

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**TESIS**

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FISCOQUÍMICA DE LOS MANTOS DE  
CARBÓN EN EL CENTRO POBLADO EL NARANJO – DISTRITO DE  
CHALAMARCA – PROVINCIA DE CHOTA**

**Para optar el título profesional de:**

**INGENIERO GEÓLOGO**

**Autor:**

**Bach. GUEVARA IDROGO ABSALÓN**

**Asesor:**

**M. Cs. Ing. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO**

**CAJAMARCA, PERÚ**

**2025**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

### - FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador : GUEVARA IDROGO ABSALÓN  
DNI : 73224367  
Escuela Profesional : INGENIERÍA GEOLÓGICA
  
2. Asesor : M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO  
Facultad : INGENIERÍA
  
3. Grado académico o título profesional  
 Bachiller Título profesional  Segunda especialidad  
 Maestro  Doctor
  
4. Tipo de Investigación:  
 Tesis  Trabajo de investigación  Trabajo de suficiencia profesional
  
5. Título de Trabajo de Investigación:  
"CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FISICOQUÍMICA DE LOS MANTOS DE CARBÓN EN EL CENTRO POBLADO EL NARANJO – DISTRITO DE CHALAMARCA – PROVINCIA DE CHOTA"
  
6. Fecha de evaluación: 26 DE ENERO DE 2025
  
7. Software antiplagio:  TURNITIN  URKUND (OURIGINAL) (\*)
  
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 17%
  
9. Código Documento: oid:::3117:423842405
  
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:  
 APROBADO  PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 26/01/2025

	
<hr/> <b>FIRMA DEL ASESOR</b> M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO DNI: 29552145	<hr/> <b>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</b>

Firmado digitalmente por:  
BAZAN DIAZ Laura Sofia  
FAU 20148258601 soft  
Motivo: En señal de conformidad  
Fecha: 26/01/2025 23:10:45-0500



## ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : "CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA DE LOS MANTOS DE CARBÓN EN EL CENTRO POBLADO EL NARANJO – DISTRITO DE CHALAMARCA – PROVINCIA DE CHOTA"

ASESOR : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0161-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 25 de abril de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **veintiocho días del mes de abril de 2025**, siendo las once horas (11:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J – 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.  
Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Secretario : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y FÍSICOQUÍMICA DE LOS MANTOS DE CARBÓN EN EL CENTRO POBLADO EL NARANJO – DISTRITO DE CHALAMARCA – PROVINCIA DE CHOTA", presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica **ABSALÓN GUEVARA IDROGO**, asesorado por el M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 04.00 PTS.  
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11.00 PTS.  
EVALUACIÓN FINAL : 15.00 PTS ..... **QUINCE** (En letras)

En consecuencia, se lo declara **APROBADO** con el calificativo de **QUINCE** acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las **12.00 m** horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.  
Presidente

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Vocal

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.  
Secretario

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.  
Asesor



### EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería Geológica: ABSALÓN GUEVARA IDROGO.

RUBRO	PUNTAJE
	Máximo/Calificación
<b>2. DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA</b>	
2.1. Capacidad de síntesis	4.0
2.2. Dominio del tema	3.0
2.3. Consistencia de las alternativas presentadas	2.0
2.4. Precisión y seguridad en las respuestas	2.0
<b>PUNTAJE TOTAL (MÁXIMO 12 PUNTOS)</b>	<b>11.0</b>

Cajamarca, 25 de abril de 2025

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.  
Presidente

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Vocal

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.  
Secretario

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.  
Asesor



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



**EVALUACIÓN FINAL DE LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.**

Bachiller en Ingeniería Geológica: ABSALÓN GUEVARA IDROGO.

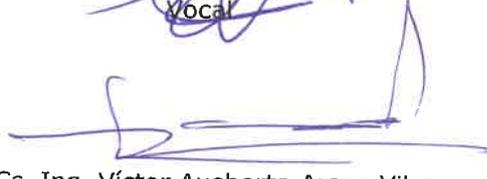
RUBRO	PUNTAJE
A.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PRIVADA	04.00
B.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	11.00
<b>EVALUACIÓN FINAL</b>	
EN NÚMEROS ( A + B )	15.00
EN LETRAS ( A + B )	Quince
- Excelente 20 - 19	BUENO
- Muy Bueno 18 - 17	
- Bueno 16 - 14	
- Regular 13 a 11	
- Desaprobado 10 a menos	

Cajamarca, 25 de abril de 2025

  
Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.  
Presidente

  
Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
Vocal

  
M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.  
Secretario

  
M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.  
Asesor

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecido profundamente con Dios y sus bendiciones, quien me ha otorgado el don de la persistencia, así como la salud necesaria para alcanzar mis metas, además de su infinita bondad y amor, que me han acompañado en cada paso de este camino.

Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Cajamarca, especialmente a la EPIG que me brindó la oportunidad de crecer tanto personal como profesionalmente al abrirme sus puertas y ofrecerme un entorno propicio para mi desarrollo.

Mi más sincero agradecimiento también va dirigido al M. Cs. Ing. Arapa Vilca, Victor Ausberto, mi asesor, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental para la realización de esta investigación. Su guía y dedicación me han inspirado a dar lo mejor de mí y a perseverar en la búsqueda del conocimiento.

## **DEDICATORIA**

Quiero expresar mi profunda gratitud a mis padres, María Emelina y José Fredesvindo. De ellos aprendí la invaluable lección de no rendirme, sin importar cuán difíciles sean los obstáculos. Son y siempre serán mi principal fuente de motivación, por el sacrificio, perseverancia y dedicación que me han brindado.

A mis queridos hermanos, David Esaú, James y Bety, les debo un agradecimiento especial. Su apoyo incondicional ha sido un pilar fundamental. Mi familia ha sido primordial en mi vida, proporcionándome el amor y el apoyo necesarios para seguir adelante luchando por mis sueños y metas.

## CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE ABREVIATURAS .....	viii
LISTA DE TABLAS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE IMÁGENES .....	xi
LISTA DE FOTOS .....	xii
LISTA DE PLANOS .....	xv
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO II .....	4
MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 ANTECEDENTES .....	4
2.1.1 Antecedentes Internacionales .....	4
2.1.2 Antecedentes Nacionales .....	5
2.1.3 Antecedentes Locales .....	6
2.2 BASES TEÓRICAS .....	7
2.2.1 Diagénesis .....	7
2.2.2 Génesis de los yacimientos de carbón .....	9
2.2.3 Tectónica .....	10
2.2.4 La deformación de los mantos de carbón .....	11
2.2.5 Implicación de la deformación de las capas en la interpretación geológica .....	16
2.2.6 Estratigrafía de los mantos de carbón .....	19
2.2.7 Rango del carbón .....	21
2.2.7.1 Fase bioquímica .....	22

	Pág.
2.2.7.2 Fase geoquímica .....	24
2.2.8 Métodos estandarizados de clasificación de carbones.....	27
2.2.8.1 Normas ASTM.....	27
2.3 Definición de Términos Básicos.....	29
CAPÍTULO III .....	31
MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	31
3.1.1 Geográfica .....	31
3.1.2 Política.....	31
3.2 ACCESIBILIDAD.....	32
3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	32
3.3.1 Tipo, Diseño y Método de Investigación.....	32
3.3.2 Población de Estudio .....	33
3.3.3 Muestra .....	33
3.3.4 Unidad de Análisis.....	33
3.3.5 Definición de Variables .....	33
3.4 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	34
3.5 EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	34
3.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.....	37
3.7 MARCO GEOLÓGICO .....	38
3.7.1 Geología Local .....	38
3.7.1.1 Grupo Goyllarisquizga .....	38
3.7.1.1.1 Formación Chimú (Ki- chi) .....	38
3.7.1.1.2 Formación Santa (Ki- sa).....	40
3.7.1.1.3 Formación Carhuaz (Ki- ca).....	41
3.7.1.1.4 Formación Farrat (Ki- fa) .....	41

	Pág.
3.8 GEOMORFOLOGÍA .....	42
3.8.1 Unidades Geomorfológicas .....	42
3.8.1.1 Valle fluvial.....	43
3.8.1.2 Cerro estructural .....	43
3.8.1.3 Abanico Aluvial .....	44
3.8.2 Unidades Morfogenéticas .....	45
3.8.2.1 Planicies.....	45
3.8.2.2 Lomadas .....	46
3.8.2.3 Laderas .....	47
3.8.2.4 Escarpas .....	48
3.9 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	49
3.9.1 Anticlinal .....	50
3.9.2 Falla Inversa .....	51
3.10 DESCRIPCIÓN PETROMINERALÓGICA .....	53
3.10.1 Muestra N° 01.....	54
3.10.2 Muestra N° 02.....	55
3.10.3 Muestra N° 03.....	56
3.10.4 Muestra N° 04.....	57
3.11 MANTOS DE CARBÓN EN LA FORMACIÓN CHIMÚ.....	58
3.12 MUESTREO.....	61
3.13 TRABAJO DE LABORATORIO .....	64
3.13.1 Humedad.....	65
3.13.2 Determinación de cenizas .....	65
3.13.3 Determinación de materia volátil .....	67
3.13.4 Determinación de azufre.....	68
3.13.5 Determinación de poder calorífico .....	69

	Pág.
CAPÍTULO IV .....	70
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	70
4.1 RESULTADOS .....	70
4.1.1 Análisis de la geología local y proceso sedimentario .....	70
4.1.2 Génesis de los mantos de carbón .....	71
4.1.3 Petromineralogía y estratigrafía de los mantos de carbón .....	71
4.1.4 Análisis cinemático estructural .....	72
4.1.5 Análisis de muestras de laboratorio .....	73
4.2 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS .....	77
CAPÍTULO V .....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	78
5.1 CONCLUSIONES .....	78
5.2 RECOMENDACIONES .....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80
ANEXOS .....	85
ANEXO 01: RESULTADOS DE LABORATORIO .....	85
ANEXO 02: PLANOS .....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	: American Society for Testing and Materials
%	: Porcentaje
C	: Cota
°C	: Grados centígrados
cm	: Centímetros
E	: Este
Fm	: Formación
Ki-ca	: Cretácico Inferior, Formación Carhuaz
Ki-chi	: Cretácico Inferior, Formación Chimú
Ki-fa	: Cretácico Inferior, Formación Farrat
Ki-sa	: Cretácico Inferior, Formación Santa
GPS	: Global Positioning System
Km	: Kilómetro
m	: Metros
$m^2$	: Metro cuadrado
msnm	: Metros sobre el nivel del mar
NE	: Noreste
NO	: Noroeste
O	: Oeste
Pág.	: Página
SE	: Sureste
SO	: Suroeste
UTM	: Universal Transversal de Mercator
WGS-84	: World Geodetic System 1984

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Clasificación de carbones por rango (%m: Porcentaje en masa, bs1mm: Base seca libre de materia mineral, bhlmm: Base húmeda libre de materia mineral).....	25
Tabla 2: Clasificación general del carbón mineral, según norma ASTM D388-12.....	29
Tabla 3: Ubicación geográfica de la investigación. ....	31
Tabla 4: Accesibilidad al proyecto de investigación .....	32
Tabla 5: Clasificación y Tipo de Investigación. ....	33
Tabla 6: Definición de variables .....	33
Tabla 7: Descripción y clasificación de la muestra N° 01.....	54
Tabla 8: Descripción y clasificación de la muestra N° 02.....	55
Tabla 9: Descripción y clasificación de la muestra N° 03.....	56
Tabla 10: Descripción y clasificación de la muestra N° 04.....	57
Tabla 11: Ubicación de las muestras extraídas de los mantos de carbón, para su posterior análisis en laboratorio.....	64
Tabla 12: Resultados de los análisis en laboratorio de las muestras de carbón para los parámetros de contenido de humedad, porcentaje de azufre, poder calorífico, porcentaje de ceniza y sustancias volátiles.....	74

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Rangos de profundidad y temperatura de los procesos diagenéticos.....	8
Figura 2: Proceso de formación y evolución del carbón. ....	8
Figura 3: Modelo tradicional que muestra a los ciclotemas y depósitos pensilvánicos de carbón de la Cuenca de Illinois, EUA.....	10
Figura 4: Medida microscópica de la reflectancia relativa de macerales de vitrinita (Ro) en comparación con el contenido de carbono fijo, materia volátil, humedad y generación de gas/aceite. ....	23
Figura 5: Esquema de clasificación de los carbones, según su porcentaje de abundancia y aplicación final. ....	27
Figura 6: Se observa que todas las 06 muestras cumplen con el criterio de clasificación por rangos como antracita según ASTM D388, al hacer un análisis comparativo del poder calorífico, contenido de carbono fijo y las sustancias volátiles se verifica que cumplen los parámetros establecidos y que son mayor a 6900 Kcal/Kg y menor a 8% de sustancias volátiles.....	74

## LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1: Se observa que el carbón se depositó en areniscas cuarzosas de la Formación Chimú, en un ambiente de sedimentación regresivo, en un sistema deltaico se evidencia secuencias geométricas de formas lenticulares, sus dimensiones laterales son reducidas sus capas lisas y astillosas, con bandas mates y brillosas, distrito de Pedro Gálvez – San Marcos. ....	12
Imagen 2: Manto de carbón desplazado por dos fallas de cabalgamiento, yacimiento de Samacá – Colombia. ....	13
Imagen 3: Manto de carbón asociado a otro manto pequeño acompañante, en un doblamiento anticlinal parcialmente expuesto, yacimiento de Samacá – Colombia. ....	14
Imagen 4: Vista de los mantos de carbón de la Imagen 3, localizados en el flanco opuesto del anticlinal, yacimiento de Samacá – Colombia. ....	15
Imagen 5: Detalle de la falla inversa ubicada en la parte izquierda, expuesta en la Imagen 2, yacimiento de Samacá – Colombia. ....	17
Imagen 6: Detalle de la falla inversa ubicada en la parte derecha expuesta en la Imagen 2, yacimiento de Samacá – Colombia. ....	18
Imagen 7: Sección transversal esquemática que muestra la variación vertical y lateral del depósito de carbón del Carbonífero Tardío Pérmico Temprano, el cuadro rosa representa las muestras de carbón en pozos, en el yacimiento de Anhe al Norte de China. ....	20
Imagen 8: Muestras de carbón en sus diferentes rangos de madurez. ....	26
Imagen 9: Instrumentos de Recolección de Datos. ....	35
Imagen 10: Materiales de Recolección de Datos. ....	36
Imagen 11: Instrumentos de Procesamiento de Datos. ....	37

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1: Se evidencia el relieve de las rocas sedimentarias en el Centro Poblado El Naranjo, al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo aguas abajo (E: 781606, N: 9272144, C: 2180msnm). .....	38
Foto 2: Se observa el afloramiento de la Formación Chimú con intercalación de areniscas cuarzosas, arcillitas y mantos de carbón al margen izquierdo de la carretera con dirección al Norte, en el lugar denominado La Curva (E: 781933, N: 9273918, C: 2053msnm). .....	39
Foto 3: Se evidencia fósiles de plantas en arcillitas de la Formación Chimú, siendo los mejores indicadores de las facies de una roca y fundamental para su datación (E: 781637, N: 9272260, C: 2138msnm). .....	39
Foto 4: Se observa el afloramiento de la Formación Santa con intercalación de arcillitas grises, limolitas y areniscas de estratificación delgada, suprayace a la Formación Chimú e infrayace a la Formación Carhuaz, se encuentra al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo aguas abajo (E: 781350, N: 9272382, C: 2138msnm). .....	40
Foto 5: Se observa el afloramiento de la Formación Carhuaz que consiste en areniscas rojizas intercalado con arcillitas grises al este del Campo Santo El Naranjo (E: 780911, N: 9273247, C: 2172msnm).....	41
Foto 6: Se evidencia los estratos de la Formación Farrat que consta de areniscas blanquecinas al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo, aguas abajo (E: 780770, N: 9272604, C: 2174msnm). .....	42
Foto 7: Se observa valle en forma de V en rocas de la Formación Chimú a lo largo del río Cuchac aguas abajo (E: 781337, N: 9274059, C: 2101msnm). .....	43
Foto 8: Cerros estructurales de grandes elevaciones conformadas por rocas del Grupo Goyllarisquizga, a lo largo de la quebrada Hualgayo (E: 781122, N: 9272425, C: 2324msnm). .....	44
Foto 9: Abanico aluvial formado en la parte baja del afloramiento de la Formación Chimú, al margen izquierdo del río Cuchac aguas abajo (E: 780763, N: 9273860, C: 2187msnm). .....	45
Foto 10: Planicies formadas en depósitos fluvio-aluviales a la margen derecha del río Cúchac aguas abajo (E: 780841, N: 9273786, C: 2126msnm). .....	46

Foto 11: Lomada conformada por afloramientos del Grupo Goyllarisquizga con inclinación de 12° al este del cerro denominado Saltur (E: 780865, N: 9273724, C: 2204msnm). .....	47
Foto 12: Se observa laderas pronunciadas, con pendientes que oscilan entre los 20° y los 50°, son comunes en esta área y están mayormente vinculadas con actividad tectónica, se encuentra al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo aguas abajo (E: 781350, N: 9272505, C: 2313msnm).....	48
Foto 13: Se observa escarpas bien pronunciados del Grupo Goyllarisquizga al margen derecho del río Cuchac aguas abajo (E: 781604, N: 9273734, C: 2137msnm).....	49
Foto 14: Anticlinal local en areniscas, arcillitas y mantos de carbón de la Formación Chimú, al margen derecho del río Llaucano aguas abajo (E: 782082, N: 9272217, C: 2003msnm). .....	50
Foto 15: Se observa una falla con movimiento compuesto inversa dextral, que afecta al Grupo Goyllarisquizga a lo largo de la quebrada Hualgayo (E: 781399, N: 9272308, C: 2198msnm). .....	52
Foto 16: Estrías de falla .....	52
Foto 17: Estrías de falla .....	52
Foto 18: Pliegues de arrastre formados previos a la formación de la falla normal, son indicadores cinemáticos que evidencian el movimiento de los bloques producto de las fuerzas tectónicas (E: 781525, N: 9272445, C: 2215msnm).....	53
Foto 19: Se observa mantos de carbón en la parte inferior de la Formación Chimú, en la parte superior se caracteriza por las arcillitas grises y areniscas cuarzosas, al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo (E: 781627, N: 9272342, C: 2168msnm). .....	58
Foto 20: Se observa carbón tipo bituminoso que ha sido contaminado por arcillas transportadas, así como por la formación de óxidos resultado de procesos de precipitación química, al margen izquierdo de la carretera con dirección al norte, en el lugar denominado La Curva (E: 781814, N: 9273582, C: 2075msnm).....	59
Foto 21: Se observa capas delgadas de carbón plegadas, lisas y astillosas, con bandas mates y brillosas, en un ambiente de sedimentación regresivo, al margen izquierdo de la carretera con dirección al norte, en el lugar denominado La Rangra (E: 781797, N: 9273612, C: 2070msnm). .....	60

Foto 22: Se evidencia que el manto de carbón presenta en algunas partes forma lenticular, con superficies mates y brillantes, característico de sistemas deltaicos donde la materia orgánica se entierra y sufre procesos de diagénesis extrema, dando lugar a la formación de antracita, en la labor El Shala (E: 781657, N: 9272115, C: 2174msnm). .....	60
Foto 23: Se puede observar el paralelismo de los planos de estratificación del manto de carbón de 1.80m de espesor con arcillitas y areniscas cuarzosas, este tipo de formación con origen de plegamientos es probablemente de origen tectónico, en la labor El Zorro (E: 781600, N: 9272153, C: 2170msnm). .....	61
Foto 24: A: Bocamina El Zorro. B: Se realizó el reconocimiento de la labor, hastial izquierdo con puntal de madera. C: Caracterización petromineralógica en interior mina, entrando al hastial izquierdo (E: 781603, N: 9272149, C: 2069msnm). .....	62
Foto 25: Observación, descripción y muestreo por canal de los mantos de carbón en interior de la mina El Zorro (E: 781603, N: 9272149, C: 2069msnm).....	63
Foto 26: Se observa una sección detallada de 1.80 m x 2 m de los mantos de carbón al interior de la mina El Zorro, sección que varía de acuerdo a las condiciones del terreno; entrando en el hastial izquierdo (E: 781603, N: 9272149, C: 2069msnm). .....	63
Foto 27: Se evidencia las 06 muestras representativas extraídas de diferentes puntos de los mantos de carbón, con su respectiva codificación para su rápida identificación. ....	64

## **LISTA DE PLANOS**

- P-01 Plano de Ubicación
- P-02 Plano de Accesibilidad
- P-03 Plano Topográfico - Modelo Digital de Elevaciones MDE
- P-04 Plano Geológico
- P-05 Sección Geológica A-A'
- P-06 Sección Geológica B-B'
- P-07 Secuencias sedimentarias del carbón en la Formación Chimú
- P-08 Columna Estratigráfica

## RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en el Centro Poblado El Naranjo, Distrito de Chalamarca, Provincia de Chota, donde afloran rocas sedimentarias del Grupo Goyllarisquizga del Cretácico Inferior, destacando la Formación Chimú con cinco mantos de carbón, de los cuales dos son viables para explotación económica con espesores de 1.80 m y 0.90-1.00 m que presentan características dentro de los parámetros de antracita, lo que indica un origen singenético, debido al paralelismo de estos con la roca encajonante, asimismo; es notable la influencia de la tectónica para la formación de las turberas que dieron origen al carbón, de la misma manera la diagénesis generada por los procesos orogénicos influyeron en la geología estructural. Se realizaron estudios de campo, cartografiado geológico y análisis de laboratorio de seis muestras de carbón. Por lo que el análisis cinemático estructural muestra las estructuras tectónicas, como el anticlinal local y fallas normales e inversas, que han afectado la disposición y geometría de los mantos, concentrando los recursos en zonas específicas, influenciados por un régimen tectónico mixto de compresión y extensión, típico del Ciclo Andino. Los resultados de laboratorio de las muestras indican una clasificación antracítica, de acuerdo con las tablas y parámetros de clasificación de las normas ASTM D388. El poder calorífico de las muestras es mayor que 6900 Kcal/kg, mientras que las sustancias volátiles y el contenido de azufre son bajos, lo que favorece su uso industrial y reduce las emisiones contaminantes.

