

Universidad de Pinar del Río

“Hermanos Saíz Montes de Oca”



Facultad de Geología y Mecánica

Departamento de Geología

**"Estimación de los recursos de Au en las menas oxidadas
del depósito San Fernando, Cuba central".**

Tesis de Diploma presentada en opción al Título de Ingeniero Geólogo

Autor: Elizabeth Cruz Pérez.

Tutores: MSc. Elmidio Estévez Cruz.

Ing. Claro Vázquez García.

“Año del 52 de la Revolución”

Pinar del Río

2010

Dedicatoria.

Este resumen de mi vida profesional va dedicado a mi querida madre y mi hermano excepcional, a mis excelentes profesores y amigos y en especial, a mi padre: la luz en mi camino, mi dios, mi guía.

"La paz no es una utopía ni un ideal inaccesible ni un sueño irrealizable...

La paz es posible" (Juan Pablo II).

Agradecimientos.

Muchas son las personas a las que quisiera agradecer por haber contribuido en el aprendizaje de mi vida profesional y en la experiencia adquirida en lo personal.

Agradezco a la Revolución por haberme dado la oportunidad de estudiar la carrera de Geología por la cual siento pasión desde niña.

Agradezco a mi adorada y querida madre Carmen, a mi hermano excepcional y a mi familia en general, por haber confiado en mí y por brindarme todo el apoyo que necesité para poder terminar mis estudios estando tan lejos de casa.

A todos mis amigas y compañeros de carrera que en el transcurso de estos cinco años han sido mi familia en esta provincia, con los cuales he reído pero también he llorado y que sé que nunca los voy a olvidar.

A mi tutor por su dedicación y apoyo en el poquito tiempo apenas disponible.

A todos los profesores del Departamento de Geología por su contribución en mi formación profesional y empeño desinteresado.

Y a todos los que me ayudaron y compartieron conmigo en algún momento en estos cinco años.

Resumen.

El sombrero de hierro del depósito San Fernando se localiza en el municipio Manicaragua, provincia de Villa Clara. En el mismo se ha ejecutado un volumen considerable de trabajos de exploración que incluye pozos de perforación, trincheras, pozos criollos, trabajos geológicos, geofísicos y geoquímicos, además de estudios tecnológicos e ingeniero-geológicos. El presente trabajo está dirigido a estimar los recursos de la zona de oxidación del yacimiento San Fernando, a partir de la aplicación de métodos geomatemáticos, teniendo en cuenta la variabilidad espacial de los principales parámetros y el impacto de los valores huracanados en los estimados finales.

Atendiendo a la base de datos del yacimiento brindada por la Empresa Geominera del Centro S.A. de Villa Clara, las características propias de la zona de oxidación y la forma en que se realizó la prospección del mismo, se expuso una metodología para la modelación geológica y de recursos utilizando el software geólogo minero GEMCOM. Inicialmente se realizó el análisis exploratorio de datos, donde se compararon los contenidos de Au en las muestras atendiendo a los diferentes tipos naturales y tecnológicos de mena, también se estudió el comportamiento estadístico de la ley de Au por modelo geológico elaborado, unidades geológicas y en el yacimiento en general.

Seguidamente, para caracterizar la variabilidad espacial y fundamentar el método de estimación a emplear, se realizó el análisis estructural o variográfico de los datos. Posteriormente se procedió a la construcción e interpretación de los modelos geológicos y el modelo de recursos, donde el contenido de Au se estimó utilizando el método Inverso de la Distancia (ID^2).

El estudio efectuado evidenció la estrecha relación entre los tipos naturales de mena y los contenidos de Au, y la no existencia de una estructura espacial de la mineralización aurífera en el yacimiento, reflejando la alta variabilidad de la ley de este metal. Finalmente, se confirmó el impacto de los valores huracanados en los estimados finales de la cantidad de metal, expresados por los resultados siguientes:

Modelo	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	Ley (%)	Cantidad de metal (%)	Ley (%)	Cantidad de metal (%)	Ley (%)	Cantidad de metal (%)
No.2	100	100	90.62	90.63	57.09	57.11
No.3	100	100	87.98	87.24	60.07	59.57

Abstract.

The iron cap of San Fernando deposit is located in Manicaragua, municipality of Villa Clara province. At this site a considerable amount of prospecting works including drilling, trenching, geological works, geophysics, geochemistry, technological and geotechnical studies were carried out. The present work is executed to estimate gossan's resources of San Fernando deposit implementing the application of geomathematical methods considering the spatial variability of the main parameters and the outlier impact on the final estimates.

According to deposit database provided by the Empresa Geominera del Centro S.A. de Villa Clara, the own features of the oxidation zone and the way in which the prospecting was carried out, a methodology was selected for the geological and resources modeling using the mining software GEMCOM. Initially, an exploratory data analysis was carried out, to compare the sample Au grades in different technological and natural ore types and to characterize the statistical behavior of Au grades in built geological models, geological units and in the whole deposit.

Subsequently, the structural analysis was carried out in order to characterize the spatial variability and to justify the selection of grade estimation methods. Later the geological and resource models were constructed and Au grade estimated by Inverse Distance method (ID^2).

