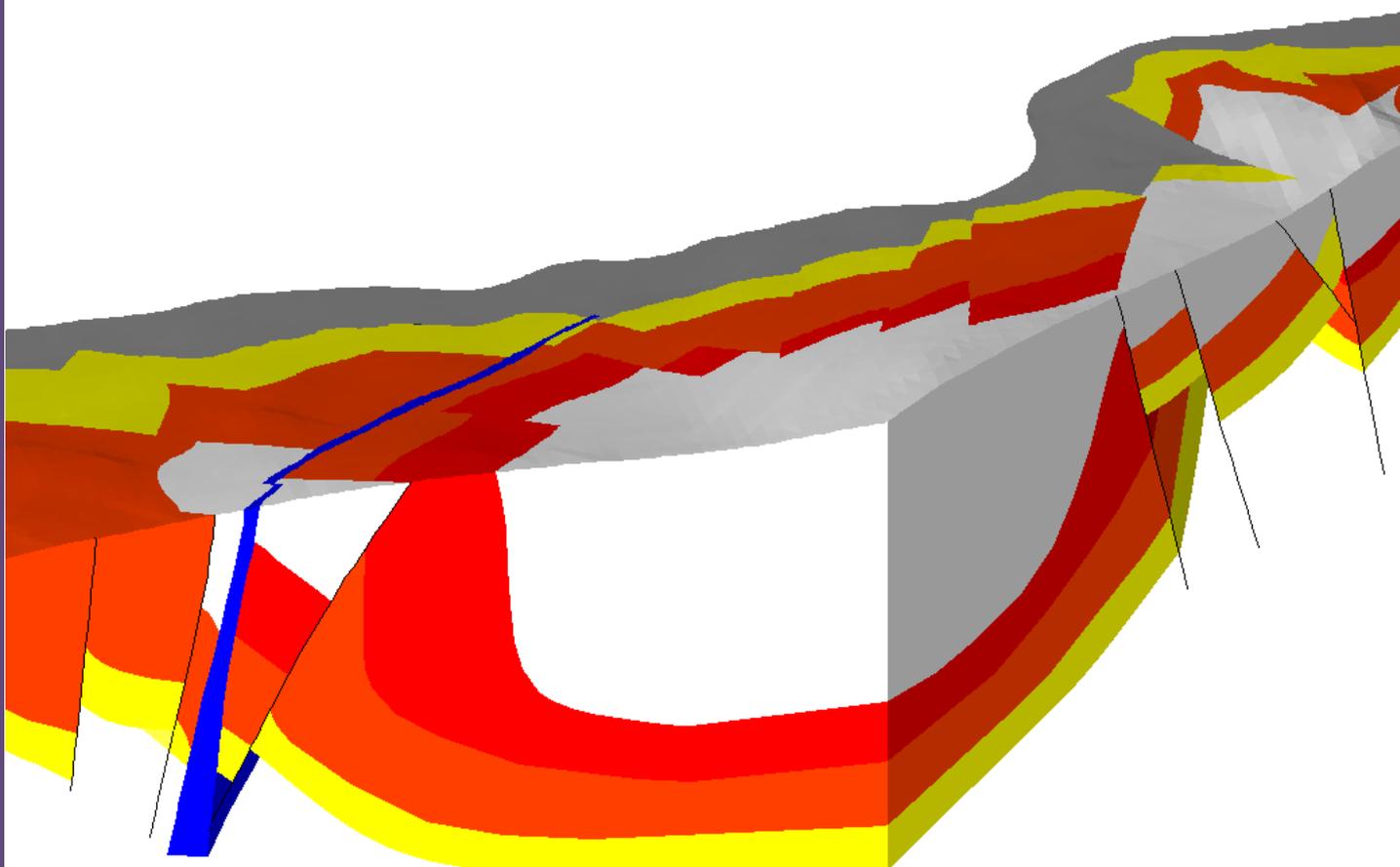


Diciembre de 2016



Universidad  
Zaragoza

## Modelización del yacimiento de Cateruca (S de Angola)

Héctor Cabrejas Sanmartín | **Trabajo de Fin de Grado**

# Índice

1. Abstract .....	2
2. Introducción y objetivos.....	3
3. Situación geográfica y geológica .....	3
3.1. Distrito de Cassinga .....	5
3.2. Antecedentes .....	6
4. Aspectos geológicos .....	7
4.1. Las Formaciones Bandeadas de Hierro .....	7
4.2. Procesos de enriquecimiento.....	7
5. Geología del yacimiento de Cateruca .....	9
6. Metodología y ejecución .....	10
6.1. Uso de AutoCad y RecMin .....	10
6.2. Topografía .....	11
6.3. Sondeos .....	12
6.4. Correlación .....	13
6.5. Generación de superficies; sedimentación y fallas .....	14
6.6. Zonas de enriquecimiento.....	15
6.7. Relleno de volúmenes .....	16
7. Presentación del modelo y discusión de resultados .....	17
7.1. Zonas de enriquecimiento.....	17
7.2. Estructura .....	18
7.3. Litología .....	18
7.4. Modelado 3D.....	19
8. Conclusiones.....	19
9. Bibliografía .....	20
Anexo A: Situación de los Cortes geológicos.....	22

# 1. Abstract

The aim of this work is to develop 3D model of the Cateruca BIF deposit-type, located in the northern portion of the Cassinga district (southern Angola).

Geologically, Cassinga iron district is marked by a Neoproterozoic sequence belonging to the Angola Shield, which unconformably lies on the Archean materials. The Algoma-type iron formations (up to 1200 m thick) are specifically included in the Jamba group, which is composed of, more than 1000m thick, metagreywacke and phyllites.

The BIF studied in this work is composed of basal sulphide and overlying silicate facies graded into an oxide facies. The dominant lithology is characterized by regular interlayering of quartz- rich and iron oxide-rich layers.

The 3D model has been obtained by means of combining CAD software (AutoCad) with mining freeware (RecMin). Application of the geological knowledge to this model allow one to achieve a better definition of the ore bodies limits and to calculate more precisely their volumes than those obtained by conventional mapping and statistics.

**Key words:** BIF, Cateruca, 3D model, iron resource, Angola.

## Resumen

El objetivo de este trabajo consiste en la realización de un modelado 3D del yacimiento de tipo BIF de Cateruca, situado en el sector Norte del distrito de Cassinga (Sur de Angola).

Geológicamente, en el distrito de Cassinga afloran materiales de la serie del Neoproterozoico pertenecientes al Escudo de Angola que se disponen discordantes sobre el Arcaico inferior. Concretamente los yacimientos se engloban en el grupo Jamba (>2,5 Ga) compuesto de metagrauvascas con filitas (1000 m), y con potentes niveles de BIF que corresponden al tipo Algoma (hasta 1200 m).

El BIF a estudiar en este trabajo se compone de un sulfuro basal, con varias facies sobre él, compuestas por silicatos y óxidos de hierro. La litología dominante en estas facies son capas de cuarzo interestratificadas con capas ricas en óxidos de hierro.

Para realizar el modelado se ha combinado el uso de software tipo CAD con freeware minero específico (RecMin) que permite, basado en el conocimiento geológico, una precisa definición de los cuerpos mineralizados y la realización de cálculos de volúmenes y leyes mucho más precisos que los cálculos analógicos. Todo ello aporta una serie de datos que la cartografía geológica y el cálculo de leyes y volúmenes por métodos meramente estadísticos no pueden alcanzar.

**Palabras clave:** BIF, Cateruca, modelo 3D, yacimiento de hierro, Angola.

## 2. Introducción y objetivos

La importancia de los BIF como principal fuente de hierro a nivel mundial hace que su estudio, aparte de interesante con un objetivo meramente científico, sea cada vez más interesante desde el punto de vista económico, ya que un mayor conocimiento de los yacimientos permite análisis económicos y de riesgo mucho más precisos.

Esta memoria, elaborada siguiendo las directrices propias del Trabajo Fin de Grado en Geología, aborda como objetivo principal la generación de un modelo tridimensional de la mina de hierro de Cateruca (Angola) con el fin de conocer mejor su extensión completa, su morfología y distribución de facies. Todo ello es de utilidad para planificar futuras campañas de exploración, previas al desarrollo de cualquier proyecto minero.