**Palabras clave:** Mantos de carbón, génesis del carbón, poder calorífico, tectonismo, análisis cinemático, grado de metamorfismo.

## ABSTRACT

This research was developed in the El Naranjo Population Center, Chalamarca District, Chota Province, where sedimentary rocks of the Goyllarisquizga Group of the Lower Cretaceous outcrop, highlighting the Chimú Formation with five coal seams, of which two are viable for economic exploitation with thicknesses of 1.80 m and 0.90-1.00 m that present characteristics within the anthracite parameters, indicating a syngenetic origin, due to the parallelism of these with the enclosing rock, likewise; the influence of tectonics is notable for the formation of peat bogs that gave rise to coal, in the same way the diagenesis generated by orogenic processes influenced the structural geology. Field studies, geological mapping and laboratory analysis of six coal samples were carried out. The structural kinematic analysis shows that tectonic structures, such as the local anticline and normal and reverse faults, have affected the arrangement and geometry of the mantles, concentrating the resources in specific areas, influenced by a mixed tectonic regime of compression and extension, typical of the Andean Cycle. The laboratory results of the samples indicate an anthracitic classification, according to the classification tables and parameters of ASTM D388 standards. The calorific value of the samples is greater than 6900 Kcal/kg, while the volatile substances and sulfur content are low, which favors their industrial use and reduces polluting emissions.

**Keywords:** Coal seams, coal genesis, calorific value, tectonism, kinematic analysis, degree of metamorphism.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

El carbón recurso energético no renovable, se caracteriza porque representa una fuente fiable de energía, y que, además es una actividad económica importante para diversos poblados siendo fundamental en la generación de empleos en nuestro país. El origen y la composición se encuentra relacionado con la diagénesis considerando presión, temperatura y tiempo geológico; y eventos que contribuyen a la erosión, transporte y sedimentación, en la cual se ve intervenida la presencia de materia orgánica. Por lo que, es fundamental conocer sus características petromineralógicas y fisicoquímicas para establecer parámetros de calidad ya que es un factor clave en la competencia en los mercados nacionales e internacionales; esto se hace siguiendo manuales de procedimientos y normas técnicas como ASTM. Sin embargo, en los mantos de carbón en el Centro Poblado El Naranjo se desconocen dichos parámetros que en conjunto definen el rango del carbón, de modo que su precio es por volumen y no por calidad, por ese motivo el análisis de los estudios desde un enfoque geológico y fisicoquímico generan datos originales proporcionando las bases para futuras investigaciones; en este sentido la investigación tendrá un significativo aporte para el conocimiento, desarrollo y apertura de nuevas labores subterráneas a futuro en la localidad.

Por ello debemos formularnos la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las características geológicas y fisicoquímicas de los mantos de carbón en el Centro Poblado El Naranjo, distrito de Chalamarca, provincia de Chota? La misma que es respondida por la siguiente hipótesis: las características geológicas y fisicoquímicas de los mantos de carbón en el Centro Poblado El Naranjo, distrito de Chalamarca, Provincia Chota, está relacionado con la génesis considerando parámetros fundamentales como presión, temperatura y tiempo geológico a la que fue sometida la materia orgánica, de modo que, estas condiciones determinan el grado de metamorfismo, dando como resultado varios tipos de carbón diferenciados por intervalos de características fisicoquímicas; teniendo en cuenta procesos

geodinámicos como erosión, transporte, sedimentación y fuerzas tectónicas que actuaron sobre la superficie terrestre en el proceso de orogénesis, modelando las estructuras geológicas y permitiendo el emplazamiento del carbón en formaciones singénicas del Cretácico Inferior tomando como evidencia el paralelismo de sedimentación a la roca encajonante.

La presente investigación se realiza con la finalidad de contribuir en el mejor entendimiento e interpretación de la geología, a través de una caracterización petromineralógica de los mantos de carbón en el Centro Poblado El Naranjo, como también es fundamental conocer sus propiedades fisicoquímicas, de manera que se pueda identificar las impurezas que presenta y proporcionar un panorama general del tratamiento a efectuar con el propósito de elevar el potencial económico y comercial. Además, no se cuenta con estudios específicos dedicados a la caracterización geológica y fisicoquímica, por lo que los resultados favorecerán de gran manera a las empresas mineras no metálicas dedicadas a la explotación y comercialización de carbón antracítico. Del mismo modo, es importante para futuros estudios relacionados con la búsqueda de yacimientos favorables para la explotación y aprovechamiento de reservas de este mineral energético en el área de influencia.

Tiene como objetivo general, caracterizar la geología y fisicoquímica de los mantos de carbón en el Centro Poblado El Naranjo, distrito de Chalamarca, provincia de Chota, y como objetivos específicos: realizar cartografiado geológico y levantamiento de columnas estratigráficas, describir las características petromineralógicas del carbón, y analizar muestras de carbón mediante técnicas analíticas normalizadas por ASTM.

La investigación se realizó en el Centro Poblado El Naranjo, Distrito: Chalamarca, Provincia: Chota, Departamento: Cajamarca. Se desarrolló entre los meses de noviembre de 2023 hasta agosto de 2024.

El contenido de los capítulos está organizado de la siguiente manera: en el primero se describe la introducción, donde se plasma el contexto general, problemática, hipótesis, alcance, justificación, así como los objetivos e importancia de la misma; el segundo capítulo comprende, el marco teórico en el que se citan las principales investigaciones a nivel internacional, nacional y local, bases teóricas de diferentes autores, y definición de términos básicos que serán utilizados; el tercer capítulo hace referencia a, materiales y métodos donde se describe la ubicación del área de estudio, accesibilidad, el procedimiento de la

investigación, metodología, técnicas y variables de investigación, equipos y materiales usados a lo largo del desarrollo, geología local, geología estructural, mantos de carbón de la Formación Chimú, geomorfología, muestreo, laboratorio; en el cuarto capítulo se presenta el análisis y discusión de resultados realizado con los datos obtenidos en campo, gabinete y laboratorio y los resultados a los que se ha llegado con esta investigación, así como contrastación de la hipótesis; y en el quinto capítulo muestra las conclusiones para cada objetivo planteado y recomendaciones obtenidas para seguir ampliando los conocimientos sobre la investigación; al final se anexaran los planos, secciones y los resultados obtenidos de laboratorio.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES**

##### **2.1.1 Antecedentes Internacionales**

**Cely (2016).** En su tesis denominada Caracterización geológica y fisicoquímica de los carbones explotados por la empresa Intercarbon Mining S.A.S., caracterizó 11 mantos en total mostrando y analizando sus principales características en cuanto a respaldos, destino y utilización del carbón que se extrae de cada uno de ellos. En el laboratorio realizó ensayos reológicos y petrográficos conociendo sus características aglomerantes y coquizantes de cada uno de los mantos con su respectivo análisis. En los ensayos petrográficos identificó los vitrinoides presentes en cada uno de los mantos, encontrando cualidades coquizantes por su alto contenido de vitrinita y bajos contenidos de exinita o liptinita la que indica su contenido en materia volátil.

**Deschamps (2017).** En su artículo denominado Los estratos carboníferos del Grupo Mannville del Cretácico Inferior (cuenca sedimentaria canadiense occidental, centro sur de Alberta). Parte 1: Arquitectura estratigráfica y factores de control de la distribución del carbón, este estudio tiene como objetivo reconstruir la arquitectura estratigráfica de los depósitos del Grupo Mannville que contienen carbón en el subsuelo (Cretácico Inferior, Cuenca Sedimentaria del Oeste de Canadá, Sur y Centro de Alberta), para caracterizar la ocurrencia de estratos de carbón dentro de este intervalo, centrándose en su geometría, extensión y distribución.

**Vite (2018).** En su tesis denominada Caracterización fisicoquímica de los mantos de carbón de San Javier y Tecoripa, Sonora, México, clasifica al carbón por rangos, asignando el rango de meta-antracita al que contiene menor cantidad de materia volátil pero mayor poder de calentamiento y carbono fijo; lo cual, la caracterización le permitió sugerir usos como: Energético para calderas en centrales eléctricas; producción de gas para alumbrado o gas para plantas eléctricas de subestación, industria siderúrgica para fundiciones ferrosas y no ferrosas y otros usos alterativos son: filtros de agua y como generadores de vapor (saunas, baños turcos y piscinas temperadas).

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

**Arana (2018).** En su tesis denominada Selección y aplicación del método de explotación del carbón en el manto Chimú – La Libertad Black Hill Company S.A.C., logró caracterizar los aspectos petrográficos, geomecánicos y geoquímicos de los carbones de la formación Chimú en la cuenca Chicama - Sector NW, en la que demostró la existencia de mantos de carbón, así como, pudo controlar las corridas de carbón originadas por la intercalación de panizo presente en la estructura carbonosa.

**Figuroa (2022).** En su tesis denominada Incremento de producción de carbón mediante el diseño y aplicación del método inclinados y subniveles en Unidad Minera Pampahuay de Obras Civiles y Mineras S.A.C., caracterizó la geología de los mantos de carbón para determinar el método más óptimo de producción concluyendo que la explotación de las reservas de carbón en la Unidad Minera Pampahuay de Obras Civiles y Mineras S.A.C será realizado de acuerdo al Plan de Minado diseñando el método de explotación de Inclinados y Subniveles con sostenimiento de cuadros de madera.

**Montes (2019).** En su tesis denominada Métodos de explotación del carbón para optimizar la producción en la concesión minera Acumulación Oyón 1 - Lima 2018, caracterizó y comprobó mediante los estudios realizados que el carbón bituminoso de la Concesión minera Acumulación Oyón 1, es apto para la industria cementera, de igual forma para la fabricación de coque siderúrgico de alta calidad. Por su composición tendría buenas posibilidades de comercializarse a nivel internacional como ingrediente en mezclas de coquificación, cabe mencionar que el material bituminoso de menor volátil es el componente de mayores escases y el que tiene mejor cotización en el mercado internacional, para esto se tendría que realizar una operación a gran escala.

**Quijandría (2017).** En su tesis denominada Evaluación del carbón mineral, para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad; concluyó que el carbón es un compuesto orgánico de gran utilidad para la generación de energía eléctrica y la fabricación de acero a partir de minerales de hierro. Sin embargo, es un compuesto que contiene impurezas, como el azufre, que desde el punto de vista ambiental y económico es necesario reducir.

**Ricapa (2022).** En su tesis denominada Explotación y extracción de carbón antracita en el distrito de Huaranchal, Provincia de Otuzco Región la Libertad, determinó los parámetros fijos y la factibilidad del desarrollo y explotación del Prospecto Minero de Carbón “Agujeros Negros”; además caracterizó la geología, topografía, trabajo físico de trincheras y/o calicatas lo que llevó a conocer más la geología local del depósito de carbón y su situación actual, concluyendo que es viable su realización tanto técnicamente como económicamente.

### **2.1.3 Antecedentes Locales**

**Infante (2019).** En su tesis denominada Evaluación del método de explotación en la extracción de carbón de piedra en la mina Tuco – Bambamarca; concluyó que el poder calorífico del carbón es de 6240 kcal/Kg, un porcentaje de azufre que no es perjudicial para el medio ambiente de 0,22 % y un 10,4 % de cenizas por lo que su valor en el mercado es de 170 soles por tonelada de Carbón.

**Mantilla (2022).** En su tesis denominada Geología estructural y su relación con los mantos de carbón en el distrito de Pedro Gálvez y alrededores, de la provincia de San Marcos, concluyó que los mantos de carbón corresponden a un origen singenético por encontrarse en secuencia con los estratos de las rocas encajonantes de la Formación Chimú las que pertenecen al Grupo Goyllarisquizga del Cretácico inferior; además que, los mantos existentes han sido afectados por las estructuras geológicas generadas por el tectonismo, asimismo la disposición del yacimiento se ve afectado por los desplazamientos en la zona de fallas y plegamientos.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 Diagénesis**

Se denomina diagénesis a los cambios físicos y químicos que alteran las características de los sedimentos después de la deposición (Milliken, 2003).

En la diagénesis, la materia orgánica producto de los restos vegetales sedimentados en lugares cercanos a pantanos, humedales o sitios con aguas ácidas, y con poca profundidad, es atacada por bacterias aeróbicas provocando una descomposición parcial, la cual finaliza una vez estas bacterias consumen todo el oxígeno presente. Justo en este instante, se inicia una descomposición de la materia orgánica por acción de bacterias anaeróbicas, en este proceso se producen ácidos húmicos que acidifican el medio hasta provocar la desaparición de las bacterias, y es allí donde se forma la turba (Altamirano, 2008).

Estos procesos ocurren a temperaturas relativamente bajas, por lo general por debajo de aproximadamente 250 °C, y en profundidades de hasta aproximadamente 5 km. Existe una continuidad entre la diagénesis y el metamorfismo, este último se considera como aquellos procesos que ocurren a temperaturas más altas (generalmente por encima de 250 °C o 300 °C). (Nichols, 2009) (Ver Figura 1).

En el metamorfismo se desarrolla de forma óptima la carbonización, proceso en el cual la materia orgánica aumenta sus niveles de carbono y su rango, por medio de un incremento en la temperatura y la presión del medio. Por tanto, sobre la turba se va acumulando materia orgánica, que con el paso del tiempo genera más turba permitiendo aumentar la temperatura y la presión en las capas inferiores, liberando gases, sustancias volátiles y aceites que enriquecen cada vez más en carbono; de esta forma se atribuye a la evolución de la turba en lignito, hulla y antracita (Altamirano, 2008). Del mismo modo, el rango de los mantos de carbón aumenta generalmente de carbones sub-bituminosos, bituminosos alto volátil, semi antracita y antracita (Rojas, 2022).

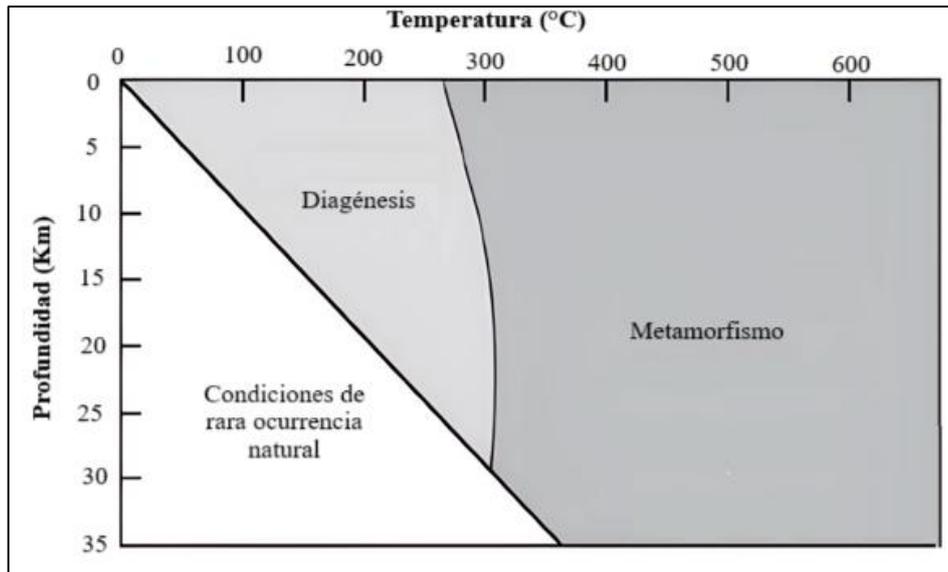


Figura 1: Rangos de profundidad y temperatura de los procesos diagenéticos.  
Fuente: Nichols, 2009.

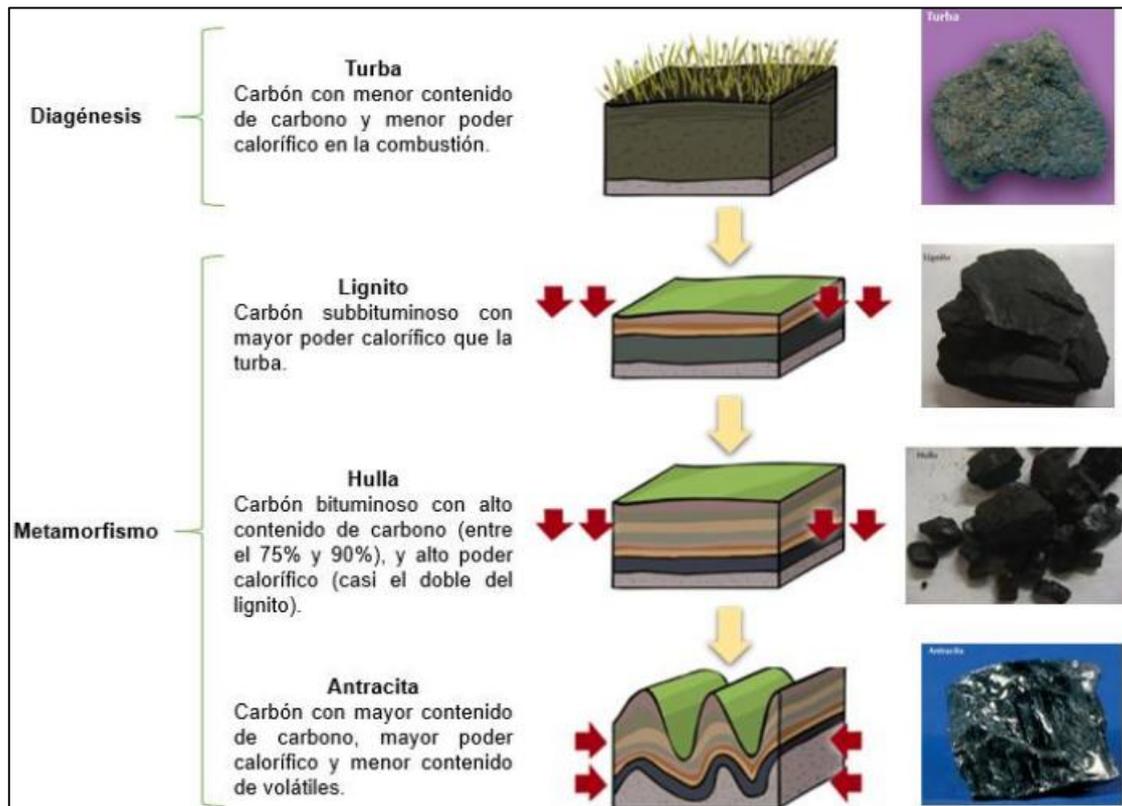


Figura 2: Proceso de formación y evolución del carbón.  
Fuente: Modificado de Ospino, 2016.

### **2.2.2 Génesis de los yacimientos de carbón**

El carbón proviene de restos de vegetación formados en tiempos geológicos, que originalmente se acumularon como plantas en pantanos o fueron depositados en lagunas. La acumulación de limos y otros sedimentos, junto con movimientos en la corteza terrestre (movimientos tectónicos) enterraron estos pantanos y turberas, en algunos casos a una gran profundidad. A medida que iban quedando enterradas, las plantas fueron sometidas a elevadas temperaturas y presiones, las cuales causaron cambios físicos y químicos en la vegetación, transformándolas, con el correr de los tiempos en carbón. Inicialmente, la turba, precursora del carbón, fue convertida en lignito o carbón pardo, que son tipos de carbón con "madurez" orgánica baja. Luego de muchos millones de años, la continuidad de los efectos de la temperatura y presión, produjeron cambios adicionales en el lignito, incrementando progresivamente su madurez y transformándolo al rango conocido como carbones sub bituminosos. Cuando este proceso sucedió, una serie de cambios químicos y físicos provocaron que el carbón se volviera más duro y maduro, punto en el cual se le clasifica como bituminoso o carbón duro (Compañía Carbonífera San Pedro de Catamutún, 2012).

La acumulación de turba se lleva a cabo in situ, en el propio medio de vida de las plantas como deltas, estuarios o albuferas y, muy pocas veces, por transporte en medios distintos al de formación. Estas características permiten diferenciar los carbones autóctonos, formados en el propio ecosistema, y los carbones alóctonos, formados en un medio diferente al ecosistema original, por lo que la materia vegetal ha sufrido un transporte más o menos largo. Según el medio de formación, también es posible diferenciar entre los carbones húmicos, formados en medios lacustres, y parálicos, formados en ambientes transicionales como deltas, estuarios o lagunas (Sánchez, 2005).

El grado de "metamorfismo o carbonización" a la que fue sometido el carbón, desde su forma de turba a antracita, tiene una importante relación con sus propiedades físicas y químicas y es lo que se conoce como el "rango" del carbón. Los carbones de bajo rango, tales como el lignito y los sub bituminosos son típicamente más blandos, fácilmente desmenuzables, opacos y con apariencia de tierra; se caracterizan por tener altos niveles de humedad y bajo contenido de carbono, y, por consiguiente, poca energía. Los carbones de alto rango son típicamente más duros y resistentes (Compañía Carbonífera San Pedro de Catamutún, 2012).