The study evidenced the closed relationship between natural ore types and Au grades, and the absence of spatial structure of gold mineralization in the deposit, reflecting the high Au grade variability. The impact of outlier on the final estimates of metal was confirmed, as it is shown bellow:

Modelo	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	Ley (%)	Cantidad de metal (%)	Ley (%)	Cantidad de metal (%)	Ley (%)	Cantidad de metal (%)
No.2	100	100	90.62	90.63	57.09	57.11
No.3	100	100	87.98	87.24	60.07	59.57

ÍNDICE

Introducción.....	7
CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS DE LA REGIÓN.	11
I.1 Ubicación Geográfica.	11
I.2 Relieve.....	11
I.3 Flora y Fauna.....	12
I.4 Clima.	12
I.5 Red Hidrográfica.....	13
I.6 Industria y Agricultura.	13
I.7 Red de Comunicaciones.....	13
I.8 Historia de las Investigaciones Anteriores.	13
CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.....	15
II.1 Geología Regional.....	15
II.2 Geología del Yacimiento.....	15
II.3 Tectónica.....	17
II.4 Mineralización.....	17
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	21
III.1 Obtención de la Base de Datos.....	22
III.2 Confección de la Base de Datos.....	22
III.3 Análisis Exploratorio y Estructural de los Datos.....	24
III.4 Detección y Tratamiento de los Valores Huracanados (Outlier).	24
III.5 Modelo Geológico.....	25
III.6 Modelo de Recursos.....	25
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS EXPLORATORIO Y ESTRUCTURAL DE LOS DATOS.....	27
IV.1 Análisis Exploratorio de los Datos.....	27
IV.1.1 Estadística Descriptiva.....	27
IV.2 Regularización de las Muestras.....	32
IV.3 Análisis Estructural o Variográfico de los Datos.....	32
IV.4 Detección y Tratamiento de los Valores Huracanados (Outlier).....	37
CAPÍTULO V. MODELO GEOLÓGICO.....	41
V.1 Modelo Geológico.....	41
V.1.1 Digitalización de los Contactos (Perímetros) y Creación de los Sólidos.....	42
V.2 Modelo de Recursos.....	50
V.2.1 Definición del Modelo de Bloques.....	51
V.2.2 Estimación de la Ley de Au en los Sólidos.....	52
V.2.3 Método de Estimación Geomatemático Inverso de la Distancia (ID^2).....	52
V.2.4 Definición de la Vecindad de Búsqueda.....	53
V.2.5 Impacto de los Outlier en la Estimación de Recursos.....	53
V.2.6 Reporte de Recursos.....	54
Conclusiones.....	57
Recomendaciones.....	58
Bibliografía.....	59
Anexos.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Mapa de ubicación geográfica del yacimiento de Cu-Zn San Fernando.....	11
Figura 1.2- Imagen 3D de las elevaciones en las que se localiza el sombrero de hierro “San Fernando”	12
Figura 2.1- Mapa geológico regional de Cuba central.....	16
Figura 2.2- Depósito San Fernando.Vista del Norte.....	18
Figura 2.3- Detalles del sombrero de hierro.....	18
Figura 2.4- Mena oxidada englobando bloques de riodacita.....	19
Figura 2.5- Mena oxidada dentro de riodacita.....	19
Figura 2.6- Mena Tipo I. Riodacita con limonita masiva en nidos.....	19
Figura 2.7 - Mena Tipo I. Fragmentos y bloques de limonitas en bloques y costras dura.....	19
Figura 2.8- Mena Tipo II.....	20
Figura 2.9- Mena Tipo III. Stockwork limonítico y riodacita caolinizada.....	20
Figura 3.1- Diagrama de flujo de la metodología empleada.....	21
Figura 3.2- Red de pozos de perforación utilizada para la investigación del sombrero de hierro San Fernando.....	22
Figura 3.3- Estructura relacional de la base de datos.....	23
Figura 3.4- Modelo de bloques.....	26
Figura 4.1- Gráficos “boxplot” de los diferentes dominios geológicos. A- Saprolita, B- Sombrero de hierro.....	29
Figura 4.2- Papel probabilístico lognormal. A- Modelo geológico No.2 B- Modelo geológico No.3.....	30
Figura 4.3- Histogramas de frecuencia acumulativa. A- Saprolita, B- Sombrero de hierro.....	31
Figura 4.4- Variogramas omnidireccionales de todas las muestras con contenidos de Au. A- Normal, B- Logarítmico y C- Indicador.....	33
Figura 4.5- Variogramas por la vertical de todas las muestras con contenidos de Au. A- Normal, B- Logarítmico y C- Indicador.....	34
Figura 4.6- Variogramas omnidireccionales de las muestras con contenidos de Au por encima de 0.3g/t. A- Normal, B- Logarítmico y C- Indicador.....	35
Figura 4.7- Variogramas por la vertical de las muestras con contenidos de Au por encima de 0.3g/t. A- Normal, B- Logarítmico y C- Indicador.....	36
Figura 4.8- Modelo conceptual para dos poblaciones.....	37
Figura 4.9- Diagrama de dispersión de Au vs Ag.....	39
Figura 4.10- Coeficiente de variación acumulativo de Au.....	40
Figura 5.1- A- Polígonos cerrados (3D Rings) unidos a tie lines. B- Sólido de la zona de oxidación.....	44
Figura 5.2- Perfil geológico 706900E. A- Modelo geológico No.1. B- Modelo geológico No.2.....	45
5.3- Perfil geológico 706800E. A- Modelo geológico No.1. B- Modelo geológico No.2.....	46
Figura 5.4- Perfil geológico 377580N. A- Modelo geológico No.1. B- Modelo geológico No.2.....	47
Figura 5.5- Modelo geológico No.1. Vista en diferentes direcciones A y B.....	48
Figura 5.6- Modelo geológico No.2. Vista en diferentes direcciones A y B.....	49
Figura 5.7- Modelo geológico No.3. Vista en diferentes direcciones A y B.....	50
Figura 5.8- Vista en planta del modelo geológico No.2.....	55