El desarrollo de este modelo servirá como base para la evaluación de la viabilidad económica de la mina de Cateruca puesto que permite realizar cálculos de tonelaje, leyes, relación mena/estéril, etc. Por otra parte, sirve de base a la hora de planificar, no solo el proceso extractivo, sino también el diseño de acopios y escombreras, con el objeto de minimizar el impacto ambiental.

Para este objetivo, ha sido necesaria la combinación de varios programas informáticos (detallados durante el trabajo) para aprovechar las mejores características y herramientas de cada uno y permitir realizar un modelado dada su envergadura y la cantidad de datos con los que se contaba para su realización.

## 3. Situación geográfica y geológica

El yacimiento de Cateruca está ubicado en el continente africano, más exactamente en el estado de Angola. Angola se sitúa al Suroeste de África y delimita con la República Democrática del Congo al Norte y Noreste, Zambia al este, Namibia al Sur y el Océano Atlántico al Oeste. La zona de estudio forma parte del escudo de Angola y se sitúa al SW del país, dentro de la provincia de Huila y próxima a la ciudad de Tchamutete. (Figura 1).

Angola se encuentra en el borde SW del cratón del Kasai. Como en otras regiones de África, estos cratones están constituidos, a grandes rasgos, por un núcleo Arcaico y series del Proterozoico, con una génesis acrecional polifásica. Estos materiales han sufrido en su mayoría una intensa deformación y metamorfismo, a menudo, con superposición de eventos tectonomagmáticos. Sobre estos materiales se dispone una cobertera mesozoica y cenozoica poco potente.

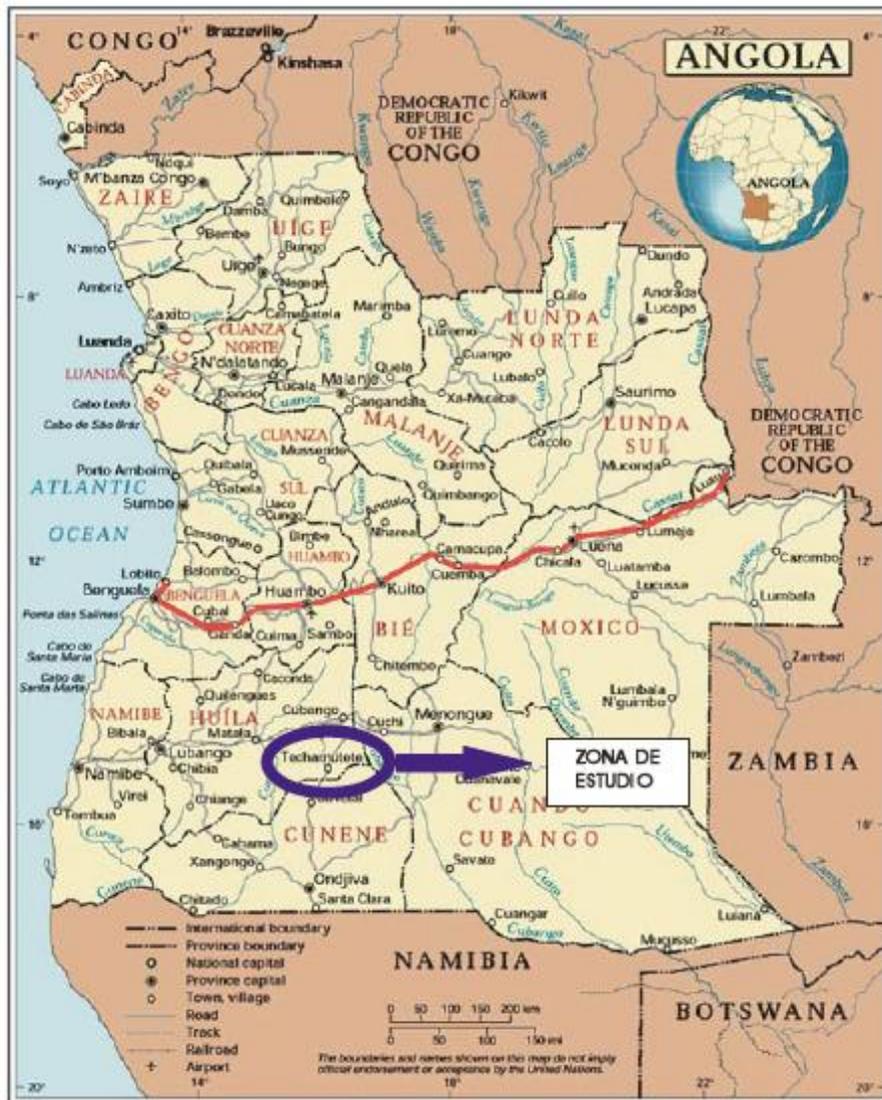


Figura1: Localización de Huila y la ciudad de Tchamuteten en el estado de Angola (SW de África).

La sucesión de orogénias precámbricas: Limpopo-Liberiana (2000 Ma), la Eburneana (1850 Ma), Kibaraniana (1100 Ma) y Panafricana (750 Ma) suelda estos bloques de forma progresiva. Este proceso es acompañado de la convergencia con otras placas, hasta el momento en el que la unión de América del Sur y África a finales del Proterozoico constituye un megacontinente.

Entre los numerosos recursos (petróleo, oro, diamantes, REE...) de Angola, destaca el hierro, que se ha obtenido a partir de yacimientos del tipo Formaciones Bandeadas de Hierro, a los que nos referiremos a partir de ahora como BIF (acrónimo de Banded Iron Formation).

El yacimiento a estudiar, desde el punto de vista geológico pertenece al sector norte del distrito de Cassinga (Jamba) (Figura 2).