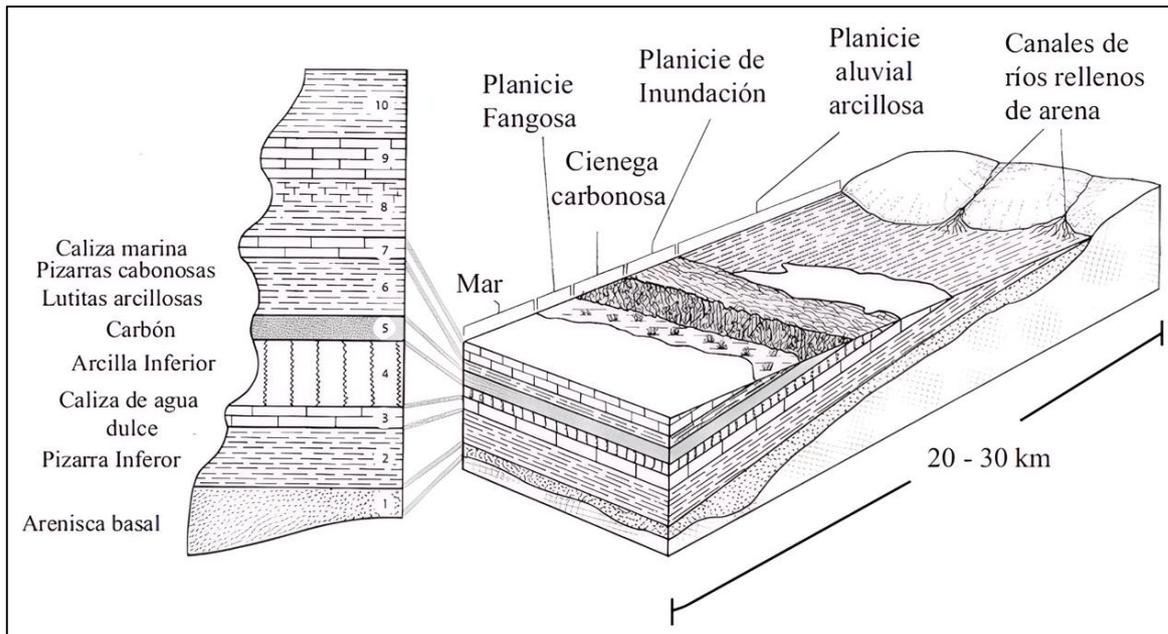


Figura 3: Modelo tradicional que muestra a los ciclotemas y depósitos pensilvánicos de carbón de la Cuenca de Illinois, EUA.  
Fuente: Shaw, 1977.

### 2.2.3 Tectónica

Considerada una rama de la geología que estudia los movimientos de la corteza terrestre a niveles de mayor escala como las cadenas montañosas, volcanes y zonas de sísmicas, teniendo así una directa relación con el estudio de la génesis de los plegamientos y la deformación de la masa sólida que constituyen las rocas. Actualmente el análisis tectónico se centra en el estudio de la litósfera dividida en una serie de placas con diferentes límites en los que ocurren eventos o procesos asociados al tiempo geológico. Las secuencias ígneas de la corteza terrestre, estilos y fases de deformación que se pueden observar en el subsuelo y rocas expuestas nos ayudarán a interpretar el tiempo que tomó y las fuerzas que actuaron sobre la corteza (Arellano, 2002).

El estudio de la tectónica inicia con la teoría de la deriva continental, la cual nos indica que los continentes tenían una distribución y ubicación distinta a la que actualmente conocemos, la hipótesis defiende que se habría tenido todos los continentes unidos en un solo supercontinente al cual Wegener llamó Pangea desde 1912, y al océano lo llamó Pantalasa. Los principales sustentos para esta hipótesis se sostenían en la paleogénesis, paleoclima, geografía, geología mineralógica y el paleomagnetismo. En 1960, Hess, realizó una síntesis del conocimiento geológico y la tectónica, de esta manera planteó el nuevo concepto de

Tectónica de Placas, el que permite explicar la deriva continental actual y los procesos orógenos antiguos en términos semejantes. Sin embargo, es importante considerar que hay estudios que atribuyen a la deformación gravitacional y esfuerzos extensionales, quienes, al igual que la tectónica de placas tiene influencia en la deformación de la corteza terrestre, como se ha determinado un depósito gravitacional “Brecha Talara” en la cuenca homónima (Sempere, 2017).

#### **2.2.4 La deformación de los mantos de carbón**

La formación de una capa de carbón constituye un episodio especial dentro del ciclo general sedimentario donde se desarrolló el bosque carbonífero o hullero. Esta es la razón por la cual, la capa de carbón se encuentra intercalada entre las rocas sedimentarias: areniscas cuarzosas, arcillitas y como el ciclo de sedimentación se suele repetir varias veces seguidas, normalmente se formarán varias capas de carbón superpuestas en una misma cuenca (Mantilla, 2022).

El carbón, por su característica textura vidriosa, es naturalmente la roca más frágil en este proceso de deformación, por lo cual, los mantos deben acomodarse dentro de las rocas encajonantes obedeciendo a una nueva situación estructural. Desde los primeros estudios geológicos, basados sobre el resultado de sondeos exploratorios de diamante, se llegó a la conclusión de que, en los yacimientos, las anomalías estratigráficas existentes, como la discontinuidad de los mantos de carbón o la variabilidad de los intervalos entre estos, se debían, esencialmente, a la acción de la tectónica (Reyes, 2022).

Se reconoce que el carbón se encuentra en intercalaciones de areniscas y arcillitas. Y su formación se encuentra relacionado con diferentes eventos y ambientes geológicos de diversas características que se presentaron en un tiempo determinado y se fueron estratificando en capas horizontales cuando no han sufrido plegamientos (Mantilla, 2022).



Imagen 1: Se observa que el carbón se depositó en areniscas cuarzosas de la Formación Chimú, en un ambiente de sedimentación regresivo, en un sistema deltaico se evidencia secuencias geométricas de formas lenticulares, sus dimensiones laterales son reducidas sus capas lisas y astillosas, con bandas mates y brillosas, distrito de Pedro Gálvez – San Marcos.  
Fuente: Mantilla, 2022.

Las imágenes, que a continuación se exponen, ilustran aspectos de mantos de carbón afectados por fallas locales y sus respectivas estructuras derivadas de los corrimientos. Así que, se trata de fallas con pequeños desplazamientos pero que presentan las mismas características de dislocaciones de cualquier magnitud. Las imágenes son del yacimiento de Samacá, correspondiente al sector carbonífero Checua - Lenguzaque, y al oriente de Sativanorte, en la cuenca Sogamoso - Jericó – Colombia (Reyes, 2022).



Imagen 2: Manto de carbón desplazado por dos fallas de cabalgamiento, yacimiento de Samacá – Colombia.

Fuente: Reyes, 2022.

La Imagen 2, permite identificar dos fallas subparalelas a la estratificación con leve aumento de inclinación en los sitios de cabalgamiento del carbón. En el bloque central, a mitad de la distancia entre dichas fallas, el manto está también desplazado por una falla normal de inclinación fuerte respecto al buzamiento del carbón. Sin embargo, el banco de arenisca existente en la base no sufre desplazamientos apreciables sino un suave doblamiento y fracturación. Por otro lado, las capas del respaldo superior muestran los mismos cabalgamientos hasta donde las fallas se pierden en la estratificación. Este es un ejemplo de una situación estructural frecuente en todos los yacimientos de carbón de la Formación Guaduas – Colombia (Reyes, 2022).

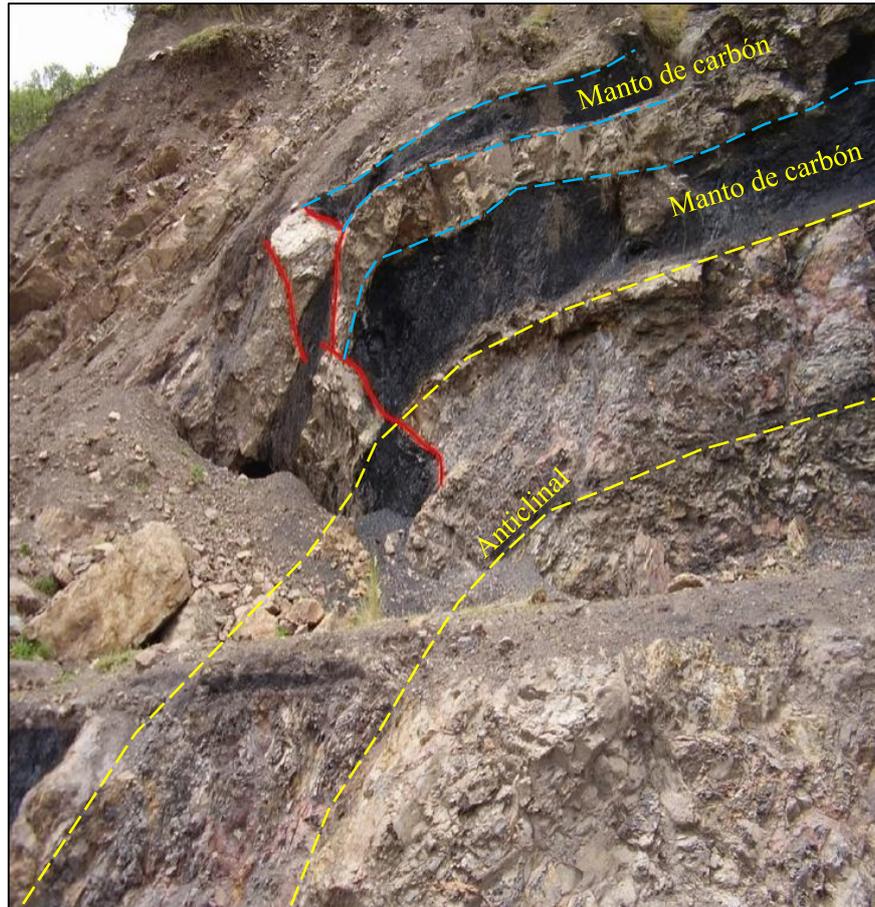


Imagen 3: Manto de carbón asociado a otro manto pequeño acompañante, en un doblamiento anticlinal parcialmente expuesto, yacimiento de Samacá – Colombia.  
Fuente: Modificado de Reyes, 2022.

la Imagen 3, muestra dos mantos de carbón en un anticlinal asimétrico, cuyo flanco inclinado está afectado por una falla inversa compleja, localizada en el sitio de flexura. En donde se observa que, en proximidad de la charnela presenta una falla inversa que disloca los mantos, dando la impresión de la existencia de estrangulamientos en el carbón. Por consiguiente, la capa de arenisca presente entre los dos mantos de carbón se halla muy disturbada, con superficies de fricción y varios sistemas de diaclasas. Además, la imagen también permite observar el espesor real del carbón en los sitios donde no se manifiesta la influencia de las dislocaciones. Dadas sus características como roca, es decir, la textura, la dureza y la compactibilidad, el comportamiento del carbón con relación a los esfuerzos de compresión y de tensión es sumamente variable e impredecible (Reyes, 2022).

Cuando existe suficiente profundidad de cobertera sedimentaria, las capas de carbón localizadas en anticlinales pueden mostrar valores relativamente altos. Si no se tiene la suficiente profundidad de cobertera, los carbones en las partes altas de estas estructuras

pueden mostrar bajos contenidos de gas, debido a una desorción hacia la superficie o subsuperficie cercana. Igualmente, los carbones pueden presentar bajos contenidos de gas hacia el techo de los anticlinales, debido a un espesor muy reducido en estas partes, lo que da como resultado una disminución en los recursos (Mariño, 2015).

En este sentido, el acomodamiento del carbón dentro de una sucesión de estratos alternados obedece, en parte, al grado de fracturación del manto en los sitios de dislocación. No obstante, esto también, es consecuencia del comportamiento estructural de los respaldos e intercalaciones de roca y a las características litológicas de esta; la Imagen 4 da una visión clara de este aspecto (Reyes, 2022).



Imagen 4: Vista de los mantos de carbón de la Imagen 3, localizados en el flanco opuesto del anticlinal, yacimiento de Samacá – Colombia.

Fuente: Modificado de Reyes, 2022.

La Imagen 4, exhibe una pequeña flexura en el manto principal que pasa a falla inversa en el respaldo superior. Nótese la tendencia de la arenisca en formar la flexura, no obstante, el esfuerzo es resuelto; finalmente, en ruptura y desplazamiento inverso de la capa en un

perfecto mecanismo de cizalla. Como consecuencia, la falla afecta también el pequeño manto de carbón superior (Reyes, 2022).

Las flexuras son pliegues de menor magnitud (micro pliegues), que pueden mejorar localmente la permeabilidad. Debido a que las flexuras son el resultado de una menor deformación, la localización de estas pequeñas estructuras es solamente posible mediante una cartografía muy detallada, por medio de perforaciones o de información obtenida en minería (Mariño, 2015).

Las exposiciones en afloramiento de los mantos de carbón, ilustradas en las imágenes anteriores, permiten reconocer con precisión la situación estructural de los mantos en las zonas deformadas por esfuerzos tectónicos. Esto no se logra por medio de sondeos puntuales, dado el diámetro limitado de las perforaciones; igualmente, un registro geofísico de rayos gamma o de densidad, suministra una información puntual sin relación directa con los alrededores del pozo. Por lo tanto, en áreas afectadas por la tectónica, la correlación de los mantos de carbón a través de sondeos exploratorios y sus respectivos registros de litología y geofísica, son bastante aleatorios con relación a la definición de la situación real estratigráfica de un carbón, aún más, si se considera que los sondeos distan en general más de 100 m entre sí (Reyes, 2022).

### **2.2.5 Implicación de la deformación de las capas en la interpretación geológica**

En áreas donde los estratos y mantos de carbón se encuentren empinados (más de 10° de buzamiento), la profundidad de la cobertera aumenta rápidamente con una tendencia general a incrementar el contenido de gas buzamiento abajo. Las capas con altos buzamientos, pueden facilitar la migración del metano hacia arriba; así mismo, los carbones que se encuentren cerca de superficie pueden sufrir una desgasificación natural (Mariño, 2015).

Para explicar este aspecto, se muestran en la Imagen 5 algunos detalles de las vistas de la Imagen 2, en las cuales se introdujeron esquemáticamente sondeos imaginarios, representados con dos líneas paralelas contiguas, de manera que, pueda definirse la sucesión litológica, tal como resulta en los núcleos de perforación. El sondeo 1 halla el carbón en el bloque yacente, indicando el espesor real del manto. Ahora bien, el sondeo 2, encuentra el manto de carbón en el bloque colgante en lugar del bloque yacente; lo que significa que, la repetición del manto muestra espesores anormales distintos. En efecto, el sondeo 3, cruza el

carbón dentro de una estratigrafía normal hasta la falla, en donde vuelve a repetirse una parte del manto (Reyes, 2022).

Es relevante mencionar que, la Imagen 5, se convierte en un referente para la interpretación de la situación estratigráfica de un manto de carbón, por correlación de la información obtenida con los núcleos y con los registros de densidad del sondeo. De manera que, la correlación indica aparentemente, de izquierda a derecha, la existencia de un manto; en seguida, por encima de este, la aparición de un pequeño manto acompañante, y, luego la desaparición de este otro y la presencia de una nueva cinta por debajo del manto principal (Reyes, 2022).

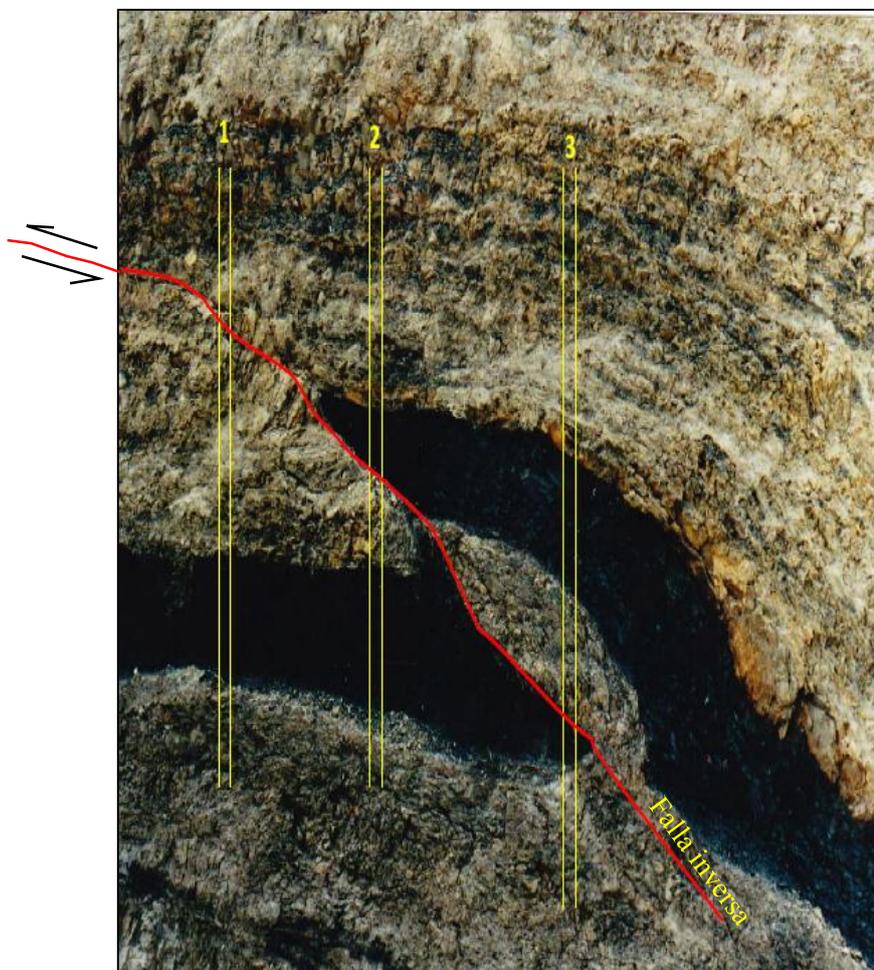


Imagen 5: Detalle de la falla inversa ubicada en la parte izquierda, expuesta en la Imagen 2, yacimiento de Samacá – Colombia.  
Fuente: Modificado de Reyes, 2022.

La Imagen 6, muestra aspectos relacionados con la sucesión estratigráfica y los espesores de las capas, distribuidas de la siguiente manera: En primer lugar, el sondeo A indica la presencia de un manto de carbón. En segundo lugar, el sondeo B muestra un pequeño manto superior adicional. En tercer lugar, el sondeo C indica dos mantos. En cuarto lugar, el sondeo D halla un manto de carbón de gran espesor. Con lo anterior, se puede observar cómo la doble capa de arcillolita negra, indicado por la flecha, está presente al inicio de todos los sondeos; la estratigrafía es normal hasta el techo del manto en los sondeos B, C y D, mientras que la distancia entre esa capa y el manto de carbón en el sondeo A es el doble, es decir, anormal (Reyes, 2022).

De otro lado, la Imagen 6, es un claro ejemplo de irregularidad aparente del espesor de un manto de carbón, lo cual explica, claramente, el por qué pueden presentarse diferencias marcadas en las columnas estratigráficas de distintos sondeos dentro de un contexto de regularidad estratigráfica local (Reyes, 2022).

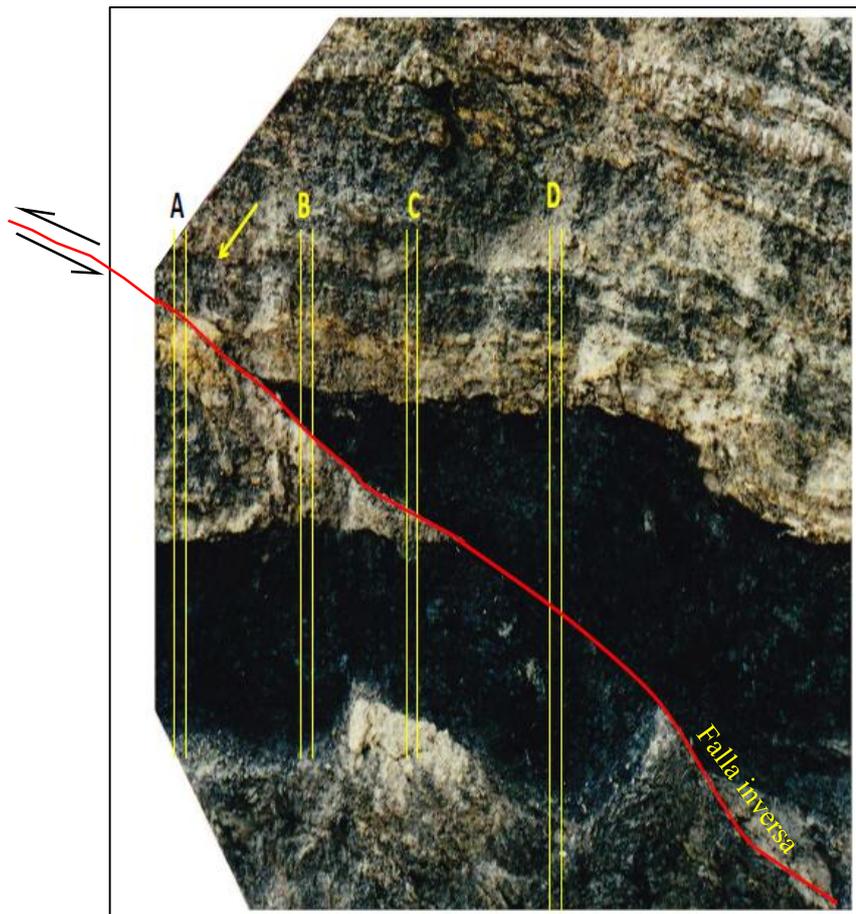


Imagen 6: Detalle de la falla inversa ubicada en la parte derecha expuesta en la Imagen 2, yacimiento de Samacá – Colombia.

