedades	Descripción
Generales: Nivel Macroscópico	La muestra analizada presentó una forma elipsoidal con dimensiones de 18 cm de largo, 14 cm de ancho y 10 cm de alto, con una superficie externa de textura lisa levemente alterada, con fracturas de 5 mm y otras de 2 mm de ancho, teniendo un color externo marrón oscuro y tonalidades rojizas por partes, rasgo indicativo de procesos de alteración supergénica, además de su alto peso específico y su alta competencia. Nota: La muestra se encontró entera y sin fracturas con leve alteración superficial.
Matriz: Parte Interna de la Concreción	Como la concreción no está fracturada, no se puede observar a detalle la parte interna, pero se asume que es similar a la muestra S-1.
Corteza: Parte externa lisa oscura	La corteza externa está compuesta por ankerita masiva compacta de origen diagenético primario, con cantos redondeados, que no efervesce con ácido clorhídrico en frío, pero sí reacciona con ácido clorhídrico caliente, y con presencia superficial de hematita.
Septos: Fracturas rellenadas	En el relleno de las fracturas se encontró la presencia de carbonatos como calcita y teniendo en la parte externa la presencia de hematita, además se observó que hay fracturas con un ancho de 5mm y otras transversales de 2 mm, donde los septos de 5mm de ancho tienen un patrón caótico que convergen en el centro, y las más pequeñas de 2 mm no respetan ese patrón posicionándose transversalmente pero no cortando a las principales, representando un segundo evento de fracturación en la muestra.



Fig. 7 Septaria muestra S-3

Nota. La muestra presenta forma de elipsoide, color oscuro dominante y cierta textura lisa.

3.1.4. Muestra S-4

TABLA IV
CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS Y MINERALÓGICAS DE
SEPTARIA MUESTRA S-4

Propiedades	Descripción
Generales: Nivel Macroscópico	La muestra analizada presentó una forma elipsoidal con dimensiones de 14 cm de largo, 12 cm de ancho y 8 cm de alto, con una textura terrosa y alteración avanzada, con fracturas de 1.8mm a 2mm y otras más pequeñas de 1mm a 1.2 mm, teniendo un color externo marrón claro y tonalidades rojizas con negras por partes, rasgo indicativo de procesos de alteración supergénica, además de su alto peso específico y su alta competencia. Nota: La muestra se encontró muy alterada y se consideró hacer un corte controlado transversalmente para observar mejor su interior.
Matriz: Parte Interna de la Concreción	El núcleo interno de la muestra con una sección de 11 cm de ancho y 5 cm de alto muestra una alteración casi en su totalidad a excepción de la parte más céntrica de una sección de 8 mm de ancho y 5 mm de alto, dónde la parte alterada presenta un color gris a negro, las partes de los septos presentan caolinita en su totalidad con una baja dureza con un color mate blanco a gris y la otra parte más oscura es clorita masiva oscura mate con piritita diseminada, por otro lado la parte interna del núcleo todavía sin alterar tiene un color blanquecino con puntos negros, con minerales como cuarzo, biotita, albita (plagioclasa sódica) y piritita.
Corteza: Parte externa lisa oscura	La corteza externa está compuesta por ankerita masiva enriquecida con Fe compacta de origen diagenético primario, pero con un espesor de 1 cm, con cantos redondeados, que por su alta concentración de Fe no efervescen, y en la parte más superficial ya se fue alterando teniendo minerales como hematita con una pátina de 2 mm.
Septos: Fracturas rellenadas	En el relleno de las fracturas se encontró la presencia de caolinita y teniendo en la parte externa la presencia de hematita, además se observó que hay fracturas con un ancho de 1.8 mm a 2mm y otras transversales de 1 mm a 1.2 mm, donde los septos no siguen ningún patrón en particular siendo caótico, y las más pequeñas se cruzan entre las primeras, pero sin cortarlas, representando un segundo evento de fracturación en la muestra.



Fig. 8 Septaria muestra S-4

Nota. La muestra cortada presenta forma de elipsoide, color oscuro dominante y cierta textura lisa.