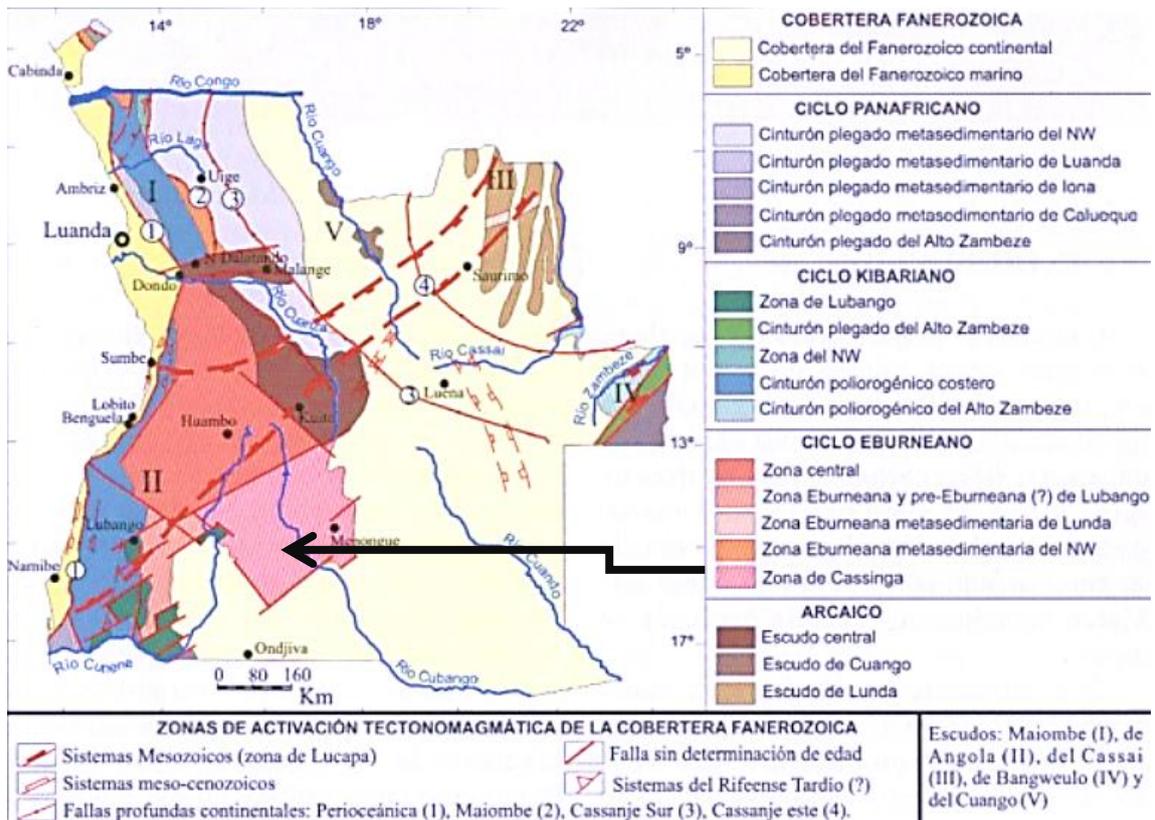


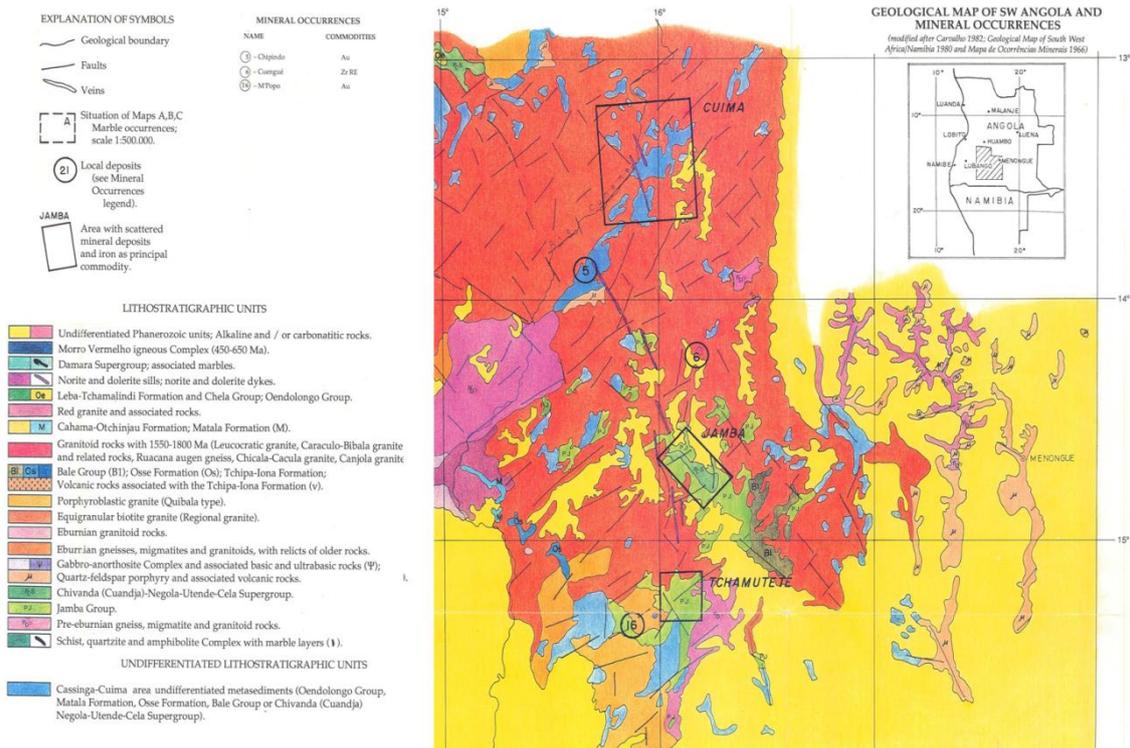
Figura 2: Mapa geológico de Angola en el que se sitúa el distrito de Cassinga (círculo azul). Servicio Geológico de Angola (1992)

### 3.1. Distrito de Cassinga

Los primeros estudios geológicos en el Distrito de Cassinga fueron realizados por geólogos portugueses hacia 1967. Tras estos, los estudios de Carvalho y Alves (1993), Haddon (2005) y Gonçalves (2007) han servido para definir una gran cantidad de aspectos geológicos (formaciones, grupos, tectónica...) existentes en el distrito.

En el distrito de Cassinga afloran materiales de la serie del Neocarcaico en el Escudo de Angola que se disponen discordantes sobre el Arcaico inferior. Se distinguen tres grupos principales: el grupo Jamba, el grupo Cuandja y el grupo Bale.

- El grupo Jamba (>2,5 Ga) está constituido de base a techo por alternancias de metagrauvascas con filitas (1000 m), metabasitas (incluyendo pillow lavas), tobas y andesitas (300 m), cuarcitas y esquistos con potentes niveles de BIF que, según Carvalho y Alves (1993), corresponden al tipo Algoma (hasta 1200 m en total).
- El grupo Cuandja es una unidad volcanosedimentaria, que de base a techo consta de metapsammitas y metaruditas (215-300 m), espilitas, basaltos, andesitas y tobas (1300 m). Esta unidad esta discordante sobre Jamba. La edad de este grupo está en torno a 2.3 – 2.2 Ga.
- El grupo Bale es una unidad detrítica formada por metaconglomerados, cuarcitas, metagrauvascas, cuarcitas con moscovita y andalucita.



**Figura3: Mapa litoestratigráfico y metalífero de la zona sudoeste de Angola donde aparece delimitada la zona de Jamba., (Gonçalvez, A.O. 2007, modificado)**

En general, los depósitos de tipo BIF del distrito de Cassingase agrupan en dos grupos: un primer grupo, cerca de la ciudad de Jamba, el cual se conoce como el Grupo Norte de Cassinga, y el otro, cerca de Tchamutete, como el Grupo Sur de Cassinga, donde se encuentra el yacimiento de Cateruca (Figura 3). La región Cassinga se caracteriza por plegamiento apretado de eje N-S paralelo al plegamiento regional.

### 3.2. Antecedentes

Este tipo de yacimientos minerales han sufrido una explotación intermitente, fundamentalmente por compañías portuguesas, debido a la inestabilidad política.

Entre 1970 y 1975, se explotaron aproximadamente 5,7 millones de toneladas por año, en su mayoría, en las provincias de Huila y Huambo. El mineral fue exportado principalmente a Japón, Alemania del Oeste y Gran Bretaña, con unas ganancias aproximadas, al año, de 50 millones de US\$ (Callaghan, 2013).

Tras la independencia de Portugal, la reactivación de las minas de hierro fue uno de los principales planes del nuevo gobierno. Hoy en día la Empresa Nacional de Hierro de Angola (Ferrangol) se encarga de la exploración, minería, procesado y marketing de los minerales.

En él se han identificado más de 100 afloramientos de tipo BIF y actualmente los cálculos indican que el distrito de hierro de Cassinga contiene al menos 500 millones de toneladas métricas de mineral explotable demostrado, con un contenido de hierro

de más del 35% y con estimaciones que dicen que puede llegar a 4,2 mil millones de toneladas métricas.

## 4. Aspectos geológicos

### 4.1. Las Formaciones Bandeadas de Hierro

El término BIF hace referencia a sedimentos químicos de origen marino que contienen más de un 15% de Fe y que presentan una estructura bandeada con bandas alternantes de minerales de hierro y de chert (Klein y Beuker, 1993).

La precipitación de estos sedimentos se produjo en periodos claramente definidos del Precámbrico, en concreto durante el Arcaico (3900-2500 Ma) y el Proterozoico (2500-545 Ma) y en ambientes tectónicos particulares. Tomando como criterios tanto el tiempo como el ambiente de depósito, los BIF se clasifican en:

- Tipo Algoma: formados entre 3.5-3.0 Ga, en arcos volcánicos y se encuentran generalmente en greenstonebelts arcaicos. Suelen ser yacimientos de pequeño volumen.
- Tipo Lago Superior: formados entre 2.5-2.0 Ga, se localizan en plataformas continentales estables y son los más voluminosos (Ej. distrito de Hamersley en Australia, Cuadrilátero ferrífero en Brasil, etc.).
- Tipo Rapitan: formados entre 1.0-0.5 Ga. Están asociados a glaciaciones (Snowball Earth) y aunque económicamente no tienen interés, se vienen usando como marcadores climáticos; en concreto, mediante el uso de isótopos de hierro.

Es importante destacar que los BIF presentan diferentes facies, reflejo de las características sedimentarias durante su formación. Así, James (1954) estableció cuatro facies: facies de óxidos (hematites y magnetita), facies de silicatos (greenalita, minnesotaita, stilpnomelana), facies de carbonatos (siderita y ankerita) y facies de sulfuros (pirita).