Fuente: Modificado de Reyes, 2022.

### **2.2.6 Estratigrafía de los mantos de carbón**

La estratigrafía del carbón se centra en los procesos de acumulación de materia orgánica en ambientes pantanosos, donde condiciones anóxicas y la estabilidad del nivel del agua permitieron la preservación de material vegetal en grandes volúmenes. Este material orgánico se transforma en turba y, bajo condiciones de enterramiento y presión, se convierte en carbón. La disposición de los mantos de carbón se asocia con ciclos sedimentarios y fluctuaciones del nivel del mar, y están intercalados con arcillitas y areniscas que indican cambios ambientales. Estas secuencias reflejan la interacción de factores climáticos, tectónicos y sedimentarios en la evolución de las cuencas, proporcionando información clave sobre la historia geológica y paleoambiental de los depósitos de carbón (Boggs, 2011).

La Imagen 7 muestra una disposición típica de ambientes depositacionales en un contexto deltaico. Los mantos de carbón se forman principalmente en zonas de pantano intercaladas entre depósitos de canales fluviales, depósitos de desbordamiento y bahías interdistributarias. Estas capas de carbón están sobre y bajo unidades de arenisca, limolita y arcillita, indicando episodios de sedimentación fluvial y de inundación en un entorno costero dominado por variaciones en el nivel del agua. La presencia de depósitos de diques naturales y prodelta sugiere episodios de transgresión y regresión marina, lo que favoreció la acumulación de materia orgánica y la formación de los mantos de carbón en ambientes de baja energía.

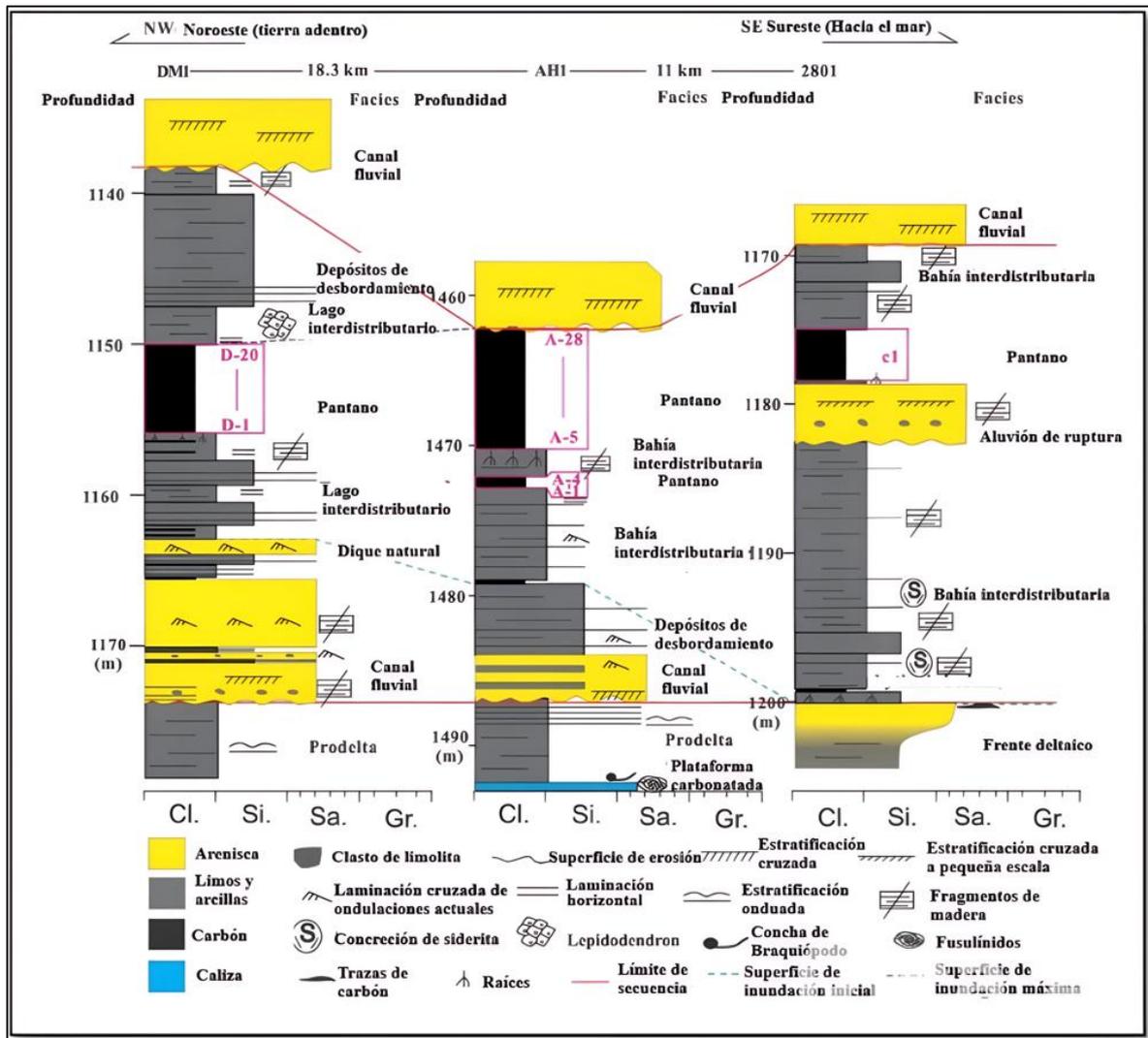


Imagen 7: Sección transversal esquemática que muestra la variación vertical y lateral del depósito de carbón del Carbonífero Tardío Pérmico Temprano, el cuadro rosa representa las muestras de carbón en pozos, en el yacimiento de Anhe al Norte de China.  
 Fuente: Modificado de Yanan, 2020.

Con base en el reconocimiento de los límites de secuencia, las superficies de inundación inicial y las superficies de inundación máxima en los pozos del yacimiento carbonífero de Anhe, el carbón de la Formación Shanxi se interpreta como una secuencia con límites de secuencia en la base y en la parte superior de la sucesión, y su interior Se han identificado extensiones internas de sistemas de nivel bajo, extensiones de sistemas transgresivos y sistemas highstand, respectivamente. El modelo estratigráfico de secuencia para los sedimentos clásticos de la planicie costera y el carbón en la cuenca carbonífera de Anhe se presenta en la Imagen 7 (Yanan, 2020).

El cambio de facies de depósito de prodelta o frente delta en la Formación Taiyuan a canal fluvial o pantano en la Formación Shanxi indica una caída relativa del nivel del mar en todo el yacimiento carbonífero de Anhe, y un límite de secuencia desarrollado en la superficie basal de la Formación Shanxi. Posteriormente, las arenas de los canales fluviales, los limos y las arenas de los desbordes y de los diques se depositaron en las áreas central y tierra adentro durante la etapa de depósito de las extensiones internas de sistemas de nivel bajo. Las raíces debajo de la veta de carbón indican que la superficie estuvo expuesta y que no se depositaron ni preservaron sedimentos en el área hacia el mar (Yanan, 2020).

Durante la etapa subsiguiente de la deposición de extensiones de sistemas transgresivos, las arcillas, limos y arenas de grano fino de la bahía interdistributiva se depositaron en el área hacia el mar, y las arcillas lacustres interdistributivas y se depositaron sedimentos en el área hacia tierra. Luego, toda el área desarrolló una superficie terrestre no hiatal y un ciclo de carbón de secado ascendente y humectante ascendente. Las áreas hacia el mar y el centro fueron cubiertas por depósitos interdistributivos de la bahía, y se desarrolló una secuencia de carbón de secado hacia arriba en el área tierra adentro. Posteriormente, las arcillas y los limos interdistributivos de la bahía se depositaron en el área hacia el mar, y se desarrolló una secuencia de humectación del carbón hacia arriba en las áreas central y hacia la tierra. Finalmente, se desarrolló un ciclo del carbón compuesto por secuencias de secado ascendente y humectación en las áreas tierra adentro y central (Yanan, 2020).

### **2.2.7 Rango del carbón**

El carbón es una roca sedimentaria de origen orgánico (organógena), formado principalmente por restos de materia orgánica vegetal depositada en zonas pantanosas. El grado de carbonificación de la roca dependerá de la acción de parámetros fundamentales como la presión, temperatura y tiempo a los cuales fue sometida la materia orgánica, y además definirá usos y aplicaciones industriales. Se denomina carbogénesis al proceso de transformación por el cual se origina el carbón a partir de sustancias vegetales, fundamentalmente plantas superiores y en menor grado organismos inferiores como algas, esporas y polen. Este proceso consta de dos etapas principales, el estado bioquímico que determina el tipo de carbón y la fase geoquímica o metamórfica que condiciona el rango del carbón (Cortes, 2014).

### 2.2.7.1 Fase bioquímica

Los compuestos vegetales de los que procede el carbón deben haber sido preservados de las destrucciones totales oxidativas y microbianas, por esa razón se postula que la carbogénesis ocurrió en zonas pantanosas, donde el agua saturó los depósitos vegetales, limitando el oxígeno e inhibiendo la acción de los microorganismos que producen la putrefacción (biodegradación). El proceso de descomposición de los compuestos vegetales depende del medio en el que se desarrolla con base en tres factores: el contenido de nutrientes para bacterias y hongos, el oxígeno y el pH. Existen múltiples teorías que explican la formación de macerales en función de estos parámetros, entendiendo como macerales a los constituyentes del carbón en su fracción orgánica con tamaños que oscilan de entre dos micras hasta varios centímetros. Se consideran en general tres grupos de macerales del carbón: grupo huminita - vitrinita, grupo liptinita y grupo inertinita (Vite, 2018).

El Primer grupo es el maceral mayoritario en los carbones existentes (>80%), siendo responsable de las propiedades de coquizado del carbón y procede principalmente de plantas superiores; presenta una densidad, reflectancia y contenido en carbono e hidrógeno intermedios en comparación con los demás grupos, además tiene comparativamente mayor cantidad de oxígeno el cual disminuirá al aumentar el rango del carbón. Los componentes de este grupo maceral cambiarán de nombre al cambiar el rango, por lo que en los lignitos se denominarán "grupo huminita" mientras que en los carbones bituminosos y antracíticos "grupo vitrinita". El segundo grupo aparece en menor proporción que el grupo anterior y procede de partes resinosas y ceras de las plantas, algas y bacterias; es un grupo rico en hidrógeno y materia volátil y pobre en carbono, además presenta una densidad y reflectancia muy bajas. Finalmente, el tercer grupo es el componente más escaso en los carbones y es prácticamente inerte a lo largo de los procesos de carbonización; está conformado por tejidos de plantas superiores en distintos estados de compactación o fractura, además de fragmentos de material amorfo gelificado, alterado por procesos bioquímicos con escaso contenido en hidrógeno, pero es muy rico en carbono, con máxima reflectividad y densidad (Vite, 2018).

Los distintos grupos macerales se definen atendiendo a las características ópticas observables con un microscopio petrográfico (normalmente de luz reflejada), en donde se describen a partir de su forma, color, reflectancia, dureza, relieve de pulido, entre otras características. Una de las propiedades más importantes en el estudio de macerales es la reflectancia con base en la norma ASTM D7708, que se define como el porcentaje de luz

que refleja una superficie plana y pulida bajo determinadas condiciones de iluminación y está relacionada directamente con la aromaticidad de los componentes orgánicos del carbón, por lo tanto, la reflectancia incrementa a medida que aumenta el grado de evolución del carbón. Para una muestra de carbón determinada, los macerales del grupo liptinita se observarán más oscuros (menor reflectancia), los macerales del grupo inertinita serán los más claros (mayor reflectancia) y los macerales del grupo vitrinita poseen un color gris intermedio. Esta diferencia de color disminuirá conforme aumente el grado de evolución del carbón (Vite, 2018).

A continuación, se muestra la relación entre algunos parámetros fisicoquímicos y el grado de reflectancia ( $R_o$ ), con respecto al rango del carbón (Figura 4). Se observa que los valores de carbono fijo y de reflectancia aumentan conforme incrementa el rango del carbón, es decir, son mayores al tratarse de carbón antracítico; por el contrario, los valores de materia volátil y humedad disminuyen ante el incremento de madurez del carbón (Vite, 2018).

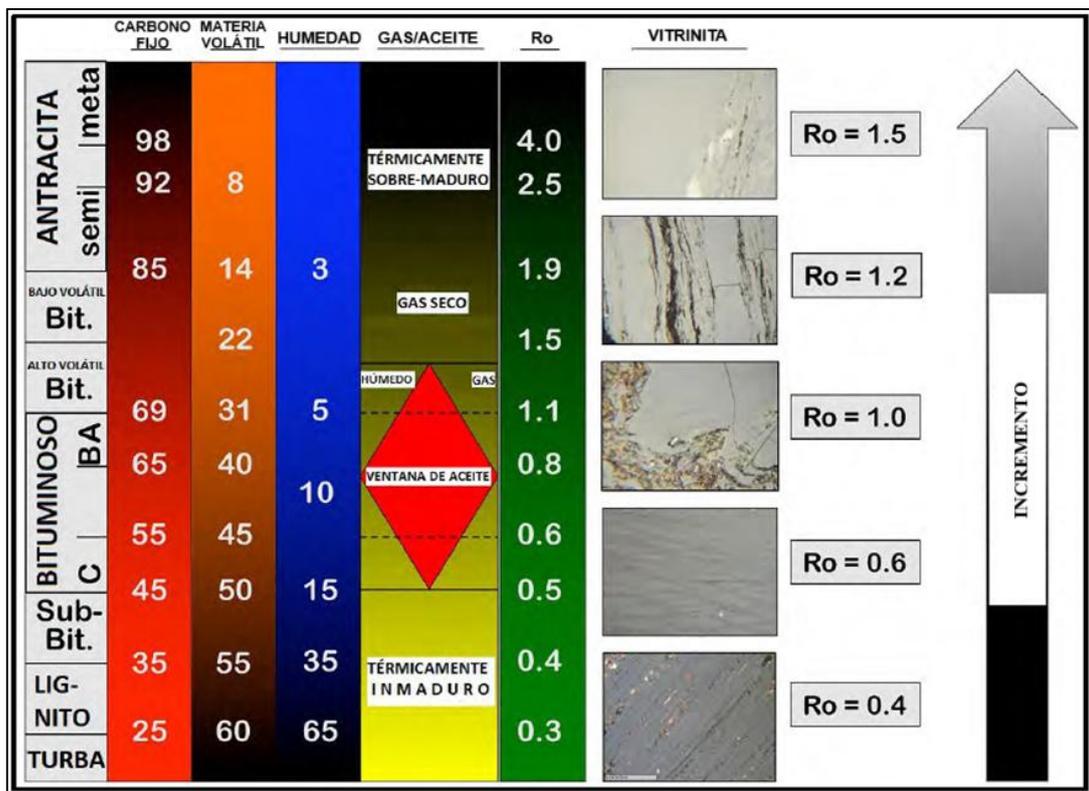


Figura 4: Medida microscópica de la reflectancia relativa de macerales de vitrinita ( $R_o$ ) en comparación con el contenido de carbono fijo, materia volátil, humedad y generación de gas/aceite. Fuente: Cortland, basada en datos de ASTM 1992.

### 2.2.7.2 Fase geoquímica

El estadio geoquímico determina el rango del carbón, a través de una lenta transformación de la materia orgánica a distintas profundidades, sometida a condiciones de temperatura y presión cambiantes. Estas condiciones determinarán el grado de carbonificación o metamorfismo de un carbón, transformando su estructura y composición, dando como resultado varias clases de carbón (Kabe, 2004).

El más antiguo y el más puro es la antracita, cuyo contenido de carbono fijo es del orden de 86 a 98% y menos de 14% de materia volátil; le sigue el carbón bituminoso con 69 a 86% de carbono fijo, contenido de materia volátil entre 14 y 31%, y con límites de 8300 a 11 500 Btu/lb de poder calorífico; el lignito, con 50 a 69% de contenido de carbono fijo, entre 40 y 50% de materia volátil y con límites de 6 300 a 8 300 Btu/lb de poder calorífico (Durán, 1993).

El sistema de clasificación de carbón más utilizado es el de la ASTM (Norma D - 388) en donde se ordenan por rangos en cuatro clases principales: lignito, sub-bituminoso, bituminoso y antracítico, siendo este el orden en que se incrementa el grado de madurez del carbón; estas categorías indican intervalos de características físicas y químicas que son útiles en la estimación del comportamiento del carbón en la minería, así como en la preparación y usos. El rango se realiza con base en los contenidos de carbono fijo y materia volátil en base seca y libre de materia mineral; y para los carbones de menor rango el poder calorífico en base húmeda y libre de materia mineral; mediante el análisis de estas propiedades se logra definir el rango del carbón (Kabe, 2004).

El proceso de carbonificación afecta determinadas propiedades del carbón, siendo los más evidentes al aumentar el rango: el incremento del contenido de carbono y el poder calorífico (con una pequeña disminución para los carbones de muy alto rango); además, la disminución en el contenido de volátiles y de oxígeno. El proceso natural de transformación confiere la propiedad de aglomerar al carbón en rango bituminoso, aunque no todos los carbones bituminosos forman coque por el método convencional y no todos los carbones coquizables cuentan con la firmeza necesaria o masa celular propia de un coque metalúrgico (Vite, 2018).

Tabla 1: Clasificación de carbones por rango (%m: Porcentaje en masa, bslmm: Base seca libre de materia mineral, bhlmm: Base húmeda libre de materia mineral).

Clase	Límites de Carbono fijo (%m, bslmm)		Límites de Materia volátil (%m, bslmm)		Límites de Poder calorífico (%m-BTU/lb, bhlmm)		Carácter aglomerante
	Igual o mayor que	Menor que	Igual o mayor que	Menor que	Igual o mayor que	Menor que	
Antracíticos							
Meta-antracita	98	-	-	2	-	-	No aglomerante
Antracita	92	98	2	8	-	-	
Semi-antracita	86	92	8	14	-	-	
Bituminosos							
Bituminoso bajo volátil	78	86	14	22	-	-	Comúnmente aglomerante
Bituminoso medio volátil	69	78	22	31	-	-	
Bituminoso alto volátil A	-	69	31	-	14000		
Bituminoso alto volátil B	-	-	-	-	13000	14000	
Bituminoso alto volátil C	-	-	-	-	11500	13000	
Sub-bituminosos							
Sub-bituminoso A	-	-	-	-	10500	11500	No aglomerante
Sub-bituminoso B	-	-	-	-	9500	10500	
Sub-bituminoso C	-	-	-	-	8300	9500	
Lignitos							
Lignito A	-	-	-	-	6300	8300	No aglomerante
Lignito B	-	-	-	-	-	6300	

Fuente: Modificado de ASTM D-388, 2005.

Químicamente el carbón incluye en su estructura carbono, hidrógeno, oxígeno, así como pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno; contiene, además, dióxido de carbono y metano; compuestos aceitosos como alquitrán y brea, que a su vez contienen amoniaco, tolueno, naftas y creosotas (George, 2002).

Con respecto a las características físicas del carbón en sus diferentes rangos se observa la carencia de brillo en carbones de bajo rango (lignito y sub-bituminoso), mientras que en rango medio (bituminoso) y alto (antracítico) presenta lustre metálico (Imagen 8). Adicionalmente, la compactación del carbón se ve favorecida al aumentar su madurez (Vite, 2018).



Imagen 8: Muestras de carbón en sus diferentes rangos de madurez.  
Fuente: Recuperada de Petrografía de Carbón <https://petrografiicarbon.es/>

La antracita es el carbón mineral de más alto rango con concentraciones de carbón más grandes por unidad de volumen (>95%) se origina por un proceso de transformación de materiales orgánicos por migración paulatina a temperaturas moderadas y alta presión en turbas y carbones, gracias a la des-hidrogenación incompleta. Es de color negro y brillante, el más denso y duro de los carbones. Se usa fundamentalmente para obtener energía eléctrica en centrales térmicas de carbón, aunque también tiene otros usos menores como la fabricación de micrófonos, fabricación de gomas sintéticas, colorantes, aditivos de coque, etc. (Vite, 2018).

### 2.2.8 Métodos estandarizados de clasificación de carbones

El conocimiento de las propiedades físicas y químicas del carbón permite buscar estrategias para mejorar el rendimiento de los procesos energéticos donde estos son materia prima. La clasificación de los carbones puede realizarse con base en diferentes parámetros que van desde su composición y características hasta el porcentaje de abundancia o su aplicación final. De esta forma es posible construir diversos rangos de clasificación que permiten identificar la génesis, edad, condiciones bioquímicas y fisicoquímicas que caracterizan el desarrollo de carbón (World Coal Institute, 2009).