Fig. 9 Septaria muestra S-4 bajo el microscopio estereoscópico universal con aumento por 14

Nota. En la parte de la corteza muestra los septos de mayor tamaño y los de menor tamaño de forma transversal sin cortar a las primeras.

3.1.5. Muestra S-5

TABLA V
CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS Y MINERALÓGICAS DE
SEPTARIA MUESTRA S-5

Propiedades	Descripción
Generales: Nivel Macroscópico	La muestra analizada presentó una forma elipsoidal con dimensiones de 12 cm de largo, 10 cm de ancho y 8 cm de alto, con una superficie externa de textura lisa levemente alterada y fracturas de 5 mm, teniendo un color externo marrón oscuro y tonalidades rojizas por partes, rasgo indicativo de procesos de alteración supergénica, además de su alto peso específico y su alta competencia. Nota: La muestra se encontró fracturada.
Matriz: Parte Interna de la Concreción	El núcleo interno de la septaria tiene unas dimensiones de sección de 6 cm de ancho y 5 cm de alto, está compuesto por minerales de depósitos calcarios, como son principalmente; aragonito en un hábito hojoso y ankerita, como presencia secundaria minerales y accesorios comunes como; cuarzo y piritita, presentando además una pátina de hematita, jarosita superficial.
Corteza: Parte externa lisa oscura	La corteza externa está compuesta por ankerita masiva compacta de origen diagenético primario, con cantos redondeados, que no efervescen con ácido clorhídrico en frío, pero sí reacciona con ácido clorhídrico caliente, y con presencia superficial de hematita.
Septos: Fracturas rellenadas	En el relleno de las fracturas se encontró la presencia de carbonatos como calcita y teniendo en la parte externa la presencia de hematita, además se observó que todas tienen un ancho de 5 mm, con un patrón de fracturas poligonales regulares.



Fig. 10 Septaria muestra S-5

Nota. La muestra presenta forma de elipsoide, color oscuro dominante y cierta textura lisa, fracturada.

3.1.6. Muestra S-6

TABLA VI
CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS Y MINERALÓGICAS DE
SEPTARIA MUESTRA S-6

Propiedades	Descripción
Generales: Nivel Macroscópico	La muestra analizada presentó una forma elipsoidal con dimensiones de 18 cm de largo, 16 cm de ancho y 10 cm de alto, con una superficie extremadamente alterada y fracturas de 4 mm ancho, teniendo un color externo marrón oscuro y tonalidades rojizas, negras, verdes y amarillas por partes, rasgo indicativo de procesos de alteración supergénica, además de su alto peso específico. Nota: La muestra se encontró entera, pero con alto grado de alteración
Matriz: Parte Interna de la Concreción	Como la concreción no está fracturada, no se puede observar a detalle la parte interna, pero se asume que es similar a la muestra S-1.
Corteza: Parte externa lisa oscura	La corteza externa está compuesta por goethita, jarosita, limonita y hematita con un fuerte olor a óxido de Fe, al mínimo toque va desprendiéndose.
Septos: Fracturas rellenadas	En el relleno de las fracturas se encontró que sobresalen a la zona de la corteza y tiene una mayor dureza con minerales como calcita, limonita y jarosita, además se observó que todas tienen un ancho de 4 mm, con un patrón de fracturas poligonales regulares.



Fig. 11 Septaria muestra S-6

Nota. La muestra presenta forma de elipsoide, color oscuro dominante y cierta textura terrosa débil y altamente alterada.

3.2. Geología Local Y Contexto De Las Concreciones

El área de estudio se localiza en las inmediaciones del río Crisnejas, en la zona de Aguas Calientes (distrito de Eduardo Villanueva, San Marcos, Cajamarca). La accesibilidad es relativamente buena gracias a la presencia de carreteras que discurren paralelas al cauce fluvial, lo que facilitó el levantamiento geológico sistemático y la toma de puntos de control GPS.

3.2.1. Geomorfología Y Dinámica Fluvial

El río Crisnejas constituye el principal eje de drenaje de la zona, con un régimen hidrológico estacional característico de la región andina. Durante los meses de lluvia de diciembre a abril, el incremento del caudal genera corrientes de turbidez capaces de movilizar material clástico de diversa granulometría, incluyendo bloques de tamaño considerable. En contraste, durante la estación seca de mayo a setiembre, el descenso del nivel de aguas permite la exposición y reconocimiento de depósitos fluviales y coluviales que permanecen sumergidos temporalmente.