### 4.2. Procesos de enriquecimiento

Para que una mineralización de hierro pueda ser considerado un yacimiento de hierro, ha de haberse producido un enriquecimiento en hierro de las formaciones primarias, desde los porcentajes originales que como se ha indicado anteriormente pueden ser desde un 15%, hasta concentraciones que pueden llegar al 68%. Se ha discutido el origen del enriquecimiento de estos yacimientos pero no se ha logrado un acuerdo amplio sobre el mismo. Aun siendo evidente que la mineralogía y la geoquímica de los yacimientos y las rocas hospedantes son muy similares, se han propuesto 3 modelos (Beukes et al., 2003) que se detallan a continuación:

- **Hidrotermal (Figura 4):** Yacimientos como el de Thabazimbi en Sudáfrica o Hamersly en Australia son ejemplos de este tipo de enriquecimiento. Este enriquecimiento se produce por un ascenso de aguas hidrotermales profundas hasta atravesar el BIF y llegar a la superficie. Estas aguas sobresaturadas en hierro y subsaturadas en sílice y/o carbonatos producen el reemplazamiento de los minerales ganga por menas de hierro (Schröder et al., 2008) aumentando considerablemente la ley de las zonas atravesadas. Esto produce leyes más altas en las zonas inferiores del yacimiento ya que las aguas durante su ascenso se equilibran geoquímicamente con el BIF, reduciendo este proceso en zonas superficiales.

#### Hydrothermally Enriched

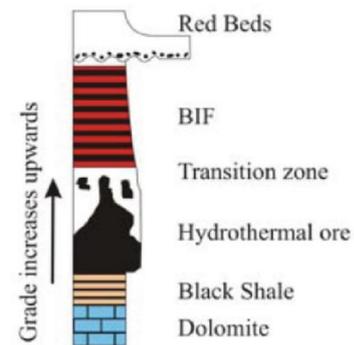


Figura 4: esquema del enriquecimiento de tipo hidrotermal. (Sinués et al., 2011)

- **Supergénico (Figura 5):** Urucum en Brasil es un ejemplo de este modelo de enriquecimiento, en el que se produce una concentración de minerales de hierro por una lixiviación de los minerales ganga (chert, silicatos y carbonatos). Esta lixiviación es producida por una circulación de agua meteórica desde la superficie de erosión hacia zonas más profundas tanto por accidentes estructurales (fallas y pliegues), como por la propia porosidad de la roca. En ocasiones, el enriquecimiento puede no ser actual y haberse originado a partir de antiguas superficies lateríticas o antiguas disconformidades formadas bajo condiciones de meteorización laterítica.

#### Supergene Enriched

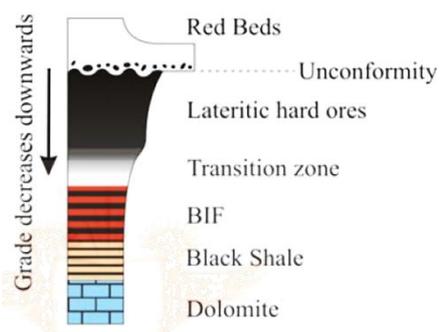
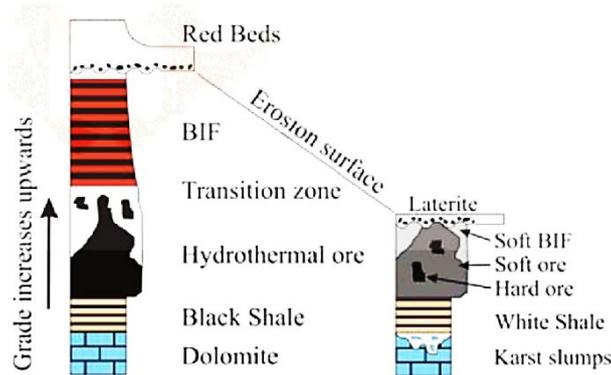


Figura 5: esquema del enriquecimiento de tipo supergénico. (Sinués et al., 2011)

De manera contraria al modelo anterior, este enriquecimiento se reduce en profundidad, ya que las aguas se saturan en los minerales ganga y dejan de ser reactivas en estas zonas. Los BIFs enriquecidos de esta manera habitualmente están afectados por un metamorfismo por enterramiento, que explica la formación de hematites *microplaty* de alto grado (Morris, 1980 y 1985 y Harmsworth et al., 1990).

- **Hidrotermales modificados (Figura 6):** el Cuadrilátero Ferrífero de Brasil es el ejemplo más representativo de un enriquecimiento que, básicamente, es una combinación de los dos anteriores. En este modelo, la mineralización de hierro es afectada por enriquecimiento hidrotermal, y posteriormente por enriquecimiento supergénico dando como resultado final cuerpos duros (menos alterados) rodeados por materiales saprolíticos (más blandos y alterados). Los depósitos de este tipo se caracterizan por la presencia de gossan o monteras de hierro envueltos en un material saprolítico blando del propio yacimiento.

## Supergene altered hydrothermal



**Figura 6: esquema del enriquecimiento de tipo hidrotermal modificado. (Sinués et al., 2011)**

## 5. Geología del yacimiento de Cateruca

El depósito de Cateruca es una formación de hierro bandeado situada en un sinclinal de aproximadamente 200 metros de espesor, compuestos por varias facies que, de base a techo, comienza con una facies basal de sulfuros sobre la que se superponen las facies de óxidos y silicatos. Las litologías predominantes son interestratificados de cuarzo y magnetita (hematites) de entre un milímetro y 15 centímetros de espesor, con contactos marcados entre las capas de magnetita y las de cuarzo. Estas capas presentan deformaciones variadas, ondulaciones, pliegues isoclinales y capas de nódulos de sílice.

Como se ha indicado anteriormente, tras el depósito de estas facies se produjo el plegamiento de la zona en forma de sinclinal, junto con la formación de numerosas fallas y la intrusión de diques félsicos en algunas de estas. La fragmentación en bloques de la mineralización se culmina con la elevación del depósito, erosión de este y oxidación de su parte superior, generando su configuración actual.

En este trabajo se han usado como facies a las que ya hicieron referencia los geólogos portugueses, entre las que se encuentran: una superior compuesta de óxidos (oxide facies), a la cual no se le ha dado importancia a lo largo de este trabajo, ya que fue definida en la secuencia estratigráfica tipo, pero en el yacimiento estudiado no aparece, dos mixtas de óxidos y silicatos según la predominancia de silicatos, o la predominancia de óxidos (mixed facies with oxide-silicate), una capa de chert ferruginoso (ferruginous chert) y la más inferior, una formación de hierro submarginal (submarginal iron formation). Para caracterizar estas facies, Sinués et al. (2011) realizó un detallado estudio mineralógico tanto de muestras en superficie como procedentes de sondeos, donde concluyó que la zona presenta un grado de metamorfismo bajo, indicado por la presencia de dada la aparición de grenalita y clorita.

## 6. Metodología y ejecución

Como se ha comentado, este trabajo plantea realizar un modelo 3D mediante el uso de dos herramientas informáticas de uso común como son AutoCad y RecMin, software minero gratuito.

Para la realización de este TFG se ha dispuesto de los datos aportados por Ferrangol entre los que se encuentran la testificación de 16 sondeos de rotación con recuperación de testigo continuo, 10 sondeos de percusión, mapa geológico del yacimiento (Anexo A), junto al trabajo realizado por el Grupo de Recursos Minerales de la Universidad de Zaragoza recogido en el artículo de Sinués et al. (2011).

Para el tratamiento de los datos se utilizarán varios programas informáticos según el procesos a realizar: la hoja de cálculo EXCEL, dos programas de dibujo 2D y modelado 3D por sus distintas características, AutoCad, por ser un programa más depurado y con mejores opciones para el dibujo y RecMin por sus características más específicas enfocadas a la geología y la minería.

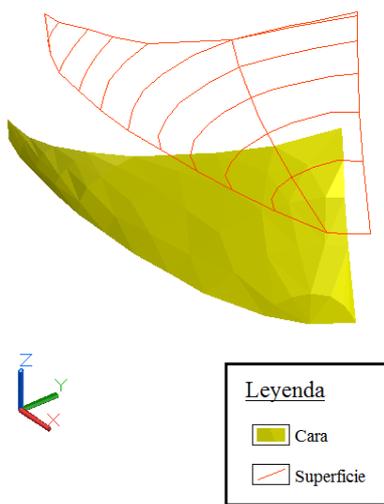
Por último para la realización de la topografía, capas de límites de alteración y alguna de las capas entre estratos se ha no cortadas por fallas se ha podido utilizar Surfer, un programa de generación de topografías y contornos mucho más potente que los que tienen integrados los programas de modelización 3D.