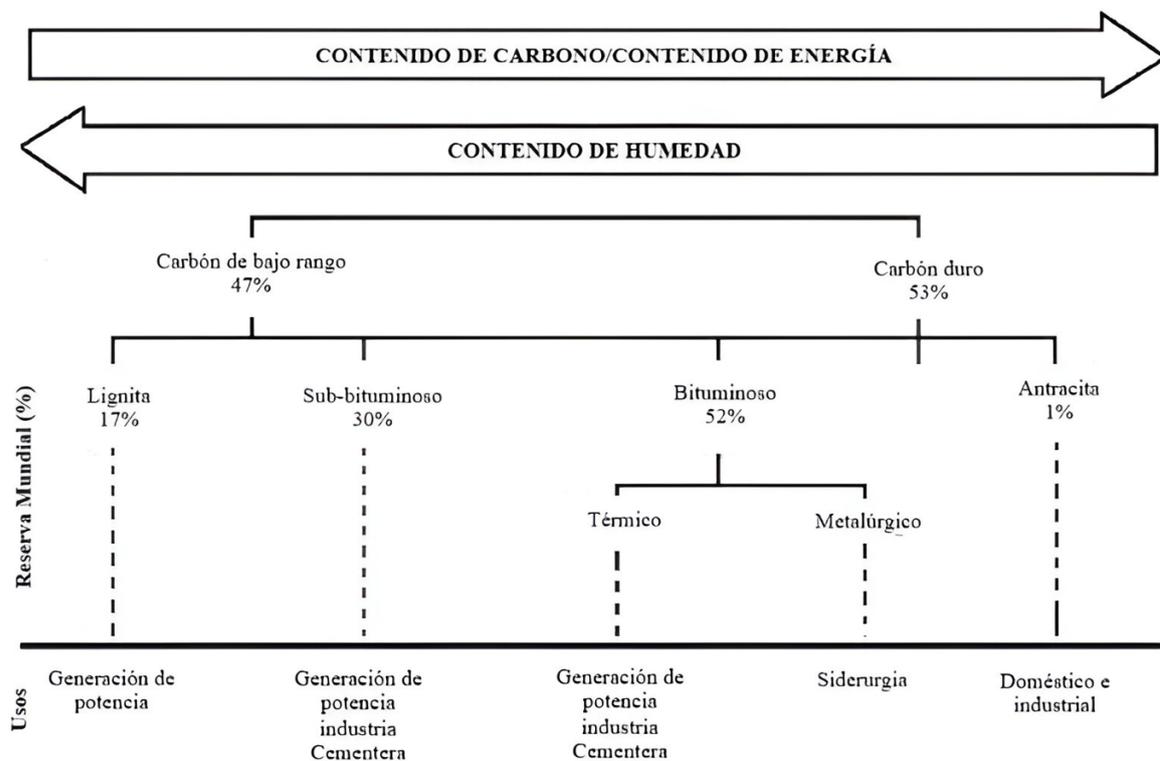


Figura 5: Esquema de clasificación de los carbones, según su porcentaje de abundancia y aplicación final.

Fuente: Adaptada de World Coal Institute, 2009.

#### 2.2.8.1 Normas ASTM

En Estados Unidos y Canadá, la ASTM desarrolló un método de clasificación de carbones basado en parámetros obtenidos mediante ensayos normalizados. La norma busca que las propiedades utilizadas para la clasificación sean lo suficientemente sencillas de determinar mediante el análisis próximo y el poder calorífico. La terminología derivada de esta norma

es de uso extendido a nivel mundial y estandariza el uso de términos como poder calorífico (PC), materia volátil (MV), humedad (Hd), ceniza (Cz) y carbono fijo (CF). Particularmente, la norma ASTM D388- 12 es una de las de mayor aceptación para clasificar los carbones. Determina cuatro clases básicas en orden descendente y 12 sub-categorías según la composición química y el grado de madurez. Adicionalmente, a efectos de calcular el poder calorífico superior, el contenido en volátiles y el carbono fijo con o sin incluir el contenido inherente de humedad, la norma ASTM D388-12 propone expresiones para cambiar de base seca a húmeda. Estas expresiones (Ecuaciones 1-3) consideran además que parte del azufre y el agua de algunos minerales que forman las cenizas, se eliminan durante la combustión de la muestra para el análisis elemental (ASTM, 2012).

$$CF_{s,lm} = \frac{100(\%CF - 0,15\%S)}{[100 - (\%Hd + 1,08\%Cz + 0,55\%S)]} \quad (1)$$

$$MV_{s,lm} = 100 - CF_{s,lm} \quad (2)$$

$$PCS_{h,lm} = \frac{100(PCS_s - 50\%S)}{[100 - (1,08\%Cz + 0,55\%S)]} \quad (3)$$

Donde, s = base seca, h = base húmeda, lmm = libre de material mineral, S = azufre, Cz = ceniza, Hd = humedad, PCS = poder calorífico superior (Btu/ lbm). La norma define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico superior, en base húmeda, sea menor a 26,8MJ/kg (11500 BTU/lbm), en este rango están los carbones denominados subbituminosos y los lignitos. En los carbones de alto rango, con un poder calorífico mayor a 26,8MJ/kg, se incluyen los carbones bituminosos y antracita. Así, a mayor rango, mayor es el contenido en carbono fijo y mayor el poder calorífico, mientras que disminuyen su humedad y la cantidad de materia volátil. De esta manera, en orden descendente por su rango, se tiene la clasificación: antracita, bituminoso, sub – bituminoso y lignito, Tabla 2 (ASTM, 2012).

Tabla 2: Clasificación general del carbón mineral, según norma ASTM D388-12.

Tipo	CF (%)	MV (%)	PC (BTU/lb)	PC (MJ/Kg)	PC (Kcal/Kg)
Antracita	86 - 98	2 - 14			
Bituminoso (Hulla)	69 - 78	14 - 31	10500 - 14000	24,5 - 32,6	5800 - 7780
Sub-bituminoso			9500 - 10500	22,1 - 24,5	5290 - 5860
Lignito y turba			6300 - 8300	14,7 - 19,3	3500 - 4600

Fuente: ASTM, 2012.

### 2.3 Definición de Términos Básicos

**Antracita:** Variedad de carbón mineral con un contenido en carbono de alrededor del 90%. Es de color negro intenso y brillo vítreo submetálico, en ocasiones con irisaciones; poder calorífico superior a 36 MJ/kg. Se emplea como combustible industrial y en la fabricación de gas de agua y carbono amorfo (Vite, 2018).

**Carbón mineral:** Carbón natural, sólido y combustible, de color pardo a negro y de consistencia pétreo o terrosa, constituido por carbono amorfo acompañado de hidrocarburos, compuestos orgánicos complejos y materiales inorgánicos. Tiene su origen en la carbonificación de vegetales en épocas geológicas pasadas, tras quedar sepultados en ambientes anóxicos. Según el porcentaje de carbono fijo, se denomina turba, lignito, hulla o antracita (Vite, 2018).

**Ceniza de carbón:** Residuo que queda después de quemar el carbón y el coque (Vite, 2018).

**Coque:** Material resistente y poroso, producto de la destilación seca destructiva del carbón mineral, realizada a alta temperatura en ausencia de aire. Residuo sólido producto de la destilación seca (entre 500 y 1 000°C) del carbón. El coque se puede volver a usar como combustible, pues todavía contiene más de 900% de carbono (Vite, 2018).

**Hulla:** Variedad de carbón mineral con un contenido en carbono de aproximadamente el 80%. Es de color negro intenso y brillo mate o graso. Se diferencia del lignito por su mayor poder calorífico, entre 30 y 36 MJ/kg. Se utiliza como combustible y para la producción de coque siderúrgico y alquitrán. Es característica del Carbonífero, aunque también existen yacimientos en el Permo-Triásico de Australia y África del Sur, y el Cretácico de Canadá (Vite, 2018).

**Lignito:** Es un carbón fósil de formación reciente posterior a la hulla, combustible de calidad media entre un 60 y 75% de carbón (Perfil de Mercado del Carbón,2014).

**Mantos:** Formación de un cuerpo geológico en forma de capas por la acumulación de una materia dada por el proceso deposicional o sedimentación física que posteriormente forma parte de los cuerpos estratificados (Thomas, Coal Geology, 2014).

**Materia volátil:** En carbones, materia gaseosa que se desprende del carbón cuando éste es sometido a un calentamiento en condiciones determinadas (Vite, 2018).

**Poder calorífico del carbón:** Cantidad de calor producido por el carbón durante su combustión a volumen constante (Vite, 2018).

**Turba:** Roca sedimentaria orgánica compuesta principalmente por restos vegetales en descomposición parcial, que se acumula en ambientes saturados de agua con baja concentración de oxígeno, como pantanos y humedales. Este material representa la primera etapa en la formación del carbón, seguido por el lignito, la hulla y la antracita, en un proceso conocido como carbonificación (Tarbuck, 2013).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1 Geográfica

Geográficamente el área de estudio se encuentra ubicada en la cordillera occidental, flanco oriental de los Andes, al NE de la ciudad de Cajamarca a una altitud promedio de 2430 m.s.n.m. Las coordenadas que delimitan la zona de estudio en el Sistema UTM (Sistema de coordenadas universal), Datum WGS – 84 (Sistema de Coordenadas geográficas Mundial - 84) y zona 17S, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3: Ubicación geográfica de la investigación.

VÉRTICES	COORDENADAS UTM-WGS84	
	ESTE	NORTE
1	782 230	9 272 056
2	780 274	9 272 056
3	780 274	9 274 353
4	782 230	9 274 353

##### 3.1.2 Política

Políticamente la investigación se encuentra ubicada en la región de Cajamarca, provincia de Chota, distrito de Chalarmarca, Centro Poblado El Naranjo; específicamente al margen izquierdo del Río Llaucano aguas abajo (Ver Plano 01: Plano de Ubicación).

### 3.2 ACCESIBILIDAD

La vía de acceso principal al lugar donde se realiza la presente investigación, es la carretera asfaltada de Cajamarca – Bambamarca (112 km), posteriormente hay un tramo de carretera afirmada desde la ciudad de Bambamarca hacia el Centro Poblado El Naranjo (20 km). La distancia y el tiempo se muestra en la Tabla 4. (Ver Plano 02: Plano de Accesibilidad).

Tabla 4: Accesibilidad al proyecto de investigación

Tramo	Tipo de vía	Distancia (Km)	Tiempo (hrs)
Cajamarca – Bambamarca	Asfaltada	112	2.30
Bambamarca – El Naranjo	Afirmada	20	1.00

### 3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.3.1 Tipo, Diseño y Método de Investigación

La metodología se realiza en base a Hernández (2016) que comprende una investigación descriptiva, explicativa y analítica, se describirán las características geológicas y fisicoquímicas por medio del análisis de datos tomados en campo y la información proporcionada por laboratorio; además de ser cuantitativa, ya que se tendrán datos numéricos.

**Tipo de investigación:** No experimental, porque se observarán los fenómenos tal y como ocurre en la naturaleza, por lo que se procederá a la recopilación y análisis de datos.

**Diseño de investigación:** Transversal, debido a que se estudia en un momento determinado de tiempo.

**Método de investigación:** Los métodos que emplearemos en la presente investigación serán el deductivo y observativo, ya que se analizarán los fenómenos observados y se verificarán en campo.

Tabla 5: Clasificación y Tipo de Investigación.

<b>Clasificación</b>	<b>Tipo de Investigación</b>
Según el tipo	No experimental
Según el diseño	Transversal
Método de investigación	Deductivo - Observativo

Fuente: Modificado de Hernández, 2016.

### **3.3.2 Población de Estudio**

Los afloramientos de carbón reconocidos en el Centro Poblado El Naranjo, Distrito de Chalamarca, Provincia de Chota.

### **3.3.3 Muestra**

Los mantos de carbón identificados en el Centro Poblado El Naranjo, Distrito de Chalamarca, Provincia de Chota; en los que se realizará su caracterización geológica y fisicoquímica.

### **3.3.4 Unidad de Análisis**

Muestras de carbón antracítico obtenidas mediante muestreo sistemático de las labores artesanales para su posterior análisis en laboratorio; de igual manera, de las rocas encajonantes para la descripción e identificación de estas, teniendo en cuenta formatos de clasificación de rocas detríticas.

### **3.3.5 Definición de Variables**

Acorde a la investigación científica se cuenta con las siguientes variables que se detallan a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6: Definición de variables.

<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>	<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>
Litología	Caracterización geológica
Mineralogía	
Tiempo Geológico	
Contenido de azufre	Caracterización fisicoquímica
Poder calorífico del carbón	

### 3.4 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica utilizada para realizar el presente trabajo de investigación, está definida en tres niveles que permitieran un adecuado desarrollo.

**Etapa preliminar:** Consiste en la búsqueda y recolección de información bibliográfica concerniente al área de estudio y problemática de investigación como: papers, tesis, revistas, cartas geológicas y boletines. Con esta información se logró obtener el marco teórico y un mejor enfoque de la investigación; así mismo, se elabora un plan de acción que permita una adecuada distribución del tiempo tanto para las actividades de campo como para el procesamiento de la información en gabinete.

**Etapa de campo:** Esta etapa consiste en el reconocimiento del área de estudio, caracterización geológica de los mantos de carbón, así como la toma y recolección de datos, cartografiado geológico, toma de muestras y fotografías; haciendo uso de fichas de Registro Geológico, GPS navegador, brújula, protactor 1/1500, picota, rayador, colores, libreta de campo, cámara fotográfica y bolsas para muestras.

**Etapa de Gabinete:** Etapa donde se realiza el procesamiento, análisis e interpretación de datos obtenidos en la etapa de campo conjuntamente con los resultados de laboratorio para las muestras de carbón; y posterior redacción de la tesis. La calidad de los datos es un factor muy importante a considerar, debido a que la interpretación de los resultados geológicos - físicoquímicos depende de los datos y mediciones realizadas en campo.

### 3.5 EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### a) Instrumentos

**Brújula Brunton:** Instrumento empleada para la toma de datos como azimut y buzamiento de las orientaciones e inclinaciones de estratos, fallas, fracturas, discontinuidades del macizo rocoso y foliaciones.

**GPS Garmin:** Instrumento empleado para la toma de coordenadas y cotas, configuradas en el sistema UTM (Universal Transversal de Mercator), WGS 1984 Zona 17 Sur, comprobando la ubicación de contactos geológicos, y puntos críticos.

**Picota geológica:** Empleado para extraer muestras de carbón, como también para estimar la resistencia de los macizos rocosos.

**Rayador o lápiz de dureza:** Instrumento utilizado para la identificación y reconocimiento de dureza de minerales y rocas.

**Lupa 20x Iwamoto:** Instrumento que sirve para visualizar y reconocer minerales como también analizar sus texturas.

**Flexómetro de 5 m:** Instrumento usado para medir espesores de estratos, espaciamiento y persistencia de las juntas.

**Cámara fotográfica digital 48 MP:** Empleada para la toma de fotografías de las muestras y del área de estudio.

**Formatos:** Para la clasificación de rocas detríticas.



Imagen 9: Instrumentos de Recolección de Datos.

## b) Materiales

**Plano Satelital:** Utilizado para el reconocimiento de los accesos al área de estudio y posibles estructuras e identificación de la zona de muestreo.

**Plano Geológico:** Facilita una noción preliminar de la geología del área de estudio, como los tipos de roca, estructuras tectónicas, contactos, que serán corroborados con el cartografiado.

**Plano Topográfico:** Se utilizó como base para el cartografiado de la geología local, y ubicar las estaciones de investigación y obtener secciones geológicas.

**Bolsas de muestreo:** Son bolsas de polietileno empleadas para el almacenamiento y transporte de muestras representativas de carbón.

**Libreta de campo, colores, plumones y lapiceros:** Estos materiales son empleados para la anotación de puntos y elaboración de bosquejos o dibujar las observaciones y medidas hechas en campo, y así poder diferenciarlos mediante colores.

**Protactor:** Utilizado para el trazado de ángulos y simbología de rumbos y buzamientos en la elaboración de mapas y secciones geológicas a diferentes escalas.



Imagen 10: Materiales de Recolección de Datos.

### c) Instrumentos de Procesamiento de Datos

**Software ArcGIS 10.8:** Utilizado para la elaboración de plano geológico, ubicación, topográfico, análisis y procesamiento del cartografiado.

**AutoCAD:** Empleado para la elaboración de las secciones geológicas y procesamiento del cartografiado superficial-subterráneo.

**Software SAS Planet:** Utilizado para obtener imágenes satelitales de alta resolución del área de estudio.

**Excel:** Herramienta que nos permite realizar el procesamiento y cálculo de datos obtenidos tanto en campo como en laboratorio.



Imagen 11: Instrumentos de Procesamiento de Datos.

### 3.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Luego de haber procesado los datos obtenidos tanto en campo como en laboratorio y con los resultados obtenidos, se procede a analizar e interpretar las características geológicas y petromineralógicas de los mantos de carbón considerando el paralelismo de sedimentación y los parámetros como presión, temperatura y tiempo geológico a la que fue sometida la materia orgánica; además, si la disposición del yacimiento se ve afectado por los desplazamientos en la zona de fallas y plegamientos. Así mismo, se determina la calidad del carbón y las impurezas que presenta, de acuerdo a resultados de laboratorio, definiendo de esta manera las características fisicoquímicas.

## 3.7 MARCO GEOLÓGICO

### 3.7.1 Geología Local

Geológicamente el área de investigación está conformada por rocas sedimentarias del Cretácico Inferior formadas en un ambiente continental, caracterizada por formaciones silicoclásticas del Grupo Goyllarisquizga, representada por la Formación Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat.



Foto 1: Se evidencia el relieve de las rocas sedimentarias en el Centro Poblado El Naranjo, al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo aguas abajo (E: 781606, N: 9272144, C: 2180msnm).

#### 3.7.1.1 Grupo Goyllarisquizga

##### 3.7.1.1.1 Formación Chimú (Ki- chi)

La litología de la Formación Chimú en el Centro Poblado El Naranjo se caracteriza por la alternancia de areniscas cuarzosas de estratificación cruzada, color gris a blanquecino de grano medio a grueso, presenta una resistencia alta a la meteorización, con intercalaciones delgadas de niveles de arcillitas grises en la parte inferior, además alberga mantos de carbón caracterizados por el paralelismo de estratificación que están relacionados con diferentes

eventos, ambientes y tiempo geológico; estos mantos son explotados de manera artesanal por los pobladores del lugar. Esta Formación tiene un espesor aproximado de 600 m.



Foto 2: Se observa el afloramiento de la Formación Chimú con intercalación de areniscas cuarzosas, arcillitas y mantos de carbón al margen izquierdo de la carretera con dirección al Norte, en el lugar denominado La Curva (E: 781933, N: 9273918, C: 2053msnm).



Foto 3: Se evidencia fósiles de plantas en arcillitas de la Formación Chimú, siendo los mejores indicadores de las facies de una roca y fundamental para su datación (E: 781637, N: 9272260, C: 2138msnm).

### 3.7.1.1.2 Formación Santa (Ki- sa)

En el Centro Poblado El Naranjo la Formación Santa aflora a la margen derecha e izquierda de la quebrada Hualgayo, en su gran mayoría de extensión lateral está cubierta por depósitos cuaternarios fluviales, aluviales y coluviales (Ver Plano 04: Plano Geológico); está formada por intercalación de arcillitas grises, limolitas de tonalidades amarillentas y areniscas de estratificación delgada; con un espesor que varía entre los 100 y 140 metros. Se encuentra por encima de la Formación Chimú y por debajo de la Formación Carhuaz. Generalmente, se encuentra meteorizada y exhibe un color gris parduzco. Esta Formación sufrió una ligera regresión por subsidencia durante las edades Valanginiano medio a Hauteriviano.

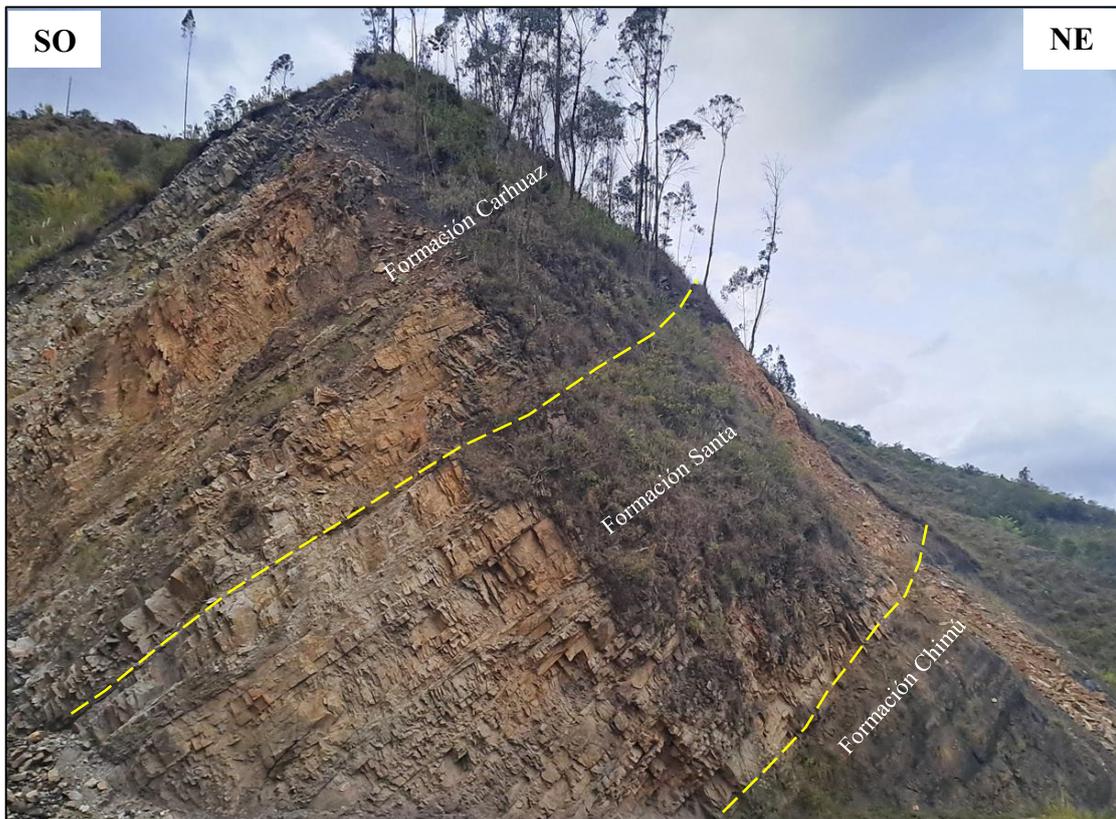


Foto 4: Se observa el afloramiento de la Formación Santa con intercalación de arcillitas grises, limolitas y areniscas de estratificación delgada, suprayace a la Formación Chimú e infrayace a la Formación Carhuaz, se encuentra al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo aguas abajo (E: 781350, N: 9272382, C: 2138msnm).