Figura 5.9- Perfil transversal del modelo geológico No.2. Fila 3 del modelo de bloques.	55
Figura 5.10- Vista en planta del modelo geológico No.3.....	56
Figura 5.11- Perfil transversal del modelo geológico No.3. Columna 5 del modelo de bloques.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1- Valores medios de los contenidos de Au en las distintas unidades o dominios geológicos que conforman el yacimiento.....	27
Tabla 4.2- Estadística descriptiva de los contenidos de Au en los principales dominios geológicos.....	28
Tabla 4.3- Detección automática de valores huracanados.....	38
Tabla 5.1- Modelo geológico No.1. Clasificación lito-tecnológica de los tipos de menas.....	41
Tabla 5.2- Modelo geológico No.2 y 3. Clasificación atendiendo al contenido de Au.....	42
Tabla 5.3- Secciones verticales transversales.....	43
Tabla 5.4- Impacto de los valores huracanados en el modelo de recursos.....	54

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 5-. Perfiles transversales del modelo geológico No.3. A- Fila 3. B- Columna 7 y C- Columna 9 del modelo de bloques.....	61
Anexo 4-. Perfiles transversales del modelo geológico No.2. A- Columna 7. B- Columna 3 y C- Fila 3 del modelo de bloques.....	62
Anexo 3- Tabla con el contenido de Au y el tipo de mena correspondiente a cada pozo de exploración.....	63
Anexo 2- Localización de los pozos de prospección.....	65
Anexo 1- Mapa geológico del sombrero de hierro San Fernando.....	66

Introducción.

Aunque los precios actuales del Au muestran sus valores más altos (superior a 1000 usd/Oz), los costes medios de la producción mundial tienen también una tendencia a aumentar. A pesar de la creación de técnicas de exploración cada vez más eficaces, los yacimientos descubiertos son más pequeños y con contenidos más escasos, es decir, cada vez menos rentables o marginales. Sin embargo, como parte del proyecto de la Alternativa Bolivariana para los pueblos de Nuestra América (ALBA), incluido en una serie de programas económicos y sociales que ellos desarrollan, se acordó la realización de un proyecto de exploración de las manifestaciones de Au y Ag en la mina San Fernando, Cuba central.

Las mayores acumulaciones de Au del país, desarrolladas en zonas de oxidación de yacimientos polimetálicos, se localizan hacia la parte occidental y central de Cuba, con algunos depósitos explotados anteriormente y otros en estudio. El área de desarrollo del sombrero de hierro San Fernando se localiza en el municipio Manicaragua, provincia de Villa Clara, a 45km al Sur de la ciudad de Santa Clara. Dicho depósito es conocido desde comienzos del siglo XIX, siendo explotado esporádicamente desde 1827 hasta 1961 cuando fue paralizada definitivamente la explotación por el agotamiento aparente de las reservas de Cu y Zn en el cuerpo principal Los Mangos. Los afloramientos de la mineralización sulfurosa se encuentran meteorizados formando un sombrero de hierro, que es conocido desde el comienzo de la explotación de la mina San Fernando. Sin embargo, no es hasta el Levantamiento y Búsqueda Jíbaro Báez (Vasiliev, 1989), que se le presta atención por la posible presencia de Au en el mismo.

El desarrollo de investigaciones posteriores en el área a partir de los años noventa, reafirmaron la posible existencia de zonas relativamente ricas en Au y Ag en el depósito, cercanas al pozo principal Los Mangos. Los contenidos revelados alcanzaron valores de 2,74g/t de Au, y 20.7g/t de Ag. Resultó entonces que, por la importancia que posee este depósito, a la luz de los precios actuales y la disponibilidad de financiamiento, se estimó conveniente llevar a cabo por parte de la Empresa Geominera del Centro S.A., la subfase de investigaciones geológicas de prospección, con el objetivo de culminar la evaluación de este depósito para la confección de un estudio de factibilidad económica que determine la construcción de una mina planta para la explotación de estos recursos con rendimiento económico.

En el presente trabajo, los estudios pertinentes sólo se realizarán en base a la variable Au, ya que éste metal constituye el parámetro de mayor interés para las investigaciones geológicas a realizar. El mismo se llevó a cabo bajo ciertas condiciones, preestablecidas por los concesionarios con respecto a la información prestada. Por cuestiones de seguridad, las coordenadas empleadas fueron desplazadas y multiplicadas por un factor común. Por tal razón, no se utilizó la topografía del área, limitándose el estudio a la

modelación del relieve a partir de la cota de la boca de los pozos. También por razones de confidencialidad, este trabajo va a prescindir de las cifras finales de la estimación global de los recursos del yacimiento, procesando solamente los datos para el análisis exploratorio, la confección de modelos geológicos del yacimiento y el modelo de recursos construido en diferentes variantes y expresado en términos relativos respecto a un caso base.