### 6.1. Uso de AutoCad y RecMin

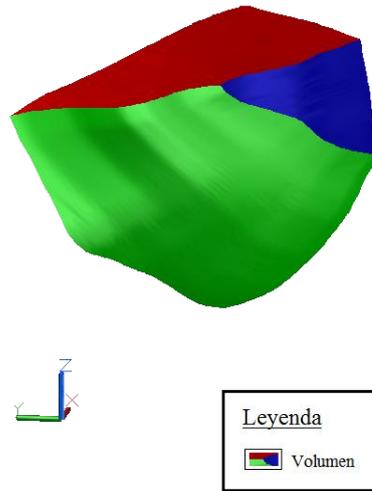
Los programas de modelización utilizan distinta nomenclatura para referirse a estructuras similares o en algunos casos idénticas y que para simplificar, en este trabajo, van a ser definidos a partir de ahora como:

- Puntos: entidad con 0 dimensiones y una única coordenada, es idéntica en los dos programas.
- Líneas: entidad con 1 dimensión y dos coordenadas, en AutoCad se utilizan múltiples variantes de este concepto a diferencia de RecMin, en AutoCad se definen polilíneas, curvas, circunferencias, arcos... pero solo se han usado líneas para no generar errores en la compatibilidad entre los dos programas.
- Superficie: entidad con 2 dimensiones y múltiples coordenadas utilizada en RecMin para generar capas y topografías compuesta por varias líneas (Figura 7; Naranja).
- Cara: entidad con 2 dimensiones compuesta por múltiples triángulos unidos entre sí (Figura 7; Amarillo), generada a partir de superficies, estas entidades se denominar T3 en RecMin y superficie/cara en AutoCad. La triangulación de caras es la función más importante de RecMin para la modelización, ya que AutoCad no cuenta con esta herramienta.
- Volumen: entidad con 3 dimensiones compuesta por la intersección de varias caras (Figura 8), pueden otorgárseles propiedades, como litología, concentraciones de algún elemento...

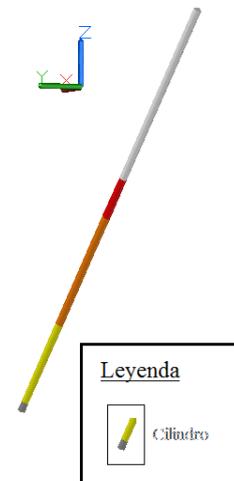
- Cilindro: volumen utilizado en AutoCad para introducir los datos de los sondeos (Figura 9).



**Figura 7: Ejemplos de Cara (en amarillo) y de Superficie (en naranja).**



**Figura 8: Ejemplo de Volumen (caras en distintos colores).**



**Figura 9: Ejemplo de varios cilindros formando un sondeo.**

La metodología utilizada para la modelización del yacimiento cambia dependiendo de la capa a realizar, dependiendo de su mayor o menor complejidad, por este motivo a continuación se desglosan las distintas formas de trabajar usadas en cada caso.

## 6.2. Topografía

Al tratarse de una superficie continua; en contraposición con las superficies que dividen dos litologías y a las fallas, que pueden ser atravesadas por fallas produciendo su discontinuidad; es posible utilizar Surfer para la generación de la topografía, en este caso, con curvas de nivel cada 10 metros. Obtenida la topografía como una superficie, se genera una cara continua para toda la topografía con que luego será dividida en las distintas caras que se observan en el mapa geológico.

Para la generación de superficies continuas (topografía y superficies entre zonas de enriquecimiento) a partir de puntos, se ha utilizado el método Krigging, un método de extrapolación complejo por su acumulación de cálculos, pero que es el más indicado para este tipo de trabajos ya que fue creado específicamente para generación de topografías a partir de puntos.

Para comenzar, como base de todo el modelado 3D se realiza la conversión de la superficie topográfica en una cara, sobre la que se proyectan las distintas líneas de capa y fallas para dividirla en secciones y colorearla (Figura 10).

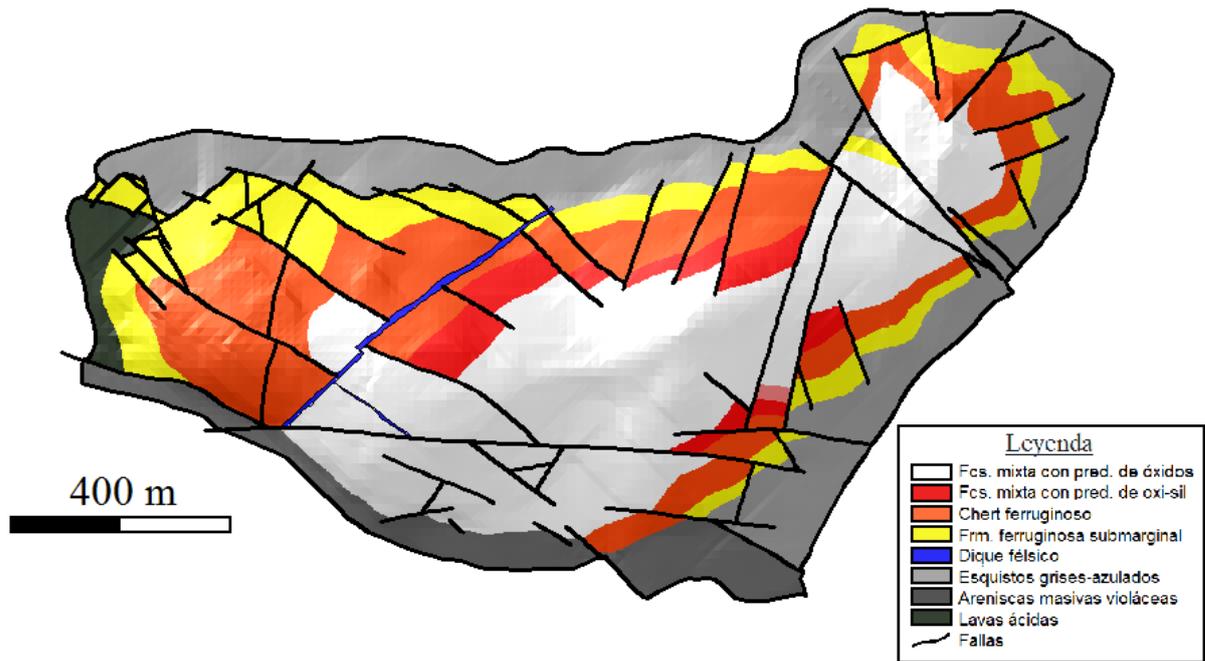


Figura 10: Mapa geológico del yacimiento de Cateruca.

Esto servirá como base para la colocación de los sondeos que completarán todos los datos directos que compondrán el modelado.

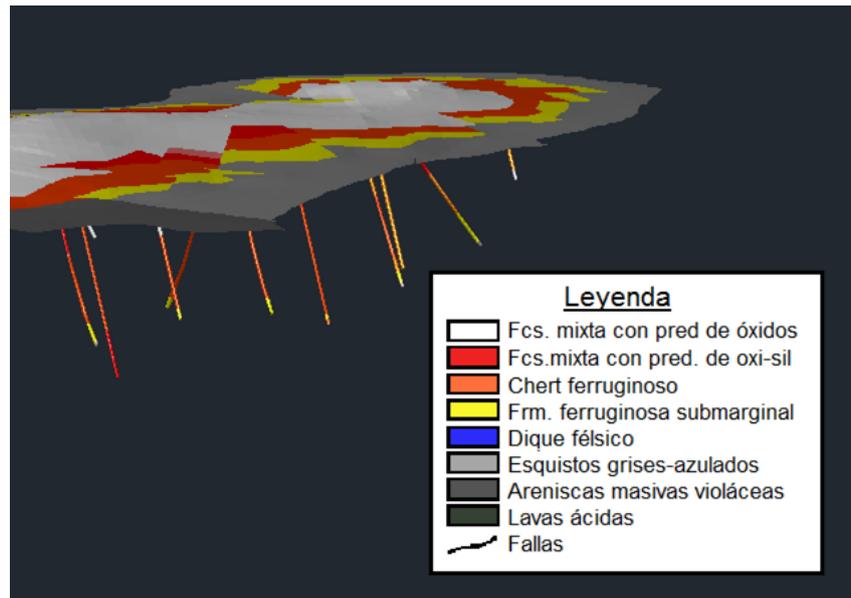
### 6.3. Sondeos

Para la introducción de los sondeos en la modelización, RecMin dispone de una herramienta específica para introducir los sondeos con todas sus características (coordenadas, desviaciones, litología, concentraciones...) a través de una hoja de cálculo incluida en el programa.