Estos depósitos cuaternarios recientes se disponen sobre las unidades más antiguas, fundamentalmente sobre las lutitas negras de la Formación Chicama (Jurásico superior, Titoniano), que constituye el basamento local. La dinámica fluvial del Crisnejas actúa como agente exhumador y transportador de materiales provenientes de esta formación y de otras unidades aflorantes en la cuenca alta. Es importante destacar que las concreciones septarias no se forman en los depósitos cuaternarios, sino que son exhumadas de la Formación Chicama y luego redepositadas por el río, preservando sus texturas primarias debido al transporte corto y de baja energía.

3.2.2. Descripción De Las Concreciones Septarias Halladas

Durante los trabajos de campo se identificaron y georreferenciaron seis ejemplares de septarias (designados S-1 a S-6) en los depósitos fluvio-coluviales adyacentes al cauce del río Crisnejas. A continuación, se describen sus características macroscópicas, con énfasis en las diferencias observadas entre los especímenes.

Morfología externa: Las septarias presentan una morfología subesférica a elipsoidal de dimensiones entre 12 y 18 cm de longitud, con superficies externas notablemente lisas en la mayoría. Esta textura lisa no es producto del transporte fluvial (abrasión mecánica), sino que corresponde a la superficie original de formación diagenética, lo que indica un transporte relativamente corto o de baja energía desde el área fuente (niveles lutáceos de la Formación Chicama).

Diferencias en septos y rellenos minerales: Tras el examen con microscopio estereoscópico y pruebas de efervescencia con HCl diluido (10%) en frío y en caliente, se distinguen tres grupos basados en el patrón de fractura y la potencia de los septos, que reflejan condiciones diagenéticas distintas:

Grupo I (muestras S-1, S-2, S-5, S-6): Presentan septos de potencia notable (3–5 mm de ancho) con un patrón poligonal regular que no intersecta el centro de la concreción. En las muestras menos alteradas (S-1, S-2, S-5), los rellenos están compuestos principalmente por calcita (fuerte efervescencia en frío), ankerita y pirita, en S-5, también por aragonito hojoso. La

corteza externa es de ankerita masiva (efervescencia nula en frío, positiva en caliente), con pátinas superficiales de hematita y jarosita. La muestra S-6, aunque altamente alterada, conserva el mismo patrón poligonal regular (septos de 4 mm). En ella, la corteza original de ankerita se ha descompuesto totalmente por oxidación supergénica, dando lugar a una asociación de goethita, hematita, jarosita y limonita con fuerte olor a óxidos de hierro.

Grupo (muestra S-3): Presenta dos poblaciones de septos: unos principales de 5 mm de ancho con un patrón caótico que converge hacia el centro, y otros secundarios de 2 mm dispuestos transversalmente a los principales sin cortarlos. Los septos principales están rellenos de calcita; los secundarios también contienen calcita, pero con mayor proporción de hematita y jarosita. Esta relación indica dos eventos de fracturación: el primero generó los septos anchos, y el segundo, posterior a la cementación inicial, produjo fracturas más delgadas que no llegaron a cortar a las primarias.

Grupo III (muestra S-4): Es la única septaria que fue partida controladamente para exponer su núcleo interno, debido a su alta dureza y compactación. Presenta septos de escasa potencia que van desde 1.8 mm a 2 mm, y unas más pequeñas de 1 mm a 1.2 mm. El patrón de fractura es caótico, sin organización geométrica definida. Las fracturas más delgadas se disponen transversalmente a las más anchas y no las cortan, sugiriendo también dos eventos de fracturación, pero en un material con diferente reología más plástico. El relleno de los septos está compuesto por caolinita con textura pulverulenta blanquecina con baja dureza, en los bordes, hematita y jarosita. La matriz y la corteza son de ankerita muy rica en hierro (color pardo oscuro a negruzco, efervescencia nula incluso con HCl caliente). El núcleo expuesto contiene feldespatos (albita), biotita, cuarzo y piritita diseminada.