Como el proyecto que desarrolla la Geominera S.A. de Villa Clara es el primero de su tipo en este yacimiento, no se cuenta con información anterior de estudios geoestadísticos y confección de modelos geológicos con respecto a los contenidos de Au, además la empresa no los pudo realizar por no contar con un software geólogo-minero. El presente trabajo está dirigido a realizar estos estudios y complementar los resultados del proyecto “Prospección de Oro del Sector Sombrero de Hierro San Fernando”.

Diseño teórico de la investigación.

Problema: Teniendo en cuenta los resultados de los estudios anteriores, donde se revelan contenidos de Au de interés económico, surge la necesidad de estudiar la continuidad espacial de los principales parámetros geólogo-industriales de las menas oxidadas del depósito San Fernando y su posterior uso en la estimación de recursos.

Objeto: Menas oxidadas limoníticas con Au, situadas en la superficie del depósito de Cu-Zn San Fernando.

Objetivo general: Estimar los recursos del depósito San Fernando, a partir de los datos de prospección, teniendo en cuenta la variabilidad espacial de los principales parámetros y el impacto de los valores huracanados en los estimados finales.

Objetivos específicos:

- Cuantificar la variabilidad espacial de la ley de Au.
- Obtener el modelo geológico tridimensional del yacimiento.
- Estudiar la influencia de los valores huracanados en los resultados finales de la estimación.

Hipótesis: Una correcta cuantificación de la variabilidad espacial de los contenidos de Au, combinado con un modelo geológico que caracterice la continuidad geológica de los principales dominios del yacimiento y el empleo de un método de estimación espacial que considere las particularidades de la mineralización aurífera, permitirá obtener estimados más confiables de los recursos del yacimiento.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICO GEOGRÁFICAS DE LA REGIÓN.

I.1 Ubicación Geográfica.

El área de desarrollo del depósito del sombrero de hierro San Fernando se localiza en la hoja topográfica 1:50 000 Potrerillo en el municipio Manicaragua, provincia de Villa Clara, a 45km al Sur de la ciudad de Santa Clara (capital de la provincia) y 15km al Noroeste del poblado de Manicaragua (ver figura 1.1). El puerto de Cienfuegos se localiza 45km al Oeste. El acceso se realiza por la vía pavimentada Santa Clara- Manicaragua- Cienfuegos, que cruza 7km al Sur y posteriormente por terraplenes desde el Hoyo, Mataguá y El Jíbaro.

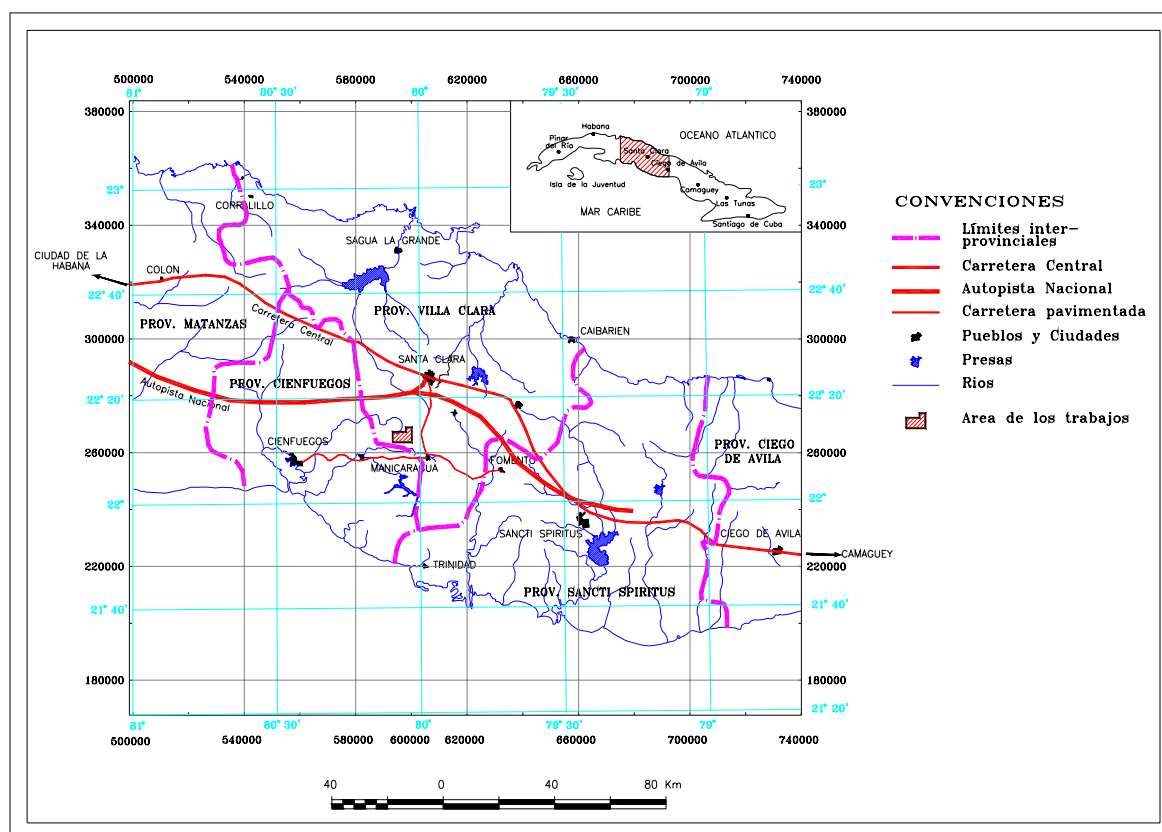


Figura 1.1- Mapa de ubicación geográfica del yacimiento de Cu-Zn San Fernando.