Al no disponer de esta herramienta, para la introducción de los sondeos en AutoCad, se han utilizado una serie de hojas de cálculo del programa Excel en la que introduciendo los mismos datos que requiere RecMin, genere una serie de comandos que al introducirlos en AutoCad, automáticamente sean dibujados una serie de cilindros que simulen estos sondeos. Para la realización del modelado se han utilizado dos archivos con los datos de los sondeos de litología y de enriquecimiento para generar dos conjuntos de cilindros que representen los distintos datos.

Como ya se ha expuesto anteriormente, durante la ejecución del trabajo se observó que la realización de un modelado de esta envergadura y nivel de precisión con el que se ha realizado en este modelado, el uso de programas con un nivel de depuración como es RecMin hace muy compleja o incluso imposible su ejecución.

El resultado final de las se muestra en la figura 11 donde observamos todos los sondeos bajo la topografía ya explicada anteriormente.



**Figura 11: Modelado de la superficie topográfica junto con la posición de los sondeos.**

#### 6.4. Correlación

Los criterios de correlación utilizados para este modelo han sido puramente físicos, dada la ausencia total de restos orgánicos en toda la serie estratigráfica. Se han utilizado los siguientes criterios físicos para la correlación:

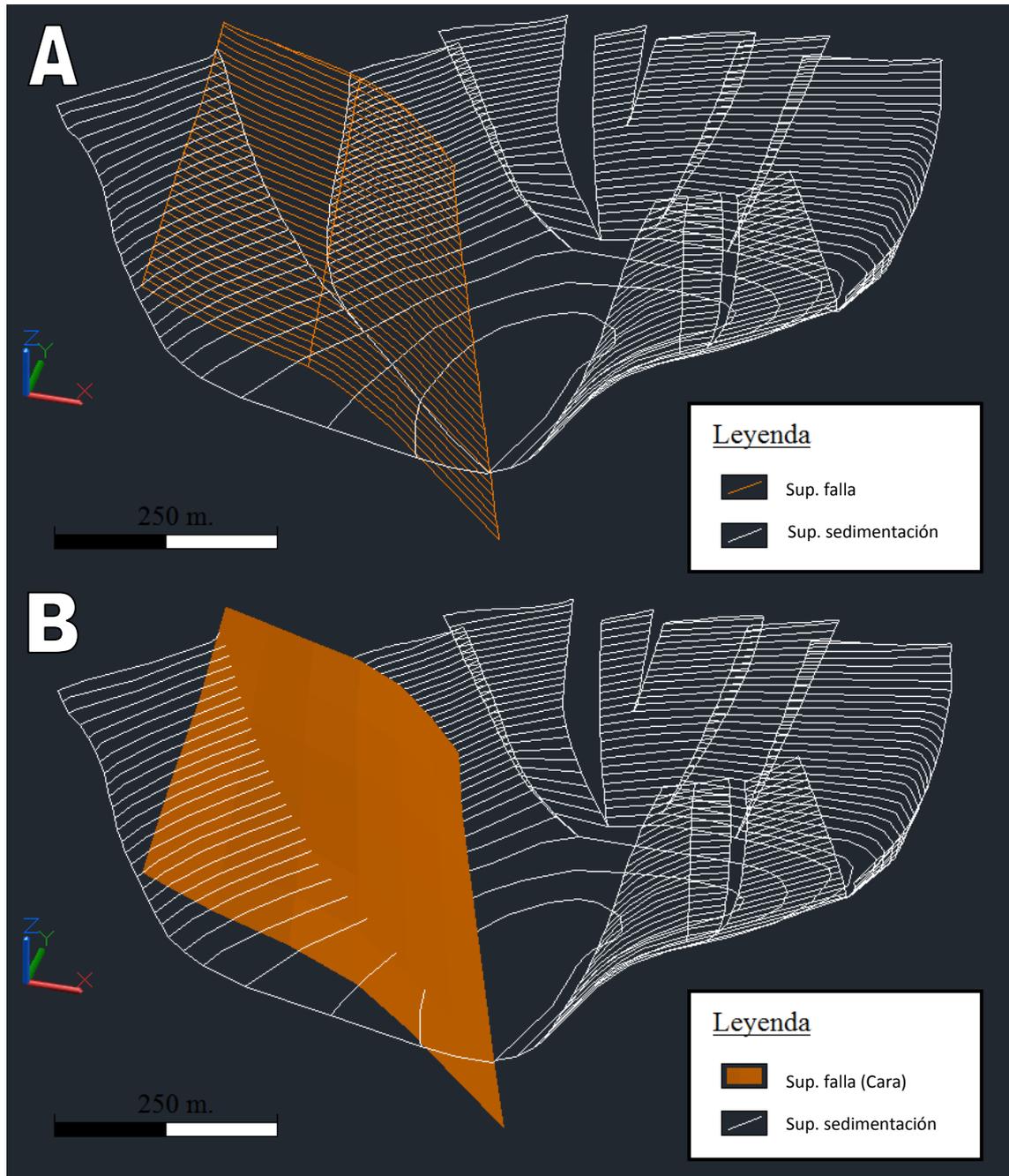
- Geométricos: de manera obvia se ha utilizado el concepto de autocorrelación ya que se puede observar la continuidad de las capas en el propio mapa geológico.
- Litológicos: La zona mineralizada se compone de facies definidas por sus características mineralógicas y petrográficas (Tabla 1).

	Facies mixta con predominancia de óxidos.
	Facies mixta con predominancia de óxidos-silicatos.
	Chert ferruginoso.
	Formación ferruginosa submarginal.
	Lavas ácidas.
	Esquistos grises-azulados.
	Areniscas masivas violáceas.

**Tabla 1: Tabla de litologías.**

## 6.5. Generación de superficies; sedimentación y fallas

Los datos de sondeo y de superficie son suficientemente densos como para generar un modelo de yacimiento preciso a nivel estructural.



**Figura 12: Ejemplo relación entre una falla (naranja) y una superficie de sedimentación (Blanca). Compuesta en el primer (A) caso por dos superficies, y una cara (falla) y una superficie (superficie de sedimentación) en el segundo caso (B).**

Las superficies que delimitan la estructura del yacimiento, con numerosas discontinuidades en la mayoría de los casos, hace necesario que sean modeladas a

mano, utilizando datos de espesor, buzamiento y conocimientos geológicos para deducir su situación en profundidad. Se han generado dos tipos de superficies en este modelado:

- Superficies de falla: superficie que divide dos volúmenes desplazándolos por medio de un contacto mecánico.
- Superficies de sedimentación: superficie que divide dos volúmenes entre facies distintas y consecutivas en la columna sedimentaria.

La realización del modelo estructural se realiza de manera similar a la realización de mapas estructurales, en este caso se ha realizado un mapa de isohipsas para cada una de las superficies, con un intervalo de altitud entre líneas de 10 metros, estos mapas están limitados por las líneas de intersección con otras superficies (por ejemplo; cada superficie de sedimentación suele estar limitada por varias superficies de falla, o en algún caso por su contacto con otra superficie de sedimentación (Figura 12)).