3.2.3. Procedencia Y Contexto Geológico

La atribución de estas septarias a la Formación Chicama se sustenta en los siguientes criterios: el río Crisnejas atraviesa longitudinalmente secuencias de esta formación aguas arriba del área de hallazgo; las lutitas negras de la Formación Chicama, depositadas en un ambiente marino profundo y anóxico durante el Titoniano (Jurásico superior), constituyen el litosoma propicio para la formación diagenética de concreciones carbonatadas; los ejemplares fueron hallados en posición alóctona, removilizados por la dinámica fluvial y depositados sobre los sedimentos cuaternarios que cubren discordantemente a la formación. Sin embargo, su buen estado de preservación y la ausencia de rodamiento intenso apuntan a un área fuente relativamente proximal, probablemente correspondiente a niveles diagenéticamente favorables dentro de la misma Formación Chicama que afloran en las cabeceras o laderas del valle.

Litológicamente, se reconocen lutitas oscuras laminares, de comportamiento deleznable, con intercalaciones subordinadas de areniscas grises a pardas, localmente enriquecidas en material carbonatado. Estas unidades presentan nódulos piritosos dispersos, así como eflorescencias blanquecinas a amarillentas de alumbre, indicativas de procesos de alteración química supergénica. La presencia dominante de minerales carbonatados (ankerita, calcita) en las concreciones refleja las condiciones geoquímicas del depósito original.

IV. DISCUSIÓN

El objetivo general fue determinar las condiciones de formación de las concreciones septarias de la Formación Chicama mediante su caracterización petrológica, mineralógica, litológica y cartográfica en la zona de Aguas Calientes. Los resultados confirman un origen durante la diagénesis temprana en un ambiente marino profundo y anóxico, y revelan una evolución vertical que enriquece los modelos clásicos para concreciones en mudrocks [1,3,6,8].

Sobre la evolución diagenética polifásica se identificaron dos eventos de fracturación en S 3 y S 4. El Grupo I (S 1, S 2, S 5, S 6), con un solo evento, exhibe septos poligonales regulares de 3 a 5 mm rellenos exclusivamente de calcita, lo que indica formación en las capas más superficiales bajo baja presión litostática y esfuerzos uniformes [7]. El Grupo II (S 3) registra un primer evento con septos caóticos de 5 mm cementados por calcita y un segundo con fracturas finas transversales de 2 mm también calcíticas, reflejando una profundidad intermedia con esfuerzos menos homogéneos. El Grupo III (S 4), formado a mayor profundidad durante una deposición violenta en la transición Jurásico-Cretácico [26], presenta septos caóticos de 1 a 2 mm; la rápida compactación restringió la apertura y la difusión iónica [28], y los fluidos silicatados introdujeron feldespatos, micas y silicatos procedentes del Complejo Metamórfico del Maraón, cuya alteración diagenética produjo la caolinita y clorita actuales. En ningún grupo la ankerita, el aragonito ni los óxidos de hierro forman parte del relleno primario: los óxidos derivan de la alteración supergénica tardía de la ankerita de las cortezas, y el aragonito de S 5 está confinado a la matriz.

Sobre el ambiente de formación, las lutitas negras laminadas, la ausencia de estructuras de oleaje, la piritita y los núcleos carbonatados confirman una cuenca profunda y anóxica, con la Formación Chicama como litosoma propicio bajo condiciones reductoras [24,26]. Los feldespatos y micas heredados en S 4 ratifican una fuente proximal proterozoica [25] durante la colmatación de la cuenca, ambiente que favoreció la precipitación de carbonatos autigénicos en los niveles superiores e intermedios y, en las zonas profundas, la inyección de fluidos silicatados con una mineralogía de relleno completamente distinta.

Sobre el control estratigráfico y geomorfológico, la distribución de las concreciones está ligada a niveles específicos de la Formación Chicama, reflejando variaciones en permeabilidad y condiciones geoquímicas locales [13]. La cartografía con puntos GPS confirmó su procedencia de esta unidad y su exhumación por el río Crisnejas, cuya dinámica estacional actúa como agente exhumador y concentrador, preservando las texturas primarias gracias al transporte corto [23,6,28].