I.2 Relieve.

El relieve es peniplanizado de tipo colinoso, con pendientes de 10-30°. La altura máxima es de 160m sobre el nivel del mar y mínima de 120m, donde la dirección predominante de las elevaciones es Oeste-Noroeste. El depósito ocupa la ladera norte de una elevación donde está ubicada la mineralización de Cu-Zn San Fernando (ver figura 1.2). El terreno es de propiedad estatal.



Figura 1.2- Imagen 3D de las elevaciones en las que se localiza el sombrero de hierro “San Fernando”. *Obtenida del Google Earth.

I.3 Flora y Fauna.

La vegetación del área es muy tupida y está representada en un 90% por malezas y marabú, yerbas variadas, además de árboles maderables de forma aislada. La fauna está constituida principalmente por una gran variedad de insectos y arácnidos (arañas y garrapatas). Entre todos los animales que se encuentran distribuidos en el área, se presentan diferentes tipos de lagartos, aves y algunos roedores.

I.4 Clima.

Las particularidades climáticas de Cuba están condicionadas por la influencia de los siguientes factores: su posición geográfica al Sur del Trópico de Cáncer, el carácter insular de su territorio, la cercanía al continente norteamericano y que sus costas se encuentren bañadas por aguas de las corrientes del golfo. El conjunto de ellos determina el clima de Cuba como tropical, con algunos elementos de continental para partes del interior de la isla y manifestados por una mayor amplitud diaria y anual de la temperatura en comparación con la existente junto a las costas.

Los valores absolutos de la temperatura fluctúan entre 6° y 34°C, donde la temperatura media mensual para el período seco es de 21,5°C y en el período de lluvias es de 27° a 28°C.

El promedio de lluvias durante el período seco varía entre 200 y 400mm/m², mientras que para el período de lluvias los valores son de 1400 a 1500mm/m². Los meses más lluviosos son Septiembre y Octubre, en el que la media anual para la región es alrededor de 10-15L/seg/Km². Predominan los vientos con dirección Este-Noreste con una velocidad media

de 3,9m/seg. La presión atmosférica normal para la región es de alrededor de 1015,5 Milibares.

I.5 Red Hidrográfica.

La principal fuente de agua es el río Arimao que fluye de Este-Oeste a 3.5km al Sur. Existen riachuelos y arroyos que corren en dirección Norte-Sur de manera intermitente durante el año, como lo son: La Mina, La Cachimba, Las Cadenas, entre otros.

I.6 Industria y Agricultura.

En los alrededores del área existen algunos asentamientos cercanos como La Moza (5km.), El Jíbaro (2.5km) y el complejo industrial La Campana. En el entorno del sector, la actividad económica fundamental es el cultivo del tabaco y, en menor medida, la cría de ganado vacuno. La actividad minera extractiva está representada por las plantas de beneficio de la arena aluvial del río Arimao y la arena eluvio-deluvial de la corteza de intemperismo granodiorítica en el Hoyo de Manicaragua, así como una pequeña unidad extractora de grava feldespática (La Macagua) para la industria cerámica y del cemento. Las líneas eléctricas de alta tensión llegan hasta el poblado del Jíbaro distante 2.5km al Suroeste del sector.

I.7 Red de Comunicaciones.

La arteria fundamental para la región es la carretera entre los poblados de Manicaragua y Cumanayagua, a una distancia entre 12 y 22Km, respectivamente. La comunicación de esta última con la mencionada carretera se realiza mediante dos terraplenes con una longitud de 4 y 5Km, separados por los poblados de Hoyo de Manicaragua y la Cucaracha, respectivamente. Por otra parte, el área dispone de un terraplén de 4,5Km desde el poblado de Mataguá y de 8,5Km desde el poblado de Jorobada.

I.8 Historia de las Investigaciones Anteriores.

El depósito de Cu-Zn San Fernando es conocido desde comienzos del siglo XIX, siendo explotado esporádicamente desde 1827 hasta 1961 cuando fue paralizada definitivamente la explotación por el agotamiento aparente de las reservas en el cuerpo principal Los Mangos.

Los afloramientos de la mineralización sulfurosa se encuentran meteorizados y se manifiestan con la presencia de un sombrero de hierro que es conocido desde el comienzo

de la explotación de la mina San Fernando; sin embargo, no es hasta el Levantamiento y Búsqueda Jíbaro Báez (Vasiliev, 1989), que se le presta atención por la posible presencia de Au en el mismo. Es durante esta etapa que se toman algunas muestras de suelo y se hacen trincheras en los límites del mismo, revelando la presencia de Au en el orden de las décimas de gramo por tonelada.

Durante los trabajos de la Prospección Detallada Cobre San Fernando (Arcial et al., 1991), la presencia de Au fue identificada en una zona de 7,50m dentro de un laboreo minero (trinchera T-2A) cercano al pozo principal Los Mangos, con contenidos de hasta 4g/t (análisis auroespectral).