### 3.7.1.1.3 Formación Carhuaz (Ki- ca)

La Formación Carhuaz en el Centro Poblado El Naranjo está compuesta por la intercalación de areniscas rojizas de grano fino a medio, moderadamente fracturada y arcillitas de tonos violáceos y grises con presencia de óxidos; esta Formación yace discordante a la Formación Santa e infrayace concordante a la Formación Farrat.



Foto 5: Se observa el afloramiento de la Formación Carhuaz que consiste en areniscas rojizas intercalado con arcillitas grises al este del Campo Santo El Naranjo (E: 780911, N: 9273247, C: 2172msnm).

### 3.7.1.1.4 Formación Farrat (Ki- fa)

La litología de la Formación Farrat en el Centro Poblado El Naranjo está compuesta de areniscas cuarzosas blanquecinas, con granulometría que va desde media a gruesa, en algunos lugares del área de investigación presenta superficies rojizas producto de la oxidación y también se observa estratificación sesgada. Estratigráficamente esta Formación Suprayace concordantemente a la Formación Carhuaz.



Foto 6: Se evidencia los estratos de la Formación Farrat que consta de areniscas blanquecinas al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo, aguas abajo (E: 780770, N: 9272604, C: 2174msnm).

### **3.8 GEOMORFOLOGÍA**

#### **3.8.1 Unidades Geomorfológicas**

Los procesos geomorfológicos son de gran importancia debido a su capacidad para transformar el paisaje, se producen como consecuencia de agentes geológicos externos que intensifican la erosión o la acumulación de sedimentos. En el Centro Poblado El Naranjo, destacan diferentes unidades geomorfológicas, entre las cuales sobresalen valles en forma de V, cerros estructurales y abanico aluvial, que configuran el relieve y aportan variedad al entorno natural.

### 3.8.1.1 Valle fluvial

En el Centro Poblado El Naranjo es común observar valles generados por la acción erosiva de las corrientes de agua, cuyo flujo va moldeando el terreno en formas sinuosas. Así, se crean zonas cóncavas debido a la erosión y zonas convexas donde el agua disminuye su velocidad, permitiendo la acumulación de sedimentos.



Foto 7: Se observa valle en forma de V en rocas de la Formación Chimú a lo largo del río Cuchac aguas abajo (E: 781337, N: 9274059, C: 2101msnm).

### 3.8.1.2 Cerro estructural

El relieve del Centro Poblado El Naranjo se caracteriza porque en la gran parte de su extensión de área lo ocupan cerros constituidos por rocas del Grupo Goyllarisquizga.



Foto 8: Cerros estructurales de grandes elevaciones conformadas por rocas del Grupo Goyllarisquizga, a lo largo de la quebrada Hualgayo (E: 781122, N: 9272425, C: 2324msnm).

### **3.8.1.3 Abanico Aluvial**

Los abanicos aluviales se forman en las zonas bajas de áreas montañosas, se crean debido a procesos erosivos. La escorrentía superficial, al fluir por las pendientes, arrastra sedimentos erosionados tanto de suelo como de roca, los cuales se transportan cuesta abajo por acción de la gravedad. A medida que las corrientes pierden velocidad al llegar a terrenos planos, los sedimentos se distribuyen lateralmente, formando una estructura en forma de abanico. La acumulación recurrente de estos materiales con el tiempo determina su espesor y extensión.



Foto 9: Abanico aluvial formado en la parte baja del afloramiento de la Formación Chimú, al margen izquierdo del río Cuchac aguas abajo (E: 780763, N: 9273860, C: 2187msnm).

### **3.8.2 Unidades Morfogenéticas**

En el área de investigación se identificaron unidades morfogenéticas según su altitud y pendiente, es así que teniendo en cuenta la clasificación de Rodríguez (2016), se determinaron las siguientes unidades: planicies, lomadas, laderas y escarpas; las cuales están expuestas constantemente a procesos exógenos como meteorización y erosión. Estas unidades conforman estructuras geológicas formadas por los procesos tectónicos del Cretácico Inferior.

#### **3.8.2.1 Planicies**

Extensión de terreno relativamente uniforme, con cambios morfológicos mínimos y una topografía suavemente ondulada. Presenta erosión actual limitada y presenta pendientes que oscilan entre  $0^{\circ}$  y  $8^{\circ}$ . En el Centro Poblado El Naranjo abarcan áreas relacionadas con depósitos aluviales y fluvio-aluviales, los cuales resultan de la erosión de las rocas presentes y se depositan en diversos lugares. Aunque suelen asociarse al período Cuaternario, pueden encontrarse en cualquier tipo de litología y presentar distintos orígenes y edades.



Foto 10: Planicies formadas en depósitos fluvio-aluviales a la margen derecha del río Cúchac aguas abajo (E: 780841, N: 9273786, C: 2126msnm).

### 3.8.2.2 Lomadas

Las lomadas o colinas se caracterizan por ser elevaciones que generalmente no superan los 150 a 200 metros de altura, con geformas de tendencia cómica, presenta pequeñas elevaciones uniformes y pendientes suaves, oscilando entre  $8^\circ$  y  $20^\circ$ . En El Naranjo estas áreas son utilizadas en parte para actividades como pastoreo, agricultura y ganadería. Desde el punto de vista litológico, se encuentra en formaciones Cretácicas y depósitos Cuaternarios.



Foto 11: Lomada conformada por afloramientos del Grupo Goyllarisquizga con inclinación de  $12^\circ$  al este del cerro denominado Saltur (E: 780865, N: 9273724, C: 2204msnm).

### 3.8.2.3 Laderas

Se refiere a una unidad morfológica que se caracteriza por tener pendientes moderadas, que van desde los  $20^\circ$  hasta los  $50^\circ$ . Estas unidades se encuentran tanto en la margen derecha como en la izquierda del río Cúchac en el Centro Poblado El Naranjo. Están compuestas por formaciones geológicas del Período Cretácico y por depósitos del Cuaternario.

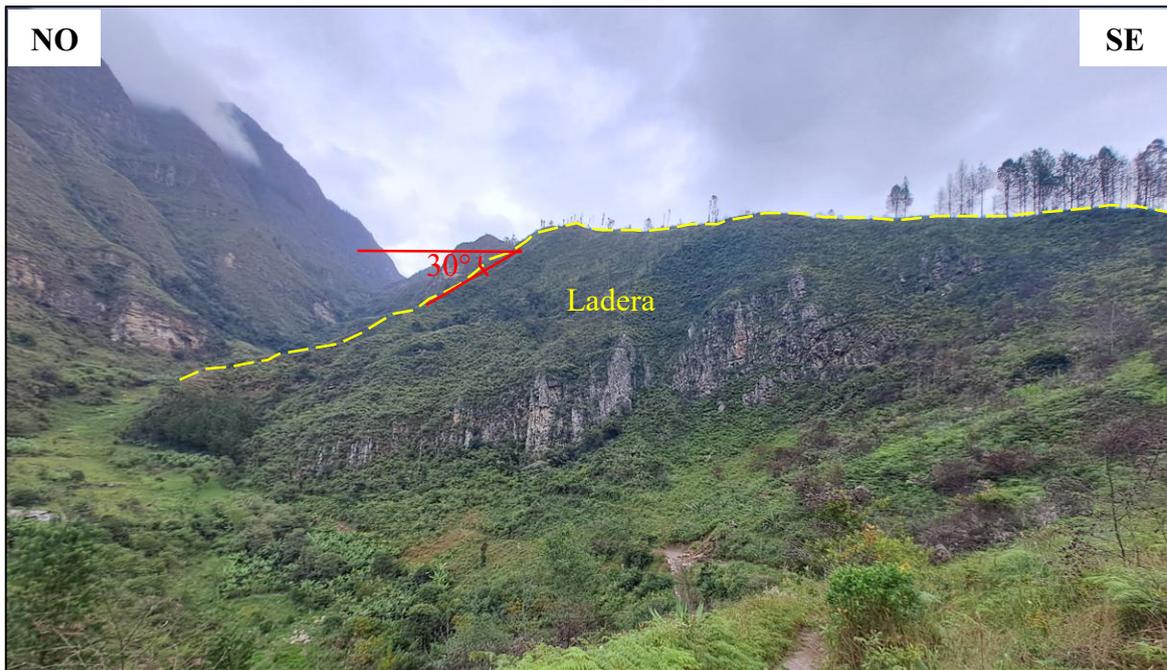


Foto 12: Se observa laderas pronunciadas, con pendientes que oscilan entre los 20° y los 50°, son comunes en esta área y están mayormente vinculadas con actividad tectónica, se encuentra al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo aguas abajo (E: 781350, N: 9272505, C: 2313msnm).

#### 3.8.2.4 Escarpas

Unidades morfo genéticas que se encuentran cubriendo estratos del Grupo Goyllarisquizga, en algunos sectores del Centro Poblado El Naranjo se encuentran con un alto grado de fracturamiento y meteorización; se caracterizan por tener pendientes extremadamente pronunciadas, que van desde los 50° hasta los 90°. Estas áreas de fuertes desniveles presentan mayor inestabilidad por lo que son propensos a deslizamientos. Están compuestas por formaciones geológicas del período Cretácico y depósitos del Cuaternario.



Foto 13: Se observa escarpas bien pronunciados del Grupo Goyllarisquizga al margen derecho del río Cuchac aguas abajo (E: 781604, N: 9273734, C: 2137msnm).

### 3.9 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las estructuras principales en el área de investigación que afectan a las formaciones del Grupo Goyllarisquizga, están vinculadas directamente con la tectónica del Ciclo Andino, caracterizándose por ser de compresión y extensión originando anticlinales y fallas normales respectivamente. Estas estructuras han influido en la disposición de los estratos sedimentarios y en la localización de mantos de carbón, generando plegamientos tanto a nivel regional como local, que se refleja en la tectónica del centro poblado El Naranjo. En el proceso de formación de fallas en el área de investigación, se observa que la ruptura no ocurre de manera inmediata, sino que primero, el material experimenta una flexión progresiva hasta alcanzar su máxima resistencia, momento en el cual se produce la fractura;

en la que se encuentran evidencias de microfallas y microplegamientos, los cuales se formaron durante el proceso de fallamiento.

### 3.9.1 Anticlinal

En la Foto 14 se observa el flanco izquierdo del anticlinal local asimétrico que se encuentra al NE del área de investigación, al margen derecho del río Llaucano aguas abajo, forma parte de una estructura geológica que tiene un azimut de  $80^\circ$  y un buzamiento de  $S30^\circ E$ , se encuentra en areniscas cuarzosas estratificadas de 8m a 10m de espesor, arcillitas y mantos de carbón de la Formación Chimú, lo que sugiere condiciones deposicionales variadas que, junto con los procesos tectónicos, han dado lugar a la estructura plegada. La presencia de mantos de carbón en el anticlinal indica una importante acumulación de materia orgánica durante la formación de estos sedimentos, mientras que las areniscas cuarzosas reflejan ambientes de mayor energía, como antiguos ríos o playas, que transportaron y depositaron el material granular.



Foto 14: Anticlinal local en areniscas, arcillitas y mantos de carbón de la Formación Chimú, al margen derecho del río Llaucano aguas abajo (E: 782082, N: 9272217, C: 2003msnm).

### **3.9.2 Falla Inversa**

La Foto 15 muestra la estructura geológica con una combinación de fallamiento inversa y una componente de falla de rumbo dextral, a lo largo de la quebrada Hualgayo que se comporta como falla con una extensión aproximada de 2.5 Km, nominación que se le ha dado después de una caracterización, análisis e interpretación estructural. Se pueden identificar dos bloques principales como evidencia de la acción tectónica y la deformación intensa que ha generado: El bloque hundido (bloque piso) en el lado NE está desplazado hacia abajo con respecto al bloque elevado (bloque techo) que está al SO, lo que sugiere el movimiento típico de una falla inversa debido a los esfuerzos que provocaron y modelaron el relieve del Grupo Goyllarisquizga.

El trazo de falla que divide ambos bloques está inclinado, lo que confirma la naturaleza inversa de esta falla. Además del movimiento vertical, se observa una componente horizontal dextral, lo que significa que el bloque del lado NE (bloque hundido) se ha movido hacia la derecha respecto al bloque SO (bloque elevado). Este tipo de desplazamiento indica que ha habido un componente lateral de cizalla, lo que sugiere que el área está experimentando tensiones tanto de compresión (falla inversa) como de cizalla (falla de rumbo dextral).

Este tipo de fallamiento compuesto refleja un régimen tectónico compresional con una componente de cizallamiento. Esto puede estar asociado a una zona de acomodación de esfuerzos en la corteza donde las tensiones tectónicas han generado tanto un desplazamiento vertical como lateral. La presencia de estas estructuras es una clara indicación de la deformación activa en la zona de estudio (Ver Plano 04: Plano Geológico).



Foto 15: Se observa una falla con movimiento compuesto inversa dextral, que afecta al Grupo Goyllarisquizga a lo largo de la quebrada Hualgayo (E: 781399, N: 9272308, C: 2198msnm).



Foto 16: Estrías de falla

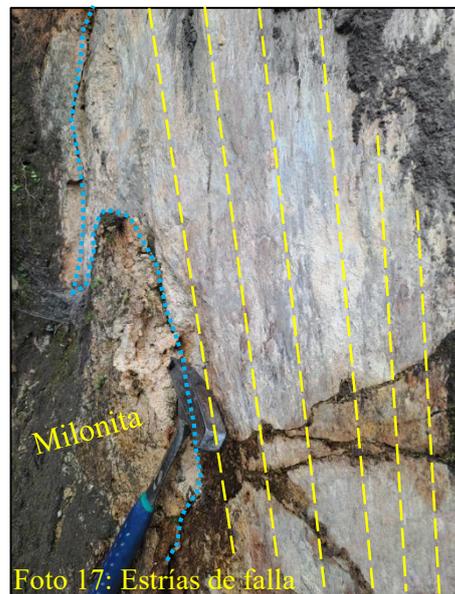


Foto 17: Estrías de falla

En las Fotos 16 y 17 Se observa estrías de falla en areniscas, son los indicadores cinemáticos que demuestran una actividad de deformación muy marcada y que además indican la dirección del movimiento de la falla de comportamiento compuesto descrita en la Foto 15. También se identificó fragmentos de rocas heterogéneas que se encuentra en la zona de falla denominadas milonita, que indican la brechificación de la falla producto de las fuerzas tectónicas.



Foto 18: Pliegues de arrastre formados previos a la formación de la falla inversa, son indicadores cinemáticos que evidencian el movimiento de los bloques producto de las fuerzas tectónicas (E: 781525, N: 9272445, C: 2215msnm).

### **3.10 DESCRIPCIÓN PETROMINERALÓGICA**

Las muestras litológicas descritas a continuación fueron recolectadas de los afloramientos correspondientes a las formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat. Para ello se utilizaron formatos en tablas de clasificación de rocas detríticas, en la que se caracteriza las propiedades físicas y mineralógicas, como también se detalla la ubicación, aspectos generales, elementos texturales y estructurales e interpretación genética de cada muestra.

### 3.10.1 Muestra N° 01

Tabla 7: Descripción y clasificación de la muestra N° 01.

<b>FORMATO DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS DETRÍTICAS</b>		
<b>N° Muestra:</b> 01		<b>E:</b> 781621
<b>N° Carta:</b> 14-g	<b>Coordenadas</b>	<b>N:</b> 9272348
<b>Formación:</b> Chimú	<b>DATUM:</b> WGS-84	
<b>Nombre de carta:</b> Celendín	<b>Localidad:</b> El Naranjo	
	<b>Región:</b> Cajamarca	
<b>I.- ASPECTOS GENERALES</b>		
<b>Color de superficie intemperizada:</b> Gris amarillenta		
<b>Color de superficie fresca:</b> Negro grisáceo		
<b>Brillo:</b> Opaco		
<b>Dureza:</b> 2,5-3		
<b>Porosidad:</b> Presenta		
<b>Raya:</b> Gris blanquecina		
<b>Fractura:</b> Irregular		
<b>Reacción con HCL:</b> No efervescente		
<b>Tenacidad:</b> Frágil		
<b>Grado de consolidación:</b> Consolidado		
<b>II.- ELEMENTOS TEXTURALES Y ESTRUCTURALES</b>		
<b>Tamaño de grano:</b> Fino		
<b>Esfericidad:</b>	<b>Grado:</b> -	
	<b>Coefficiente:</b> -	
<b>Redondez:</b>	<b>Grado:</b> -	
	<b>Coefficiente:</b> -	
<b>Empaquetamiento:</b> -		
<b>Entramado:</b> -		
<b>Madurez textural:</b> Inmadura		
<b>Cementante y/o matriz:</b> Matriz silíceo-limosa		
<b>Selección:</b> Bien seleccionado		
<b>Fábrica:</b> F. clástica		
<b>Componentes del esqueleto:</b> Polimineral		
<b>Color de la matriz:</b> Negro grisáceo		
<b>Estructura sedimentaria:</b> Estratificada		
<b>Interpr. Genética</b>	<b>Agente:</b> Agua	<b>Distancia de afloramiento:</b> 8 m
	<b>Medio sed:</b> Continental	<b>Unidad estratigráfica:</b> Ki-chi
<b>NOMBRE DE LA ROCA:</b> Arcillita limosa negra		<b>Edad:</b> Cretácico-Inferior

Fuente: Adaptado de Arapa, 2019.

### 3.10.2 Muestra N° 02

Tabla 8: Descripción y clasificación de la muestra N° 02.

<b>FORMATO DE CLASIFICACIÓN DE MINERALES</b>		
<b>N° Muestra:</b> 02	<b>Coordenadas</b> <b>E:</b> 781596	
<b>N° Carta:</b> 14-g	<b>N:</b> 9272159	
<b>Formación:</b> Chimú	<b>DATUM:</b> WGS-84	
<b>Nombre de carta:</b> Celendín	<b>Localidad:</b> El Naranjo	
	<b>Región:</b> Cajamarca	
<b>I.- ASPECTOS GENERALES</b>		
<b>Color de superficie intemperizada:</b> Negro opaco		
<b>Color de superficie fresca:</b> Negro brillante		
<b>Brillo:</b> Metálico		
<b>Dureza:</b> 3,5-4		
<b>Raya:</b> Negra		
<b>Fractura:</b> Concoidea		
<b>Reacción con HCL:</b> No efervescente		
<b>Tenacidad:</b> Frágil		
<b>II.- INTERPRETACIÓN GENÉTICA</b>		
<b>Agente:</b> Agua y procesos de carbonización		
<b>Espesor de manto:</b> 1.80 m		
<b>Medio sedimentario:</b> Continental		
<b>Estructura sedimentaria:</b> Estratificada		
<b>Unidad estratigráfica:</b> Ki-chi		
<b>NOMBRE DEL MINERAL:</b> Carbón antracítico		

Fuente: Adaptado de Arapa, 2019.

### 3.10.3 Muestra N° 03

Tabla 9: Descripción y clasificación de la muestra N° 03.

<b>FORMATO DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS DETRÍTICAS</b>		
<b>N° Muestra:</b> 03	<b>Coordenadas</b>	<b>E:</b> 781047
<b>N° Carta:</b> 14-g		<b>N:</b> 9273083
<b>Formación:</b> Carhuaz	<b>DATUM:</b> WGS-84	
<b>Nombre de carta:</b> Celendín	<b>Localidad:</b> El Naranjo	
	<b>Región:</b> Cajamarca	
<b>I.- ASPECTOS GENERALES</b>		
<b>Color de superficie intemperizada:</b> Anaranjado oscuro		
<b>Color de superficie fresca:</b> Anaranjado grisáceo		
<b>Brillo:</b> Opaco		
<b>Dureza:</b> 3,5-4		
<b>Porosidad:</b> Presenta		
<b>Raya:</b> Gris blanquecina		
<b>Fractura:</b> Irregular		
<b>Reacción con HCL:</b> No efervescente		
<b>Tenacidad:</b> Frágil		
<b>Grado de consolidación:</b> Consolidado		
<b>II.- ELEMENTOS TEXTURALES Y ESTRUCTURALES</b>		
<b>Tamaño de grano:</b> Medio		
<b>Esfericidad:</b>	<b>Grado:</b> 4.5	
	<b>Coefficiente:</b> Esférico	
<b>Redondez:</b>	<b>Grado:</b> 2.5	
	<b>Coefficiente:</b> Sub-angular	
<b>Empaquetamiento:</b> Grano sostenido		
<b>Entramado:</b> Contacto cóncavo-convexo		
<b>Madurez textural:</b> Madura		
<b>Cementante y/o matriz:</b> Matriz areno-ferruginosa		
<b>Selección:</b> Bien seleccionado		
<b>Fábrica:</b> F. clástica		
<b>Componentes del esqueleto:</b> Monomineral		
<b>Color de la matriz:</b> Blanca-grisáceo		
<b>Estructura sedimentaria:</b> Estratificada		
<b>Interpr. Genética</b>	<b>Agente:</b> Agua	<b>Distancia de afloramiento:</b> 7 m
	<b>Medio sed:</b> Continental	<b>Unidad estratigráfica:</b> Ki-ca
<b>NOMBRE DE LA ROCA:</b> Arenisca cuarzo ferruginosa		<b>Edad:</b> Cretácico-Inferior

Fuente: Adaptado de Arapa, 2019.