V. CONCLUSIONES

La presente investigación desarrollada en el sector de Aguas Calientes, distrito de Eduardo Villanueva, San Marcos, Cajamarca, reconstruyó la historia diagenética de seis concreciones septarias exhumadas por el río Crisnejas y estableció su relación con la Formación Chicama del Jurásico superior en la cuenca sedimentaria jurásica del norte del Perú.

En respuesta a la pregunta sobre sus condiciones de formación, las septarias se originaron durante la diagénesis temprana de lutitas negras en una cuenca marina profunda y anóxica del Titoniano. El ambiente reductor, evidenciado por pirita relicta, facilitó la concentración iónica y la cementación diferencial que dio lugar a tres grupos. El Grupo I (S-1, S-2, S-5, S-6) se formó en los niveles más superficiales del sedimento con esfuerzos uniformes, desarrollando fracturas poligonales regulares de 3 a 5 mm rellenas exclusivamente de calcita precipitada a partir de fluidos carbonatados. El Grupo II (S-3) se originó a profundidad intermedia con esfuerzos menos uniformes, registrando dos eventos de fracturación: los primeros septos de 5 mm con calcita y patrón caótico convergente, y los segundos transversales de 2 mm también calcíticos. El Grupo III (S-4) se formó a la mayor profundidad y en condiciones tectónicas inestables de depositación violenta, donde los esfuerzos no uniformes restringieron las fracturas a 1–2 mm con arreglo caótico; aquí los fluidos introdujeron silicatos, feldespatos y micas como relleno primario, y su alteración diagenética posterior originó la caolinita y clorita observadas.

El objetivo general se cumplió al determinar que las septarias son concreciones diagenéticas autógenas formadas in situ en la Formación Chicama, en una cuenca profunda con sedimentos finos, materia orgánica y condiciones reductoras. La circulación de fluidos y la cementación diferencial fueron los procesos fundamentales, y el ambiente reductor facilitó la precipitación de carbonatos en los Grupos I y II, y de silicatos en el Grupo III.

La caracterización petrológica y mineralógica mostró concreciones elipsoidales de 12 a 18 cm con superficies lisas primarias. Los núcleos de los Grupos I y II contienen calcita, ankerita, cuarzo detrítico y pirita, con aragonito en la matriz de S-5; el núcleo del Grupo III preserva feldespatos, biotita y cuarzo, mientras los septos aparecen con caolinita y clorita

como evidencia de alteración de silicatos. Las cortezas son de ankerita masiva, y la oxidación supergénica posterior generó los óxidos de hierro que tiñen bordes y superficies.

La caracterización litológica confirmó lutitas negras laminadas ricas en materia orgánica en un ambiente anóxico. La cartografía con GPS ubicó los seis ejemplares en depósitos fluvio-coluviales junto al río Crisnejas, concentrados por la exhumación selectiva de la Formación Chicama aguas arriba.

La relación diagenética con la estratigrafía mostró que las septarias son sincrónicas con las lutitas y se formaron durante la diagénesis temprana por sinéresis, antes de la litificación. La variación vertical desde septos poligonales calcíticos superficiales hasta caóticos silicatados profundos evidencia cambios en esfuerzos, fluidos y disponibilidad iónica con la profundidad. Los dos eventos de fracturación en los Grupos II y III indican reactivación de los esfuerzos antes de la consolidación definitiva.

El río Crisnejas demostró ser el principal agente exhumador: las corrientes de turbidez en lluvias movilizan el material, y el estiaje lo expone. Las superficies lisas confirman transporte corto y preservación primaria.