En el período 1994 a 1998, cuando la AEI. Holmer-Geominera S.A. realiza investigaciones en el área, efectúa un muestreo de suelo con una red de 100x20m, permitiendo el contorno de la zona de oxidación sobre una franja de 500m de largo por 75m de ancho. Las muestras fueron analizadas por el método espectral con ICP en los laboratorios Chemex de Canadá, revelando una anomalía de Au con valores entre 100 a 3990ppb.

El muestreo realizado durante la ejecución de la generalización geológica de la Formación Los Pasos (Gallardo et al., 2002), en las brechas oxidadas que afloran en los alrededores del pozo Los Mangos, reveló contenidos de hasta 2,74g/t de Au, 20.7g/t de Ag y 1.86% de Cu.

Basado en los datos de trabajos anteriores durante la recopilación realizada para la confección del proyecto de exploración de la mena primaria (Cu-Zn), se demostró el interés que posee la zona de mena oxidada (sombrero de hierro) que cubre al yacimiento, en el cual fueron calculadas en recursos hipotéticos 2.1t de Au hasta la profundidad de 15m, con contenidos promedio de 1g/t. Por tales razones y teniendo en cuenta los precios actuales del Au (superior a las 1000 usd la onza), resulta imprescindible realizar la evaluación de esta mena.

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.

II.1 Geología Regional.

La zona central de Cuba constituye una de las más complejas tectónica, estructural y estratigráficamente, en la que se conjugan la mayoría de los niveles estructurales que definen su geología interna. Sus rocas se ven representadas por las dos grandes unidades tectónicas que caracterizan a la geología de Cuba: el Zócalo y la Cubierta. Las cuatro unidades del basamento precenozoico (Paleomargen de América del Norte, Cinturón Ofiolítico Septentrional, Terrenos de Arco Volcánico Cretácico y Terrenos Metamórficos Meridionales), además del Cinturón Plegado y Fallado, ambos pertenecientes al Zócalo, son las unidades más difundidas en Cuba central. Los diferentes pisos del basamento precenozoico se disponen de Sur a Norte, donde los del Sur sobreyacen a los del Norte tectónicamente como resultado de la acción de los sobrecorrimentos sobre estas rocas (Cobiella-Reguera, 2007).

II.2 Geología del Yacimiento.

Las rocas de tipo arco volcánico ocupan una gran parte del territorio central de Cuba y están representadas por un complejo vulcanógeno-sedimentario que abarca un área aproximada de 2 200km², desde el occidente de Cienfuegos hasta el Este de Sancti Spíritus y con edad Cretácico Inferior (Neocomiano)-Cretácico Superior (Campaniano) (ver figura 2.1). El Complejo Plutónico está representado en el área por el batolito Manicaragua.

El depósito San Fernando está emplazado en el extremo oeste del área donde aflora la Formación Los Pasos, de edad Cretácico Inferior (Hauteriviano) y está caracterizada por una sucesión bimodal de rocas máficas y félsicas, extrusivas, sub-volcánicas e intrusivas, que representan la parte inferior del Arco Insular Cretácico en Cuba Central. En general, la parte baja del corte está constituida preferentemente por flujos basálticos con intercalaciones riolíticas (alrededores de Mina Antonio), en tanto que hacia la zona de San Fernando, el corte se caracteriza por un cierto predominio de la actividad explosiva. La secuencia es cortada por numerosos diques de pórfidos basálticos hasta dioríticos. El límite inferior de la Formación Los Pasos está intruido por las rocas granodioríticas del Plutón Manicaragua de edad Cretácico Superior. En el contacto norte afloran concordantemente las andesitas de la Formación Mataguá (Cretácico Inferior Aptiano-Albiano).