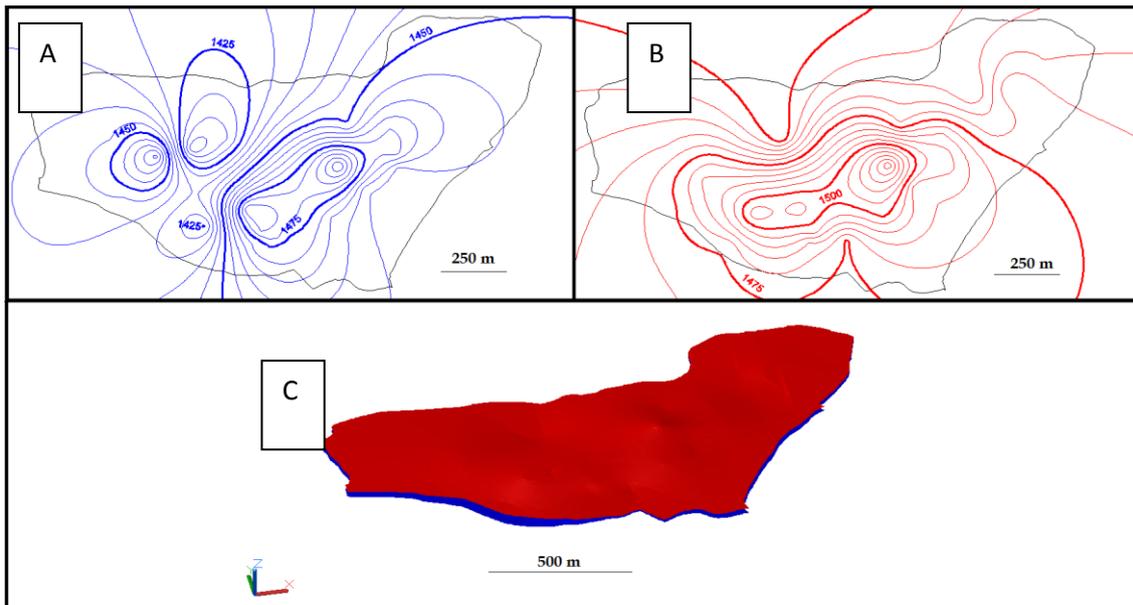
## 6.6. Zonas de enriquecimiento

Como ya se ha expuesto anteriormente, otro dato importante para el aprovechamiento de este tipo de yacimientos es que haya sido enriquecido de alguna de las posibles maneras ya expuestas. En este caso se observa un enriquecimiento supergénico que en la modelización se ha dividido en tres zonas; zona oxidada, zona parcialmente oxidada y zona no alterada.

Para dividir el modelado con estas 3 capas, se han generado dos caras que se extienden por todo el mapa; la capa que divide la zona enriquecida de la parcialmente enriquecida y la que separa esta segunda de la zona inferior sin enriquecimiento. Se ha seguido un procedimiento similar al que se siguió con la topografía, ya que se trata de una capa continua en todo el mapa.

Los datos de cambio de nivel del enriquecimiento recogidos en los sondeos se introducen en Surfer que genera dos superficies del mismo modo que se generó la topografía.

En la figura 13 se observan las isohipsas de cada una de las dos superficies que separan tanto la zona oxidada de la parcialmente oxidada (Rojo) y la que divide la zona parcialmente oxidada de la zona no alterada (Azul). Por último en la figura 14C se muestran las 2 superficies ya modelizadas bajo la topografía.



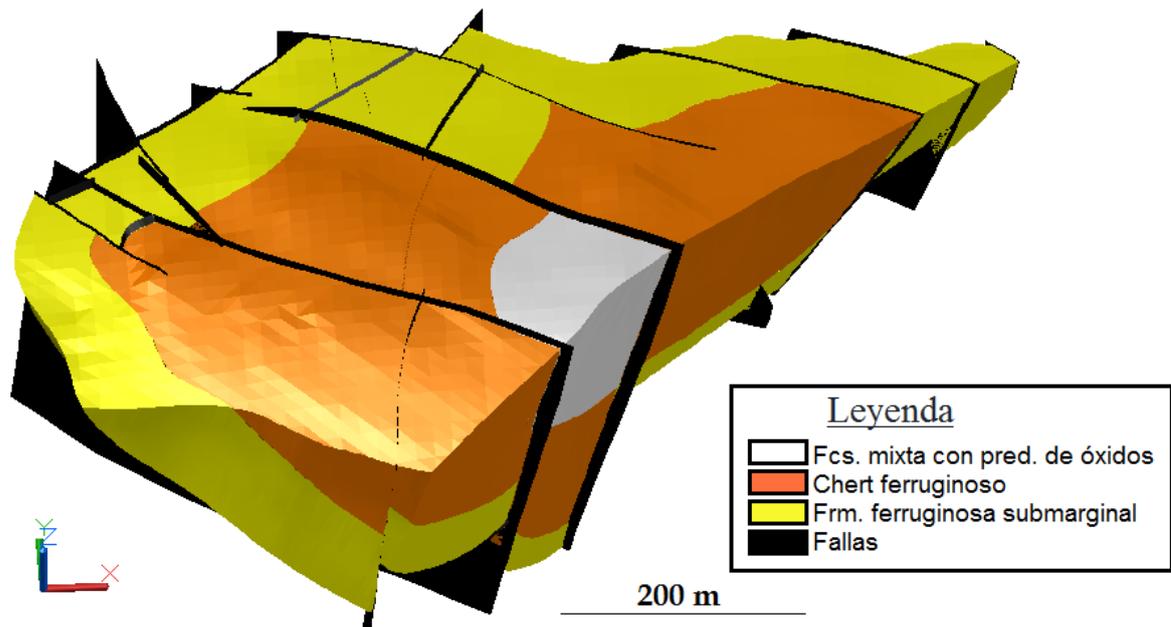
**Figura 13: (A) Mapa de isohipsas del límite entre la zona oxidada y la zona parcialmente oxidada. (B) Mapa de isohipsas del límite entre la zona parcialmente oxidada y la zona no oxidada. (C) Caras de las dos superficies superpuestas (generadas con RecMin por el método de triangulación).**

## 6.7. Relleno de volúmenes

El relleno de volúmenes entre las superficies anteriores permite dar valores a distintos parámetros, como por ejemplo, densidad, leyes, valor tras la extracción por metro cúbico, costes de extracción por metro cúbico... Este paso tiene aplicaciones puramente económicas, generando un modelo de yacimiento completo da como resultado cálculos de viabilidad económica mucho más precisos que cualquier método manual (Figura 14).

Con estos datos se pueden realizar múltiples modelos para distintas zonas de explotación, y planes de trabajo tanto a largo como a corto plazo, con la posibilidad de introducir nuevos datos al modelo conforme avancen tanto los trabajos de investigación, como la propia explotación.

Tras este paso del modelado es posible incluir en el modelo datos tanto sedimentarios, como metamórficos, geoquímicos, mineralógicos... que ayudan a mejorar el modelo en profundidad, generando un modelos con mayor precisión.



**Figura 15: Modelado 3D de la zona al este del dique félsico teniendo en cuenta la litología de cada uno de los volúmenes.**

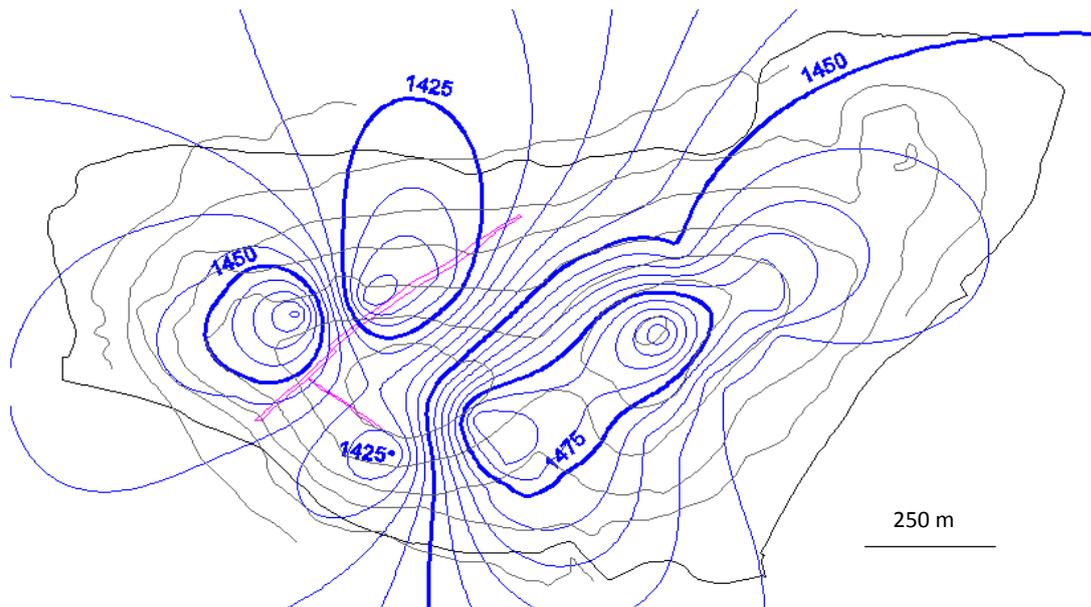
## 7. Presentación del modelo y discusión de resultados

Tras la realización del modelado es posible plantear los siguientes puntos de discusión:

### 7.1. Zonas de enriquecimiento

Las zonas de enriquecimiento presentan una mayor profundidad de los óxidos en las zonas cercanas a los dos diques félsicos (figuras 15) que se observan en superficie y en varios de los sondeos, esto puede indicar, que el enriquecimiento en óxidos de hierro por el lavado de silicatos se ha producido de manera preferente por estas zonas de fractura, posibilidad ya expuesta anteriormente para los BIF con procesos de enriquecimiento supergénico.