La importancia geológica radica en que las septarias constituyen ventanas excepcionales a los procesos diagenéticos tempranos en cuencas anóxicas. Los tres patrones de fracturación y mineralización (poligonal calcítico superficial, caótico calcítico intermedio, caótico silicatado profundo) reflejan una evolución vertical de esfuerzos y química de fluidos compatible con el modelo de Jacay y Jaillard. Las transformaciones mineralógicas documentadas (ankerita a óxidos por meteorización, silicatos a caolinita-clorita por diagénesis) ofrecen pistas sobre la historia de exhumación y las reacciones fluido-roca. Su asociación con lutitas ricas en materia orgánica las vincula con sistemas petroleros, y fases como el aragonito en S-5 o la caolinita-clorita en S-4 son indicadores sensibles de las condiciones fisicoquímicas de la diagénesis temprana.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios geoquímicos de isótopos estables ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$) en las distintas generaciones de carbonatos, calcita de septos radiales gruesos, aragonito de septos finos, así como análisis de inclusiones fluidas, para precisar temperatura, composición de fluidos y origen del carbono durante los dos eventos de precipitación documentados. Resulta conveniente efectuar dataciones por (U-Th)/He en hematita/goethita en las costras de los óxidos, especialmente en S-6, para establecer la cronología de la oxidación supergénica y su relación con la historia de exhumación regional. Desde la perspectiva mineralógica, se recomienda aplicar difracción de rayos X (DRX) y microscopía

electrónica de barrido (SEM-EDS) en las muestras S-1, S-3, S-4, S-5 y S-6, para confirmar la identificación de ankerita, aragonito, caolinita y clorita, así como caracterizar la zonación química de los cristales; particularmente, investigar mediante DRX de alta resolución y microanálisis (relación Sr/Ca) las condiciones que permitieron la preservación del aragonito en S-5, fase metaestable excepcional en condiciones superficiales. En el ámbito cartográfico, se recomienda extender el mapeo hacia las cabeceras del río Crisnejas para identificar controles estructurales (fallas, diaclasas) que hayan influido en la circulación de fluidos mineralizantes durante la diagénesis temprana. Considerando que todas las muestras se hallaron en posición alóctona, se sugiere ampliar la prospección a lo largo del cauce para localizar septarias en posición autóctona dentro de la Formación Chicama, lo que permitiría precisar el nivel hospedante y la orientación de las fracturas respecto a la compactación. Finalmente, dado el valor científico de estas estructuras como indicadores de diagénesis temprana en cuencas anóxicas y la presencia de mineralogía poco común, se recomienda gestionar ante INGEMMET y el Gobierno Regional de Cajamarca la protección del sector de Aguas Calientes como Lugar de Interés Geológico (LIG), y depositar las muestras S-1 a S-6 en una colección institucional (Universidad Nacional de Cajamarca o INGEMMET) para su preservación y disponibilidad para futuros estudios.