### 3.10.4 Muestra N° 04

Tabla 10: Descripción y clasificación de la muestra N° 04.

<b>FORMATO DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS DETRÍTICAS</b>		
<b>N° Muestra:</b> 04	<b>Coordenadas</b>	<b>E:</b> 780804
<b>N° Carta:</b> 14-g		<b>N:</b> 9272608
<b>Formación:</b> Farrat	<b>DATUM:</b> WGS-84	
<b>Nombre de carta:</b> Celendín	<b>Localidad:</b> El Naranjo	
<b>Región:</b> Cajamarca		
<b>I.- ASPECTOS GENERALES</b>		
<b>Color de superficie intemperizada:</b> Naranja oscuro		
<b>Color de superficie fresca:</b> Anaranjado		
<b>Brillo:</b> Metálico		
<b>Dureza:</b> 4,5-5		
<b>Porosidad:</b> Presenta		
<b>Raya:</b> Gris blanquecina		
<b>Fractura:</b> Irregular		
<b>Reacción con HCL:</b> No efervescente		
<b>Tenacidad:</b> Frágil		
<b>Grado de consolidación:</b> Consolidado		
<b>II.- ELEMENTOS TEXTURALES Y ESTRUCTURALES</b>		
<b>Tamaño de grano:</b> Medio-grueso		
<b>Esfericidad:</b>	<b>Grado:</b> 4.5	
	<b>Coefficiente:</b> Esférico	
<b>Redondez:</b>	<b>Grado:</b> 3.5	
	<b>Coefficiente:</b> Sub-redondeado	
<b>Empaquetamiento:</b> Grano sostenido		
<b>Entramado:</b> Contacto cóncavo-convexo		
<b>Madurez textural:</b> Madura		
<b>Cementante y/o matriz:</b> Matriz arenosa		
<b>Selección:</b> Bien seleccionado		
<b>Fábrica:</b> F. clástica		
<b>Componentes del esqueleto:</b> Monomineral		
<b>Color de la matriz:</b> Gris blanquecina		
<b>Estructura sedimentaria:</b> Estratificada		
<b>Interpr. Genética</b>	<b>Agente:</b> Agua	<b>Distancia de afloramiento:</b> 8 m
	<b>Medio sed:</b> Continental	<b>Unidad estratigráfica:</b> Ki-fa
<b>NOMBRE DE LA ROCA:</b> Arenisca cuarzosa		<b>Edad:</b> Cretácico-Inferior

Fuente: Adaptado de Arapa, 2019.

### 3.11 MANTOS DE CARBÓN EN LA FORMACIÓN CHIMÚ

La Formación Chimú en el Centro Poblado El Naranjo se desarrolló en un ambiente sedimentario caracterizado por pantanos poco profundos situados en llanuras costeras. En estas aguas someras probablemente creció una densa vegetación que cubrió gran parte de los pantanos. Los sedimentos que se empezaron a depositar eran de granulometría finos principalmente arenas y arcillas, acompañadas de una considerable cantidad de materia orgánica derivada de restos vegetales. En estas zonas pantanosas, las condiciones reductoras favorecieron la formación de turberas, donde el agua presentaba niveles muy bajos de oxígeno, iniciando de esta manera el proceso de formación de carbón; a lo largo de este proceso, también se observa la presencia de zonas alteradas por contaminación con arcillas u otros sedimentos, que durante la litificación se manifestaron como láminas onduladas.

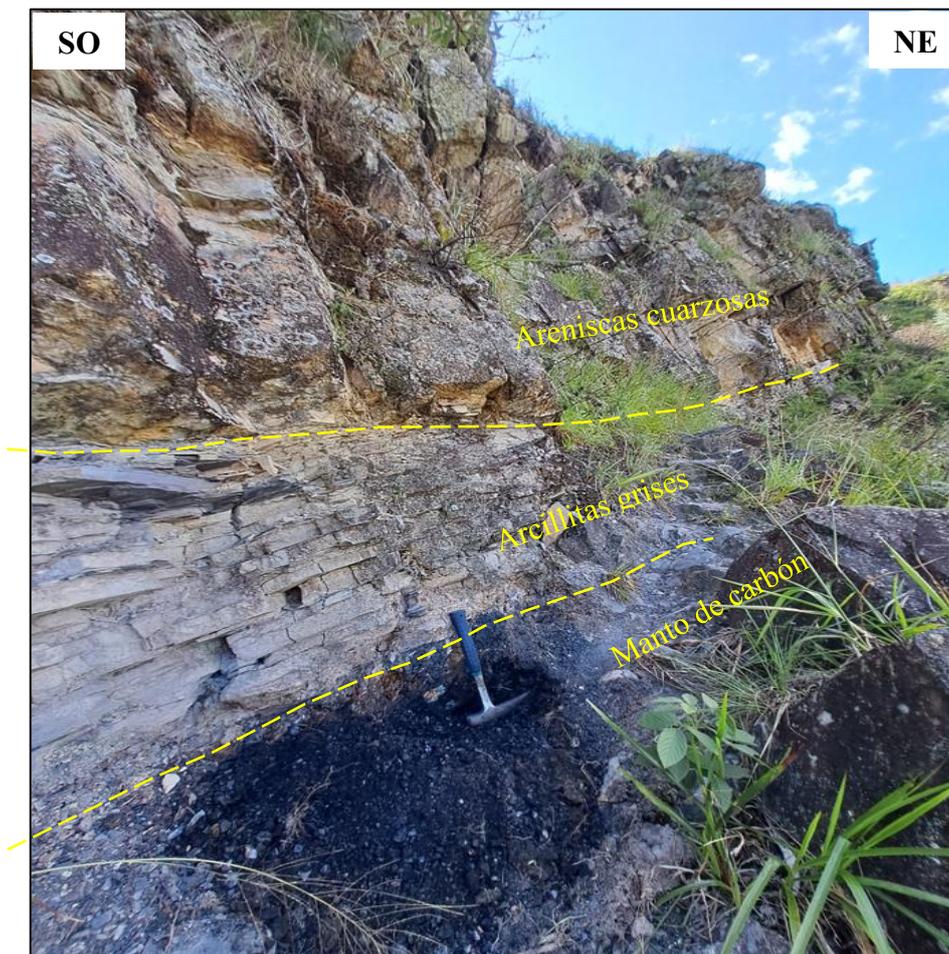


Foto 19: Se observa mantos de carbón en la parte inferior de la Formación Chimú, en la parte superior se caracteriza por las arcillitas grises y areniscas cuarzosas, al margen izquierdo de la quebrada Hualgayo (E: 781627, N: 9272342, C: 2168msnm).



Foto 20: Se observa carbón tipo bituminoso que ha sido contaminado por arcillas transportadas, así como por la formación de óxidos resultado de procesos de precipitación química, al margen izquierdo de la carretera con dirección al norte, en el lugar denominado La Curva (E: 781814, N: 9273582, C: 2075msnm).

Los mantos de carbón de la Formación Chimú generalmente forman secuencias estratigráficas características conocidas como intercalaciones sedimentarias, que son secuencias litológicas que se repiten a lo largo del tiempo. Estas intercalaciones están compuestas por capas de arcillitas, areniscas y carbón. Aunque no todas estas secuencias contienen depósitos de carbón económicamente explotables, es por tal motivo que, el estudio de estas secuencias permite una mejor comprensión de la formación de dichos depósitos. Debido a esta estructura estratigráfica, el carbón frecuentemente forma mantos extensos, con un espesor que varía desde unos pocos centímetros hasta dos metros aproximadamente; los cuales fueron sometidos a intensos eventos tectónicos que produjeron plegamientos de considerables tamaños como también fallas normales, de rumbo dextral y sinistral que han desplazados los mantos de carbón en niveles diferentes.



Foto 21: Se observa capas delgadas de carbón plegadas, lisas y astillosas, con bandas mates y brillosas, en un ambiente de sedimentación regresivo, al margen izquierdo de la carretera con dirección al norte, en el lugar denominado La Rangra (E: 781797, N: 9273612, C: 2070msnm).



Foto 22: Se evidencia que el manto de carbón presenta en algunas partes forma lenticular, con superficies mates y brillantes, característico de sistemas deltaicos donde la materia orgánica se entierra y sufre procesos de diagénesis extrema, dando lugar a la formación de antracita, en la labor El Shala (E: 781657, N: 9272115, C: 2174msnm).



Foto 23: Se puede observar el paralelismo de los planos de estratificación del manto de carbón de 1.80m de espesor con arcillitas y areniscas cuarzosas, este tipo de formación con origen de plegamientos es probablemente de origen tectónico, en la labor El Zorro (E: 781600, N: 9272153, C: 2170msnm).

### 3.12 MUESTREO

La recolección de las 06 muestras representativas de las unidades mineras artesanales del Centro Poblado El Naranjo se llevó a cabo de manera que la distribución de las variables físicas y químicas fuera equivalente y se pueda determinar de manera confiable la calidad del carbón. Para esta investigación, se realizó un muestreo de canal, obteniendo la muestra mediante un corte uniforme y continuo perpendicular a la estratificación. Se utilizaron bolsas de polietileno gruesas para cada muestra, las cuales fueron identificadas con un rótulo indeleble y un código único para su rápida identificación.

El método de explotación de los mantos de carbón en el área de estudio es por medio de socavón haciendo uso de técnicas artesanales, por lo que limita el movimiento dentro de las labores mineras.



Foto 24: A: Bocamina El Zorro. B: Se realizó el reconocimiento de la labor, hastial izquierdo con puntal de madera. C: Caracterización petromineralógica en interior mina, entrando al hastial izquierdo (E: 781603, N: 9272149, C: 2069msnm).



Foto 25: Observación, descripción y muestreo por canal de los mantos de carbón en interior de la mina El Zorro (E: 781603, N: 9272149, C: 2069msnm).



Foto 26: Se observa una sección detallada de 1.80 m x 2 m de los mantos de carbón al interior de la mina El Zorro, sección que varía de acuerdo a las condiciones del terreno; entrando en el hastial izquierdo (E: 781603, N: 9272149, C: 2069msnm).

Tabla 11: Ubicación de las muestras extraídas de los mantos de carbón, para su posterior análisis en laboratorio.

CÓDIGO DE MUESTRA	ESTE	NORTE	COTA (msnm)
M1	781 557	9 272 188	2171
M2	781 517	9 272 964	2208
M3	781 619	9 272 209	2160
M4	781 604	9 272 429	2239
M5	781 381	9 273 129	2200
M6	781 169	9 273 778	2248



Foto 27: Se evidencia las 06 muestras representativas extraídas de diferentes puntos de los mantos de carbón, con su respectiva codificación para su rápida identificación.

### 3.13 TRABAJO DE LABORATORIO

Los parámetros fisicoquímicos de las muestras de carbón extraídas de las unidades mineras artesanales del Centro Poblado El Naranjo, se determinaron en el Laboratorio GINGECONSULT & LAB S.R.L. El proceso de preparación se realizó siguiendo el procedimiento establecido por dicho laboratorio basado en la Norma ASTM D2013-07, que

especifica las instrucciones para reducir y dividir la muestra bruta hasta un tamaño y masa adecuados para la realización de las pruebas.

### 3.13.1 Humedad

Para determinar la humedad del carbón, se utilizó el procedimiento del laboratorio GINGECONSULT & LAB S.R.L, el cual se basa en la Norma ASTM D 3302-07. Esta norma especifica la medición de la humedad total del carbón tal como se encuentra en el lugar y momento del muestreo, bajo las condiciones específicas del mismo.

El porcentaje de humedad se calcula con la siguiente ecuación:

$$\%h = \frac{(P_i - P_s) \times 100}{P_i}$$

Donde:

$\%h$  = Porcentaje de humedad

$P_i$  = Peso inicial = peso húmedo

$P_s$  = Peso seco

### 3.13.2 Determinación de cenizas

Para determinar el análisis de cenizas, se utilizó el procedimiento del laboratorio GINGECONSULT & LAB S.R.L, basado en la Norma ASTM D 3174-04, que define la ceniza como el residuo que permanece tras quemar el carbón a 750 °C. Cabe resaltar que la ceniza obtenida tiene una composición diferente a la de los componentes inorgánicos del carbón original.

$$\%C = \frac{((P_c + P_{mc}) - P_{cv}) \times 100}{P_{mh}}$$

Donde:

$\%C$  = Porcentaje de ceniza

$P_c$  = Peso del crisol

$P_{mc}$  = Peso muestra calcinada

$P_{cv}$  = Peso del crisol vacío

$P_{mh}$  = Peso muestra húmeda

Para corrección de los resultados en base seca, se determina un factor de corrección ( $F_c$ ) a partir de la humedad residual de las muestras según la Norma ASTM D 3173-07. Para esto, se pesa un gramo de carbón (con una precisión de  $\pm 0.1$  mg) en un crisol de porcelana y se coloca en un secador a una temperatura de 107-110 °C durante una hora. Luego, se aplica la ecuación del Factor de Corrección, la cual se utiliza para determinar todos los valores en base seca.

$$F_c = \frac{(P_c + P_{ms}) - P_c}{P_{mh}}$$

Donde:

$F_c$  = Factor de corrección

$P_c$  = Peso del crisol

$P_{ms}$  = Peso muestra seca

$P_{mh}$  = Peso muestra húmeda

Entonces, el porcentaje de ceniza en base seca se calcula con la siguiente ecuación:

$$\%C_{bs} = \frac{\%C_{bh}}{F_c}$$

Donde:

$\%C_{bs}$  = Ceniza en base seca

$\%C_{bh}$  = Ceniza en base húmeda

$F_c$  = Factor de corrección

Para el porcentaje de carbono fijo en base seca se determina con la siguiente ecuación:

$$\%Cf = 100 - (\%C_{bs} + \%Mv_{bs})$$

Donde:

$\%Cf$  = Porcentaje de carbono fijo

$\%C_{bs}$  = Porcentaje de cenizas en base seca

$\%Mv_{bs}$  = Porcentaje de materia volátil en base seca

### 3.13.3 Determinación de materia volátil

Para determinar la materia volátil se utilizó el procedimiento estandarizado del laboratorio GINGECONSULT & LAB S.R.L, basado en la Norma ASTM D 3175-89, este método que es empírico mide los productos gaseosos, excluyendo el vapor de humedad, y utiliza un factor de corrección basado en la norma ASTM D3180, volumen 05.06, para obtener una base seca teórica. La materia volátil se define como la porción del carbón que se libera en forma de gas o vapor al calentarse, incluyendo hidrocarburos y otros gases.

$$\%Mv_{bh} = \frac{(Pm - Pr) \times 100}{Pm}$$

Donde:

$\%Mv_{bh}$  = Porcentaje de materia volátil en base húmeda

$Pm$  = Peso de la muestra en gramos

$Pr$  = Peso del residuo

La corrección a una base seca del porcentaje de materia volátil se determina con la siguiente ecuación:

$$\%Mv_{bs} = \frac{\%Mv_{bh} - H}{Fc}$$

Donde:

$\%Mv_{bs}$  = Porcentaje de materia volátil en base seca

$\%Mv_{bh}$  = Porcentaje de materia volátil en base húmeda

$H$  = % Humedad de análisis

$Fc$  = Factor de corrección

$$H = (1 - Fc) \times 100$$

Donde:

$H$  = % Humedad de análisis

$Fc$  = Factor de corrección

### 3.13.4 Determinación de azufre

Para determinar el azufre se utilizó el procedimiento estandarizado del laboratorio GINGECONSULT & LAB S.R.L, basado en la Norma ASTM 4239-05, por lo que se aplicó la siguiente ecuación para conocer el porcentaje de azufre en base seca.

$$\%S_{bs} = \frac{\%S_{bh}}{Fc}$$

Donde:

$\%S_{bs}$  = Porcentaje de azufre en base seca

$\%S_{bh}$  = Porcentaje de azufre en base húmeda

$Fc$  = Factor de corrección

### **3.13.5 Determinación de poder calorífico**

El poder calorífico de las muestras de carbón extraídas de las unidades mineras artesanales se determinó según el procedimiento del laboratorio GINGECONSULT & LAB S.R.L, basado en la Norma ASTM D5865; en la que la energía liberada por el carbón es determinada por el incremento de temperatura del agua del cubo utilizando el software del equipo proporcionado por el laboratorio.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 RESULTADOS**

##### **4.1.1 Análisis de la geología local y proceso sedimentario**

En el Centro Poblado El Naranjo se ha identificado la presencia del Grupo sedimentario Goyllarisquizga, el cual corresponde al Cretácico inferior. Dentro del que se han distinguido las formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat, aunque en la Formación Santa, solo se han identificado afloramientos en lugares específicos del área de investigación debido a que está cubierta en su gran mayoría de extensión lateral por depósitos más recientes del Cuaternario o que aflora en lugares donde es inaccesible debido a la topografía agreste del lugar.

Durante la investigación, se encontraron evidencias de depositación con materia orgánica, lo que en el contexto geológico sugiere la existencia de un ambiente propicio para la formación de mantos de carbón. Sin embargo, es la Formación Chimú la que alberga cinco mantos de carbón, con características bituminosas y antracíticas. De estos mantos, solo dos presentan diferencias que los hacen viables para la explotación económica: uno con un espesor de 1.80 m y otro con un espesor que varía entre 0.90 m y 1.00 m, Manto 5 y 2 respectivamente (Ver Plano 04: Plano Geológico). La presencia de estos dos mantos explotables es de especial interés, ya que su desarrollo aporta implicaciones económicas significativas para la población del centro poblado El Naranjo, debido a que de acuerdo a las muestras extraídas y a los resultados entregados por el laboratorio GINGECONSULT & LAB S.R.L la calidad del carbón es favorable y rentable, por lo que se debería hacer estudios más detallados para evaluar la extensión de estos mantos ya que aún hay zonas que no se han explorado.

#### **4.1.2 Génesis de los mantos de carbón**

En el área de investigación se observa el alineamiento de la estratificación de la roca encajonante con los mantos de carbón, el paralelismo con los estratos subyacentes y suprayacentes indica que la depositación de materia orgánica y su posterior transformación en carbón fue favorable debido al tiempo, presión, y temperatura que ocurrieron en intervalos estratigráficos específicos, bajo condiciones relativamente estables de sedimentación; esta uniformidad sugiere una continuidad del ambiente sedimentario durante un período de tiempo suficiente para permitir la acumulación de grandes volúmenes de materia orgánica.

El tectonismo juega un papel crucial en la formación y preservación de estos mantos, en el contexto de la Formación Chimú, influyó en la configuración de la cuenca sedimentaria creando subsidencias locales al generar áreas de baja energía y anóxicas; además, el tectonismo postdeposicional afectó su integridad y geometría; como también las estructuras geológicas, como pliegues y fallas, al haber deformado los mantos, alterando su espesor y continuidad lateral. Sin embargo, el hecho de que dos mantos presenten características que los hacen económicamente explotables, con espesores de 1.80 m y 0.90-1.00 m, sugiere que, a pesar del tectonismo han mantenido una estructura lo suficientemente robusta para su explotación; lo que indica que las variaciones en la tasa de sedimentación, el aporte de materia orgánica o los episodios tectónicos afectaron de manera desigual a los diferentes niveles estratigráficos. Por esta razón, se atribuye que la génesis del carbón en el centro poblado El Naranjo es de origen singenético formando parte de la secuencia sedimentaria con edad entre el Berriasiano y parte del Valanginiano.

#### **4.1.3 Petromineralogía y estratigrafía de los mantos de carbón**

La intercalación de areniscas cuarzosas de grano grueso a medio, textura sub-redondeada, secuencia granodecipientes (mayores granos en la base y disminución hacia el tope) y arcillitas de facies finas y carbonosas con laminación planar y trazas de fósiles de la Formación Chimú, junto con los mantos de carbón, indica ciclos de sedimentación que están relacionados con cambios climáticos o con oscilaciones del nivel del mar en el pasado geológico; esta transición gradual a arcillitas o areniscas más finas indican el cambio progresivo hacia la entrada a una nueva unidad estratigráfica (Ver Plano-07: Columna estratigráfica de las secuencias sedimentarias del carbón en la Formación Chimú).

La explotación artesanal de carbón por los pobladores del Centro Poblado el Naranjo destaca la importancia económica de esta Formación. Además, la descripción de fósiles de tallos y hojas en las arcillitas proporciona evidencia de las condiciones ambientales durante la depositación, útil para datar las capas y reconstruir el paleoambiente.

La cubierta de depósitos cuaternarios implica un área potencial para futuras investigaciones geológicas con el fin de identificarla mediante técnicas de sondeo. La discordancia entre la Formación Carhuaz de areniscas rojizas y arcillitas con la Formación Santa indica un posible periodo de no depositación o erosión, seguido por la sedimentación de nuevos materiales bajo condiciones diferentes; esto debido a cambios en el nivel del mar, probablemente la regresión del mar durante el período entre el Valanginiano y el Hauteriviano causó que las áreas previamente cubiertas de sedimentos marinos experimentaran erosión y exposición, generando una pausa en la deposición de sedimentos; o que las tensiones tectónicas propias del Ciclo Andino provocaron deformaciones y elevaciones en la corteza terrestre que expusieron la Formación Santa a la erosión antes de la deposición de la Formación Carhuaz.