En las zonas no intruidas, las zonas de enriquecimiento se adaptan en buena medida a la topografía, a una profundidad aproximada de unos 50 metros encontramos la zona oxidada y la zona parcialmente hasta unos 25 metros bajo la primera la zona parcialmente oxidada.



**Figura 15:** mapa de isohipsas del límite entre las zona oxidada y la zona no oxidada (Azul), se puede observar la coincidencia entre la mayor profundización de la oxidación y los diques en superficie. En gris claro la topografía (líneas cada 10 m) y en gris oscuro la línea del borde del mapa. En morado, cartografía de los límites de los diques félsicos.

## 7.2. Estructura

La estructura es un sinclinal, con los flancos norte y sur con un alto buzamiento, subvertical, incluso en ocasiones la serie pasa a invertirse sobre todo en el flanco norte. Hacia las zonas este y oeste los buzamientos son más tendidos. La mineralización limita al sur con una falla subvertical que la pone en contacto con una formación de areniscas violáceas.

Durante la realización del modelo se han observado numerosos puntos en los que la serie de cortes geológicos aportados como datos se contradicen; en concreto, se muestran que algunos movimientos de fracturas o incluso buzamiento son incompatibles con la estructura. En el Anexo A se detallan todos los cortes aportados por la empresa Ferrangol, y los extraídos del modelado 3D.

## 7.3. Litología

Todas las facies mineralizadas aparecen en toda la superficie aparecen en un orden continuo, solo se observa un cambio lateral entre las dos facies mixtas de óxidos-silicatos (con la única diferencia de la predominancia entre unos y otros).

Teniendo en cuenta que la facies mixta de óxidos-silicatos con predominancia de silicatos siempre aparece en la base de la facies mixta y que durante la realización del modelado no se puede observan cambios en la columna estratigráfica, podría haberse considerado una única facies mixta compuesta por estas dos.

## 7.4. Modelado 3D

Por último, el objetivo principal del trabajo, el propio modelado 3D. Ante la imposibilidad de representar el modelado completo en papel se ha plasmado en forma de bloque diagrama (Figura 16), seccionado por la charnela del sinclinal. Junto con este bloque diagrama, se han extraído del modelo los cortes geológicos en las mismas coordenadas que los aportados por Ferrangol e incluidos en el Anexo A.

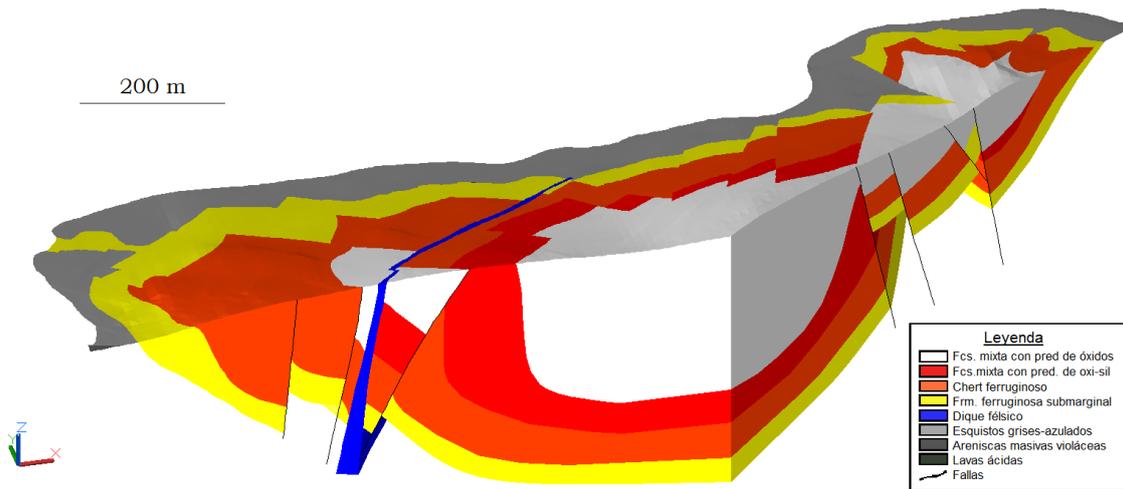


Figura 16: Modelado general del yacimiento seccionado a lo largo de la charnela del sinclinal.

## 8. Conclusiones

The conclusions of this study have been split into two categories: one corresponding to the definition of the Cateruca deposit (A, B and C) and the other one related to the modelling process (B and D).

- The distribution of the contour lines of the enrichment zones indicates that it is possible to assume the supergene enrichment may have been favored by the geological discontinuities, faults and specially dikes.
- 3D modelling drastically reduces the taking of wrong structural data due to the large data population needed to develop the model.
- The location of the mixed oxide facies in the stratigraphic sequence and their behaviour as a unique layer allow one to consider them as a unique facies divided into two subfacies in which always, mixed facie with oxide predominance is superimposed on mixed facie with silicate.

D. The lack of specific software can be satisfactorily remedied by means of unspecific software like AutoCAD, Surfer, etc. although difficulties become bigger than those found using mining software.

## 9. Bibliografía

- Beukes, N.J., Gutzmer, J., Mukhopadhyay, J., (2003). The geology and origin of high-grade iron ore deposits. Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, Section B. Applied Earth Sciences, 112.
- Carvalho, H., Alves, P., (1993). The Precambrian of SW Angola and NW Namibia: General remarks, correlation analysis, economic geology. Instituto de Cooperación Económica (Lisboa), 38.
- Callaghan, C.C (2013). Mineral Resource based Growth Pole Industrialisation – Ferrous Metals Report. Letlapa Consulting and TMSA.5, 0-61.
- Companhia Mineirado Lobito S.A.R.L. (2002). Cateruca mine. Internal report.
- Gonçalves, A. O. (2007). Caracterización mineralógica, geoquímica y petrogenética de las pegmatitas graníticas de Giraul, Namibe, Angola. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Gutzmer, J., Chisonga, B.C., Beukes, N.J., Mukhopadhyay, J., (2008). The Geochemistry of BIF-hosted High-Grade Hematite-Martite Iron Ores. Reviews in Economic Geology, 15, 157-184.
- Haddon, I.G., (2005). The sub-Kalahari geology and tectonic evolution of the Kalahari basin, Southern Africa. University of the Witwatersrand (Johannesburg), 24-34.
- Harmsworth, R.A., Kneeshaw, M., Morris, R.C., Robinson, C.J., Shrivastava, P.K., (1990). BIF-derived iron ores of the Hamersley Province. In: F.E. Hughes (editor), Geology of mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Monograph 14, 617-642.
- James, H.L., (1954) Sedimentary facies of iron formation. Econ. Geol. vol 49, New Haven, 235-293.
- Klein, C. y Beukes N.J., (1993). Sedimentology and Geochemistry of Glaciogenic Late Proterozoic Iron-Formation in Canada, Economic Geology, v.88, 545-565.
- Morris, R.C., (1980) A textural and mineralogical study of the relationship of iron-formation in the Hamersley Iron Province of Western Australia. Economic Geology, 75, 184-209.
- Morris, R.C., (1985) Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and supergene-metamorphic process – a conceptual model. In: Wolf, K.H (editor), Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. Elsevier, Amsterdam, 13, 73-235.
- Schröder, S., Bekker, A., Beukes, N. J., Strauss, H., van Niekerk, H. S., (2008). Rise in seawater sulphate concentration associated with the Paleoproterozoic positive

carbon isotope excursion: evidence from sulphate evaporites in the ~2.2–2.1 Gyr shallow-marine Lucknow Formation, South Africa, *Terra Nova*, v. 20, 108-117

-Servicio Geológico de Angola (1992): Geological map of SW Angola and mineral occurrences, escala 1:1.000.000.

-Sinués J., Subías I., Fanlo I., Manuel J., (2011). Geology and mineralogy of the Cateruca BIF deposit (Huila province, Angola). 11th SGA Biennial Meeting, Let`s Talk Ore Deposits (26-29 September 2011), Antofagasta, Chile.