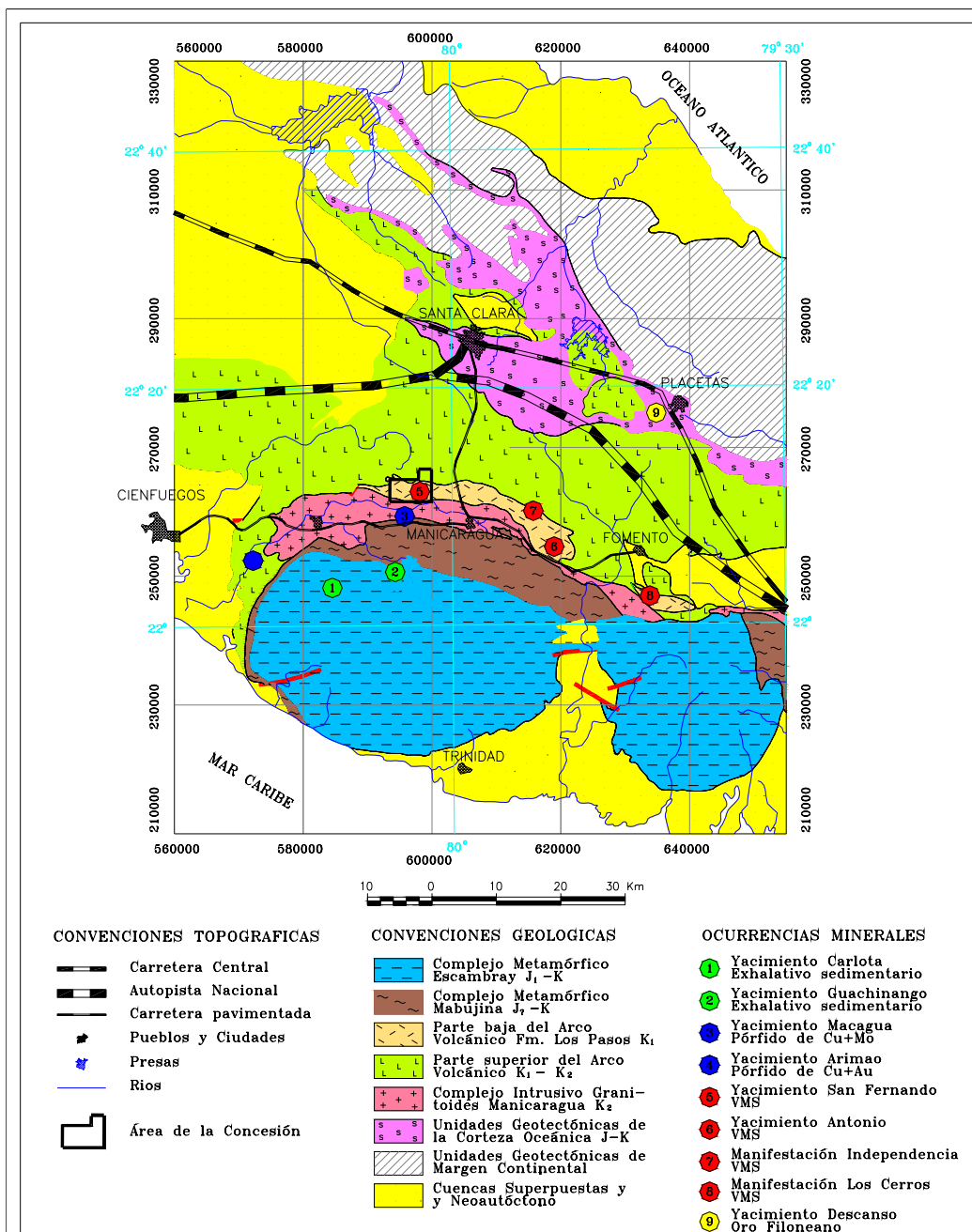


Figura 2.1- Mapa geológico regional de Cuba central (Basado en Pushcharovki, 1988).

En el área del depósito San Fernando, las rocas de la Formación Los Pasos afloran en forma de fajas alargadas con dirección general Este-Oeste, agrupadas en tres ciclos volcánicos principales (Vasiliev et al., 1988), que posiblemente generaron a su vez tres eventos mineralizantes. El área está constituida por brechas de composición riolíticas-riodacítica, tobas y riolitas hacia la base y son cubiertas por flujos de lavas basálticas, andesíticas y tobas, estando intruidas por pequeños cuerpos y diques de dioritas. Todo el conjunto está intensamente alterado hidrotermalmente (silicificación, sericitización, cloritización, epidotización, etc.). Se incluyen desde la alteración de facies proximal clorito-biotítica alrededor de las zonas mineralizadas de stringer (stockwork), hasta zonas locales cuarzo-sericita-andalucita, rodeadas de zonas sericíticas más amplias. Amplios sectores de la secuencia volcánica contienen 5-10% de pirita asociada con la alteración sericítica. Se

localizan algunos horizontes de barita-pedernal a lo largo y ancho de todo el corte volcánico y se aprecian amplias zonas bien desarrolladas de mineralización sulfurada oxidada en superficie.

II.3 Tectónica.

El área donde se localiza el depósito San Fernando, está afectada por los eventos tectónicos de carácter regional que han afectado a Cuba central con diferentes etapas de plegamiento desde el Cretácico Inferior. Las rocas presentan yacencia general monoclinas hacia el Nor-Noreste, con ángulos de inclinación entre 35° y 60°. Sin embargo, en las cercanías del batolito de granitoides Manicaragua, la yacencia cambia al Sur y Sureste con ángulos abruptos.

Las dislocaciones disyuntivas se caracterizan por sus complejas relaciones, describiéndose 3 grupos de fallas con direcciones de 270°-310°, 10°-40° y 330°-340° (Vasiliev et al., 1988). El primero es el más antiguo y de actividad más intensa y prolongada, y a él está ligada la formación de los depósitos de VMS y de alteraciones hidrotermales acompañantes ligadas a esos niveles estratigráficos. El segundo se distingue también por fallas y grietas paralelas con ángulos de inclinación de 70°-80° al Noroeste, las cuales se consideran fallas de rechazo horizontal (transcurrentes) con poca magnitud en los desplazamientos (según Kunov y Dundalov, en Vasiliev et al., 1988). El tercer grupo (330°-340°) con ángulos de inclinación de 65°-70° al Noreste es de rechazo horizontal, donde en ocasiones normales la magnitud del rechazo alcanza en algunos casos decenas y centenares de metros y a ellas se vinculan los sistemas de diques de composición andesito-dacítica, dioríticos y andesito-basálticos que atraviesan todo el paquete volcánico, posteriores a los sistemas mineralizantes.

II.4 Mineralización.