REFERENCIAS

- [1] Pratt, B. R. (2019). Septarian concretions and diagenetic fracturing processes. *Sedimentary Geology*, 389, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.05.001>
- [2] Gaines, R. R., & Vorhies, J. S. (2018). Concretionary growth and paleoenvironmental interpretation: A critical review. *Earth-Science Reviews*, 177, 643–663. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.025>
- [3] Dale, A. W., Boyle, R. A., Lenton, T. M., Ingall, E. D., & Wallmann, K. (2021). Early diagenetic mineralization and fluid flow in septarian concretions: A geochemical model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 305, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.03.021>
- [4] Paxton, J. R., Grossman, E. L., & Joyner, T. A. (2021). Isotope thermometry of septarian concretions: Clumped isotope and fluid inclusion constraints. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 298, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.01.012>
- [5] Molina, J. M., & Reolid, M. (2024). Barite septarian concretions in the Albian (Cretaceous) of the Subbetic (Southern Spain). *Journal of Iberian Geology*, 50(3), 431–448. <https://doi.org/10.1007/s41513-024-00245-3>
- [6] Raiswell, R., & Fisher, Q. J. (2000). Mudrock-hosted carbonate concretions: a review of growth mechanisms and their influence on chemical and isotopic composition. *Sedimentology*, 47(Suppl. 1), 239–251. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00007.x>
- [7] Astin, T. R. (1986). Septarian crack formation in carbonate concretions from shales and mudstones. *Clay Minerals*, 21(4), 617–631.
- [8] Woo, K. S., & Khim, B. K. (2020). Carbonate concretion formation mechanisms and their paleoenvironmental implications. *Marine Geology*, 425, 106185. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106185>
- [9] Oliva-Urcia, B., Soto, R., & Casas, A. M. (2025). Magnetic fabrics in carbonate concretions: Recording compaction and tectonic deformation. *Journal of Iberian Geology*, 51(1), 87–104. <https://doi.org/10.1007/s41513-024-00262-2>
- [10] Bouzouina, A., Mekahli, L., Benhamou, M., & Martire, L. (2024). Barite-bearing septarian concretions from the Upper Cretaceous-Paleocene of the Biban area (north Algeria): Paragenetic sequence and diagenetic implications. *Journal of African Earth Sciences*, 210, 105128. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105128>
- [11] Hesse, R., & Schacht, U. (2019). Concretion formation in mudrocks: Mechanisms, geometry and geochemical signatures. *Geological Society, London, Special Publications*, 484(1), 201–222. <https://doi.org/10.1144/SP484.11>
- [12] Incerpi, N., Manatschal, G., & Martire, L. (2019). Silica-rich septarian concretions in biogenic silica-poor sediments: A marker of hydrothermal activity at fossil hyper-extended rifted margins (Err nappe, Switzerland). *Sedimentary Geology*, 383, 174–190. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.12.003>
- [13] Mozley, P. S., & Burns, S. J. (1993). Oxygen and carbon isotopic composition of carbonate concretions: implications for growth processes. *Journal of Sedimentary Research*, 63(6), 1007–1016. <https://doi.org/10.1306/D4267C92-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- [14] McBride, E. F., Milliken, K. L., & Cavazza, W. (2003). Cementation in carbonate concretions: timing and mechanisms. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3), 401–413. <https://doi.org/10.1306/110702730401>
- [15] Seilacher, A. (2001). Concretion morphologies reflecting diagenetic and depositional environments. *Sedimentary Geology*, 143(1–2), 41–57. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00092-0](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00092-0)
- [16] Marshall, J. D., & Pirrie, D. (2013). Carbonate concretions explained: growth, diagenesis and geochemical signatures. *Earth-Science Reviews*, 120, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>
- [17] Villegas-Lanza, J. C. (2020). *Deformación cortical y potencial sísmico en la zona de subducción del Perú*. Instituto Geofísico del Perú.
- [18] Stern, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 161–206. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082004000200001>
- [19] Isacks, B. L. (1988). Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B4), 3211–3231. <https://doi.org/10.1029/JB093iB04p03211>
- [20] Gobierno Regional de Cajamarca. (2009). *Estudio de geología – ZEE Cajamarca*. Cajamarca: Gobierno Regional de Cajamarca.
- [21] Atlas de Cajamarca. (2010). Geología del departamento de Cajamarca. En *Atlas de Cajamarca*. Gobierno Regional de Cajamarca.
- [22] Reyes Rivera, L. (1980). Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajambamba. *Boletín INGEMMET Serie A*, (31).
- [23] Durán Ramírez, J. C. (2018). *Estudio sedimentológico y estratigráfico de la microcuenca Cochamarca – San Marcos, Cajamarca* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Cajamarca.
- [24] Jaillard, E., Jacay, J., & Enay, R. (2000). *Estratigrafía y sedimentología de las unidades jurásicas de los Andes norperuanos (Cuenca Chicama)*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [25] Machaca, C., Alván, A., & Torres, D. (2021). Proveniencia sedimentaria del Grupo Chicama y la Formación Chimú en el norte peruano. En *XX Congreso Peruano de Geología* (Publicación Especial n.º 15, Boletín SGP, p. 268).
- [26] Jacay, J. P., & Jaillard, E. (1993). Evolución de la cuenca Chicama (Jurásico superior–Cretácico inferior), Andes norperuanos. En *Actas del 2do Simposio Internacional de Geodinámica Andina (ISAG 1993)* (p. 299).
- [27] Hounslow, M. W. (2013). Septarian concretions. En G. Nichols (Ed.), *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks*. Springer.
- [28] Loyd, S. J., & Berelson, W. M. (2016). The modern and ancient record of marine septarian concretions. *Earth-Science Reviews*, 159, 82–103. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.05.006>
- [29] Cruzado Vásquez, G. (2009). *Geología regional de Cajamarca*. Gobierno Regional de Cajamarca.
- [30] Reyes Rivera, L. (1980). *Carta Geológica Nacional – Cajamarca*. INGEMMET.