La gran acumulación de sedimentos de la Formación Farrat compuesta por areniscas cuarzosas blanquecinas, sugiere una historia depositacional prolongada, posiblemente asociada a una cuenca sedimentaria en expansión. La estratificación sesgada indica la acción de corrientes de agua o viento, lo que podría relacionarse con un sistema de depósitos eólicos o fluviales.

#### **4.1.4 Análisis cinemático estructural**

Se ha identificado estructuras tectónicas importantes que han afectado las formaciones del Grupo Goyllarisquiza, en particular a los mantos de carbón de la Formación Chimú. Los resultados geológicos observados, como el anticlinal local, fallas inversas y normales, son evidencia de un régimen tectónico mixto, caracterizado por compresión y extensión, que se vincula al Ciclo Andino.

El anticlinal ubicado al NE del área de estudio es una estructura clave para interpretar la historia tectónica y sedimentaria del Centro Poblado El Naranjo. El plegamiento de las areniscas cuarzosas, arcillitas y los mantos de carbón sugiere un proceso de compresión que probablemente ocurrió durante la Fase Andina de deformación. Las características del anticlinal, como el azimut de 80° y el buzamiento de S30°E, reflejan un plegamiento regional y por ende local que ha modificado la disposición original de los sedimentos, concentrando

las capas de carbón en zonas específicas, influenciando en la calidad y espesor de los mantos de carbón.

La falla normal observada en el área de investigación muestra un claro desplazamiento vertical y horizontal dextral. Este movimiento está relacionado con un régimen de extensión, típico de áreas en las que la corteza terrestre se adelgaza debido a tensiones tectónicas, posiblemente asociadas con la fase de extensión post-compresiva del Ciclo Andino.

La componente de cizalla dextral que acompaña a la falla normal sugiere que, además de la extensión vertical, también hubo un desplazamiento horizontal significativo, lo que demuestra que la deformación en el área fue compleja y compuesta. La presencia de estrías de falla en las areniscas es un indicador clave de los movimientos tectónicos, ya que estas marcas cinemáticas muestran la dirección y el tipo de movimiento de los bloques durante el fallamiento tanto normal como inverso.

La observación de microplegamientos y microfallas en la zona de estudio indica que la deformación no solo se produjo a gran escala, sino también a nivel local y detallado. Estos micropliegues son el resultado de fuerzas tectónicas continuas que actuaron sobre los sedimentos incluso antes de que las fallas principales se formaran completamente. Los pliegues de arrastre observados cerca de la falla inversa y normal son un indicio de cómo las fuerzas de compresión y extensión interactuaron para deformar las rocas de manera gradual, antes de que ocurriera la ruptura principal.

La identificación de milonita en la zona de falla es otra evidencia de la intensidad de la deformación. Las milonitas son productos de la recristalización de rocas bajo fuertes fuerzas tectónicas, lo que indica que las zonas de falla experimentaron fricción intensa y transformación de las rocas a nivel microscópico, lo que refuerza la idea de una actividad tectónica activa y continua que se ha producido en el área de investigación.

#### **4.1.5 Análisis de muestras de laboratorio**

Los resultados de cada análisis efectuado a las seis muestras de carbón se detallan en la Tabla 12, en la que se observa que el poder calorífico varía inversamente proporcional con el porcentaje de cenizas; para la presente investigación se ha combinado los resultados de los parámetros y comparado con las tablas de las Normas ASTM para carbón, y de esta manera darle la clasificación que le corresponde a cada muestra.

Tabla 12: Resultados de los análisis en laboratorio de las muestras de carbón para los parámetros de contenido de humedad, porcentaje de azufre, poder calorífico, porcentaje de ceniza y sustancias volátiles.

N°	MUESTRA	HUMEDAD (%)	AZUFRE (%)	PODER CALORÍFICO Kcal/Kg	CENIZA (%)	SUSTANCIAS VOLÁTILES (%)
1	M-1	9.60	0.33	6925.00	14.92	2.9
2	M-2	8.81	0.29	7325.00	13.92	3.0
3	M-3	8.10	0.22	7420.00	13.76	2.3
4	M-4	9.30	0.30	6934.00	14.60	2.8
5	M-5	8.20	0.25	6910.00	15.32	2.6
6	M-6	8.45	0.31	7315.00	13.86	3.0

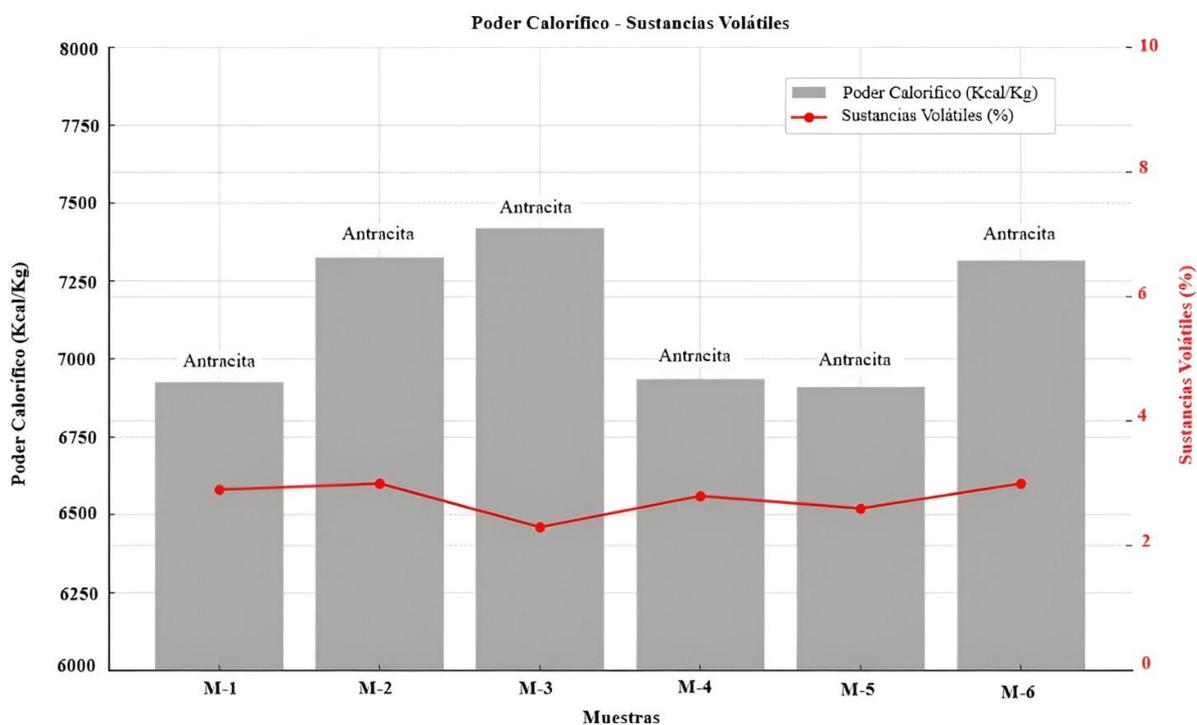


Figura 6: Se observa que todas las 06 muestras cumplen con el criterio de clasificación por rangos como antracita según ASTM D388, al hacer un análisis comparativo del poder calorífico, contenido de carbono fijo y las sustancias volátiles se verifica que cumplen los parámetros establecidos y que son mayor a 6900 Kcal/Kg y menor a 8% de sustancias volátiles.

#### **a. Poder Calorífico (ASTM D 5865)**

Según la Norma ASTM D388, para clasificar una muestra por rangos se debe tener en cuenta que el poder calorífico debe ser superior a 6900 Kcal/kg y la materia volátil menor o igual que 8%. Las muestras M-2 con 7325 Kcal/kg, M-3 con 7420 Kcal/kg, y M-6 con 7315 Kcal/kg cumplen con este criterio y están dentro de los parámetros establecidos, lo que les permite ser clasificadas como antracita de buena calidad. Las muestras M-1 con 6925 Kcal/kg, M-4 con 6934 Kcal/kg, y M-5 con 6910 Kcal/kg están con valores próximos al límite inferior de clasificación, pero cumplen con los parámetros para su clasificación como antracita de menor calidad.

#### **b. Sustancias Volátiles (ASTM D 3175)**

Para que un carbón sea clasificado como antracita, el contenido de sustancias volátiles debe ser inferior o igual a 8% según la Norma ASTM D388, para la presente investigación según la Tabla 12, todas las muestras cumplen con este criterio, presentando valores muy bajos que varían entre 2.3% a 3%, lo cual es característico de la antracita por estar dentro de este rango; además, es una ventaja ya que indica un comportamiento más estable durante la combustión, con menos emisiones de gases y partículas volátiles.

#### **c. Azufre (ASTM D 4239)**

Un contenido bajo de azufre es deseable en cualquier tipo de carbón, ya que contribuye a reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) durante la combustión, lo cual es favorable desde el punto de vista ambiental; además, es importante para estimar la calidad en relación con las especificaciones industriales, los criterios de compra venta de carbón metalúrgico determinan que no debe exceder el 1.5%; por lo anterior todas las muestras de la Tabla 12 presentan un contenido de azufre bajo que varía entre 0.22% a 0.33% lo que significa que son recomendables para mezclas de carbón metalúrgico ya que no incrementarán considerablemente el porcentaje del mismo en la mezcla.

#### **d. Cenizas (ASTM D 3174)**

El contenido de cenizas varía entre las muestras de 13.76% hasta 15.32% de M3 y M5 respectivamente de la Tabla 12, pero no es un factor determinante en la clasificación según la Norma ASTM D388. Aunque estos valores son relativamente altos, este parámetro no afecta la clasificación de antracita, que se basa más en el poder calorífico y el contenido de

sustancias volátiles; ya que, las muestras con alto contenido de cenizas tendrán un menor poder calorífico y pueden producir más residuos sólidos, lo que puede ser un inconveniente en términos de su manejo y disposición, además esto reduce la eficiencia del carbón en aplicaciones energéticas.

#### **e. Humedad (ASTM D 3302)**

La humedad es un parámetro importante porque afecta la eficiencia de combustión y el poder calorífico del carbón, ya que parte de la energía liberada se utiliza para evaporar el agua, también influye en el manejo, ya que el exceso de agua puede aumentar los costos de transporte y deteriorar la calidad durante el almacenamiento. En la presente investigación la Tabla 12 presentan los siguientes valores: M-1 con 9.60%, M-2 con 8.81%, M-3 con 8.10%, M-4 con 9.30%, M-5 con 8.20%, y M-6 con 8.45%; con estos resultados se evidencia que el porcentaje de humedad es moderada en todas las muestras, lo que podría afectar su comportamiento durante la combustión, no es un parámetro crítico para la clasificación de la antracita.

Los parámetros analizados en las seis muestras como el contenido de humedad, cenizas, materia volátil, contenido de azufre, poder calorífico y de acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio GINGECONSULT & LAB S.R.L., sirven para determinar la calidad de los mantos de carbón del Centro Poblado El Naranjo. El cumplimiento de los estándares y procedimientos de la Norma ASTM para cada parámetro es vital importancia para de esta manera obtener resultados confiables. Estas muestras garantizan procedimientos de prueba uniforme, lo que permite que los resultados sean comparables en varios análisis. Cada estándar especifica metodologías que ayudan a reducir los errores. El cumplimiento de estos es crucial para la aceptación de los resultados de los análisis en la industria y el comercio.

## **4.2 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS**

Con la investigación se demostró que las características geológicas y fisicoquímicas de los mantos de carbón en el Centro Poblado El Naranjo, distrito de Chalamarca, Provincia de Chota, están relacionadas con la génesis considerando parámetros fundamentales como presión, temperatura y tiempo geológico a la que fue sometida la materia orgánica, de modo que, estas condiciones determinaron el grado de metamorfismo, dando como resultado dos tipos de carbón como el bituminoso y antracítico diferenciados por intervalos de características fisicoquímicas; teniendo en cuenta procesos geodinámicos como erosión, transporte, sedimentación y fuerzas tectónicas que actuaron sobre la superficie terrestre en el proceso de orogénesis, modelando las estructuras geológicas del grupo Goyllarisquizga, demostrando así que los mantos de carbón es de origen singenético tomando como evidencia el paralelismo de sedimentación a la roca encajonante. De esta manera se corrobora la hipótesis inicialmente planteada y coincidiendo con la interpretación de Mantilla 2022, quién sostiene que los mantos de carbón tienen formación secuencial con la roca encajonante y que los desplazamientos y deformaciones influenciaron directamente en estos.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

Se determinó la presencia de cinco mantos de carbón de ambiente transicional deltaico distal de baja profundidad; en depresiones lacustres donde se depositaron los sedimentos que conforman la Formación Chimú, de los cuales dos presentan características fisicoquímicas favorables y espesor de 1.80 m (Manto 5) y 0.90-1.00 m (Manto 2) que los hacen viables para su explotación económica.

Se estableció que los estratos de las rocas encajonantes arcillitas y areniscas cuarzosas de la Formación Chimú presentan secuencia paralela con los mantos de carbón de origen singenético, además está asociado a condiciones favorables de sedimentación y grado de metamorfismo, influenciado por la tectónica de la región, que también alteró su geometría y distribución de los mantos.

La estructura tectónica, dominada por un anticlinal y fallas normales e inversas, sugiere un régimen de compresión y extensión que afectó la configuración y calidad de los mantos de carbón, concentrando los recursos en zonas específicas.

Las seis muestras analizadas por rangos de acuerdo a la categorización de las Normas ASTM D388, mostraron que están dentro de los parámetros de antracita, con poder calorífico superior a 6900 Kcal/kg y un bajo contenido de sustancias volátiles ideal para aplicaciones que requieren estabilidad durante la combustión; el bajo contenido de azufre es positivo desde un punto de vista ambiental, lo que favorece su uso industrial.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

A las empresas mineras dedicadas a la explotación de carbón en el área de investigación se recomienda realizar estudios geológicos detallados en áreas no exploradas para definir la extensión lateral completa de los mantos de carbón, especialmente en las zonas cubiertas por depósitos cuaternarios para determinar su continuidad y poder proyectarlos con base al análisis cinemático estructural y así poder correlacionar los posibles mantos inferidos.

A los supervisores de las labores de explotación de carbón del Centro Poblado El Naranjo, se recomienda mejorar los sistemas de extracción y seguridad, garantizando la secuencia de las operaciones y minimizando los riesgos inherentes a este tipo de labores mineras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altamirano, C. (2008). El carbón ¿Garantía del futuro energético? Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 16(3), 229-238.
- Arana, M. (2018). Selección y aplicación del método de explotación del carbón en el manto Chimú – La Libertad Black Hill Company S.A.C. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú. 137 p.
- Arapa, V. (2019). Manual de prácticas de Petrología. Universidad Nacional de Cajamarca; 23 p.
- Arellano, M. (2002). Introducción a la tectónica global y geología estructural. Editorial Académica Española.
- ASTM D2013. (2012). Práctica estándar para la preparación de muestras de carbón para análisis. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D2013.htm>
- ASTM D3172. (2013). Práctica estándar para el análisis próximo de carbón y coque. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3172.htm>
- ASTM D3173. (2017). Método de prueba estándar para la humedad en la muestra de análisis de carbón y coque. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3173.htm>
- ASTM D3174. (2012). Método de prueba estándar para ceniza en la muestra de análisis de carbón y coque. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3174.htm>
- ASTM D3175. (2017). Método de prueba estándar para materia volátil en la muestra de análisis de carbón y coque. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3175.htm>

- ASTM D3180. (2015). Práctica estándar para el cálculo de análisis de carbón y coque según determinadas bases. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3180.htm>
- ASTM D3302. (2017). Método de prueba estándar para la humedad total en carbón. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3302.htm>
- ASTM D388. (2017). Clasificación estándar de carbones por rango. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D388.htm>
- ASTM D4239. (2017). Método de prueba estándar para azufre en la muestra de análisis de carbón y coque usando combustión en horno de tubo a alta temperatura. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D4239.htm>
- ASTM D5865. (2013). Método de prueba estándar para el valor calorífico bruto de carbón y coque. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D5865.htm>
- ASTM D720. (2015). Método de prueba estándar para el índice de hinchamiento libre del carbón. ASTM International, West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D720.htm>
- Boggs, S. (2011). Principios de sedimentología y estratigrafía (5.<sup>a</sup> ed.). Pearson Education.
- Cely, E. (2016). Caracterización geológica y fisicoquímica de los carbones explotados por la empresa Intercarbon Mining S.A.S. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. 104 p.
- Cortes, V. (2001). Libro verde de la energía: el papel de los combustibles fósiles. Club Español de Energía.
- Deschamps, et al. (2017). Los estratos carboníferos del Grupo Mannville del Cretácico Inferior (cuenca sedimentaria canadiense occidental, centro sur de Alberta). Parte 1: Arquitectura estratigráfica y factores de control de la distribución del carbón. Revista Internacional de geología del carbón, vol. (179). 113-129.

- Durán, M. (1993). Exploración e inventario minero por carbón en la región carbonífera de Coahuila. Memorias de la XX Convención de la AIMMGM, Acapulco, Gro. México.
- Figuroa, D. (2022). Incremento de producción de carbón mediante el diseño y aplicación del método inclinados y subniveles en Unidad Minera Pampahuay de Obras Civiles y Mineras S.A.C. Universidad Nacional den Centro del Perú, Perú. 97 p.
- Flores, E. (2015). Geología y reservas de los yacimientos de carbón en la República Mexicana, en Salas, G.P. (Editor) Geología de México: México. Fondo de Cultura Económica.
- Flores, et al. (2016). Geología y geoquímica de la cuenca carbonífera de la zona de San Javier -Tecoripa, Sonora (México). XXVI Congreso Nacional de Geoquinnica. ISSN-Latindex. 150-152 p. Geological Survey of Canada, vol. 90, No 11.
- Infante, H. (2019). Evaluación del método de explotación en la extracción de carbón de piedra en la mina Tuco – Bambamarca. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. 97 p.
- Kabe, et al. (2004). Carbón y compuestos relacionados con el carbón: estructuras, reactividad y reacciones catalíticas en Estudios en ciencia de superficie y catálisis. Kodansha. Tokyo. Vol. 150. p. 335.
- Mantilla, J. (2022). Geología estructural y su relación con los mantos de carbón en el distrito de Pedro Gálvez y alrededores, de la provincia de San Marcos. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. 140 p.
- Mariño, et al. (2015). Aspectos geológicos de los yacimientos de CBM. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Milliken, K. (2013). Diagénesis tardía y transferencia de masa en secuencias de areniscas-lutita. Tratado de geoquímica. Sedimentos, diagénesis y rocas sedimentarias. Fondo de Cultura Económica.
- Montes, E. (2019). Métodos de explotación del carbón para optimizar la producción en la concesión minera Acumulación Oyón 1 - Lima 2018. Universidad Nacional den Centro del Perú, Perú. 92 p.

- Nichols, G. (2009). Sedimentología y estratigrafía (2da ed.). Wiley-Blackwell.
- Ospino, J. (2016). Estudio de las propiedades para la caracterización de yacimientos de gas asociado a mantos de carbón. Universidad Industrial de Santander. 159 p.
- Perfil de Mercado del Carbón. (2014). México: Dirección General de Desarrollo Minero.
- Quijandría, J. (2017). Evaluación del carbón mineral, para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. 111 p.
- Reyes, I. (2022). Implicaciones de la deformación tectónica de los mantos de carbón en la exploración geológica. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, vol. 22 (1), pp. 5-11.
- Ricapa, R. (2022). Explotación y extracción de carbón antracita en distrito de Huaranchal, Provincia de Otuzco Región la Libertad. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú. 89 p.
- Rodríguez, R. (2016). Método de investigación Geológico - Geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos, Zona Ronquillos - Corisorgona. Universidad Mayor de San Marcos. 174 p.
- Rojas, L. (2022). Análisis prospectivo de la producción de gas asociado a mantos de carbón- Colombia. Universidad Industrial de Santander, Colombia. 149 p.
- Sánchez, N. (2005). Origen y formación de yacimientos de carbón. Recuperado de <https://mineriaenlinea.com/>
- Shaw, T. (1977). Geología de los depósitos de carbón en la cuenca de Illinois. Servicio Geológico del Estado de Illinois.
- Sempere, T. (2017). El pensamiento único en tectónica andina y subandina: ¿Hasta cuándo? journal homepage. Recuperado de [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091, 5.
- Tarbuck, et al. (2013). Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física. Pearson Prentice Hall, Universidad Autónoma de Madrid, España.

Vite, N. (2018). Caracterización fisicoquímica de los mantos de carbón de San Javier y Tecoripa, Sonora, México. 73 p.

Word Coal Institute. (2009). El Carbón como Recurso - Una visión General del Carbón. Word Coal Institute.

Yanan, et al. (2020). Análisis estratigráfico de secuencias de capas gruesas de carbón en ambientes paralíticos. Un estudio de caso de la Formación Shanxi del Pérmico Temprano en el yacimiento de carbón de Anhe, provincia de Henan, norte de China. Revista Internacional de Geología del Carbón. Recuperado de [www.elsevier.com/locate/coal](http://www.elsevier.com/locate/coal)

## **ANEXOS**

**ANEXO 01: RESULTADOS DE LABORATORIO**

**ANEXO 02: PLANOS**