La zona de desarrollo de la mena oxidada y el stockwork limonítico con presencia de Au posee dimensiones de 470x170m (ver anexo 1), extendiéndose con rumbo WNW-ESE, dentro de la cual se presentan dos zonas de mayor interés posiblemente relacionadas con acumulaciones de sulfuros masivos estratocontrolados y con los flujos piroclásticos y explosivos. La zona principal se ubica en las cercanías de los pozos de mina antiguos Los Mangos (ver figuras 2.2 y 2.3), Santa Isabel y La Ceiba, con dimensiones de 470m de largo y un ancho de 100m en superficie, presentando una profundidad promedio de unos 7m y máxima de 20m. La otra zona se encuentra al Suroeste, ocupando la parte más alta de la elevación con dimensiones de 200m de largo por 30m de ancho.



Figura 2.2- Depósito San Fernando. Vista del Norte. Área Los Mangos.



Figura 2.3- Detalles del sombrero de hierro.

**Tomadas del proyecto "Prospección de Oro del Sector Sombrero de Hierro San Fernando"*

El depósito está constituido por la parte oxidada de la mineralización de sulfuros primarios que afloraba o se encontraba cercana a la superficie en forma de vetas, bolsones, nidos y cuerpos masivos. Dicha mineralización se presenta de forma estratocontrolada e intruidas en rocas ácidas constituidas por tobas, toba-brechas y lavas de composición dacítica a riolítica, además de pórfidos andesito-dacíticos. La oxidación de estos cuerpos minerales formó una masa mineral que en ocasiones mantiene su forma original, y en otras constituye una aureola dispersa que bordea a los cuerpos primarios. De este modo se observan zonas con limonitas primarias in situ en forma masiva como costras duras, que a veces se presentan porosas hasta esqueléticas, formadas en el mismo cuerpo mineral que le dio origen y conjuntamente con los minerales de ganga (barita, cuarzo y sericita). También se observan en forma de masa arcillosa muy limonítica que comprende el mayor por ciento de la mineralización y que en ocasiones se encuentra por dentro y englobando a la anterior (ver figuras 2.4 y 2.5).

A pesar de todo lo anteriormente expuesto, también constituyen mineralizaciones con contenidos de Au interesantes, las relacionadas con el stockwork limonítico presentes en los pórfidos andesito-dacíticos y las rocas riodacíticas intensamente caolinizadas que se encuentran en las cercanías de los cuerpos minerales masivos. En resumen, la mineralización de Au se encuentra tanto en la zona de sulfuros masivos, como en la zona de stringer del depósito.



Figura 2.4- Mena oxidada englobando bloques de riodacita.



Figura 2.5- Mena oxidada dentro de riodacita.

**Tomadas del proyecto "Prospección de Oro del Sector Sombrero de Hierro San Fernando"*

Las observaciones macroscópicas han permitido revelar los siguientes tipos naturales de mena, los cuales determinaron la metodología de la toma de muestras para el ensayo tecnológico de laboratorio:

- **Mena Tipo I:** Mena oxidada sin transportación compuesta por óxidos e hidróxidos de hierro (limonita-goethita), que se presenta en forma nidos (ver figura 2.6) y costras con partes masivas y duras (ver figura 2.7). Constituye la mena más rica (contenidos de Au entre 3-21,9g/t), formando diferentes niveles en la vertical y bloques dentro de la matriz laterítica. Esta mena fue formada a partir de los cuerpos de sulfuros primarios masivos muy ricos en Cu y Zn que conforman alrededor del 30% de la mena.



Figura 2.6- Mena Tipo I. Riodacita con limonita masiva en nidos.



Figura 2.7 - Mena Tipo I. Fragmentos y bloques de limonitas en bloques y costras duras.

**Tomadas del proyecto "Prospección de Oro del Sector Sombrero de Hierro San Fernando"*

- **Mena Tipo II:** Mena compuesta por arcillas lateríticas o limoníticas más blandas con contenidos variables de óxidos e hidróxidos de hierro en la matriz de la arcilla, de colores pardo-rojo-amarillo-negro (ver figura 2.8). Posee contenidos de Au de 0.5-2.0g/t. Se originan a partir de la transformación de una mena menos rica en sulfuros primarios y de las rocas encajantes, en la cual intervienen también la meteorización y la acción de las soluciones ácidas en la zona de oxidación, transformando la matriz de las rocas en arcillas. Probablemente constituya del 60-70% del depósito.
- **Mena Tipo III:** Roca riolítica con stockwork limonítico y pórfidos-meteorizados que componen a las rocas encajantes (ver figura 2.9) y conforman de un 10-20% del depósito. Los contenidos de Au son menores que 0.1-0.4g/t.



Figura 2.8- Mena Tipo II.



Figura 2.9- Mena Tipo III. Stockwork limonítico y riodacita caolinizada.

**Tomadas del proyecto "Prospección de Oro del Sector Sombrero de Hierro San Fernando"*

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.

De acuerdo a los objetivos que persigue el presente trabajo, el tipo de información con la que se cuenta y los softwares de procesamiento de los datos disponibles, se selecciona la metodología a emplear, donde la misma se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.1. Para el procesamiento de la información se utilizaron los softwares: Auto Cad Map 2000, Microsoft Excel, Grapher 4.0, Surfer 8.0, MINITAB 14 y GEMCOM 6.0.

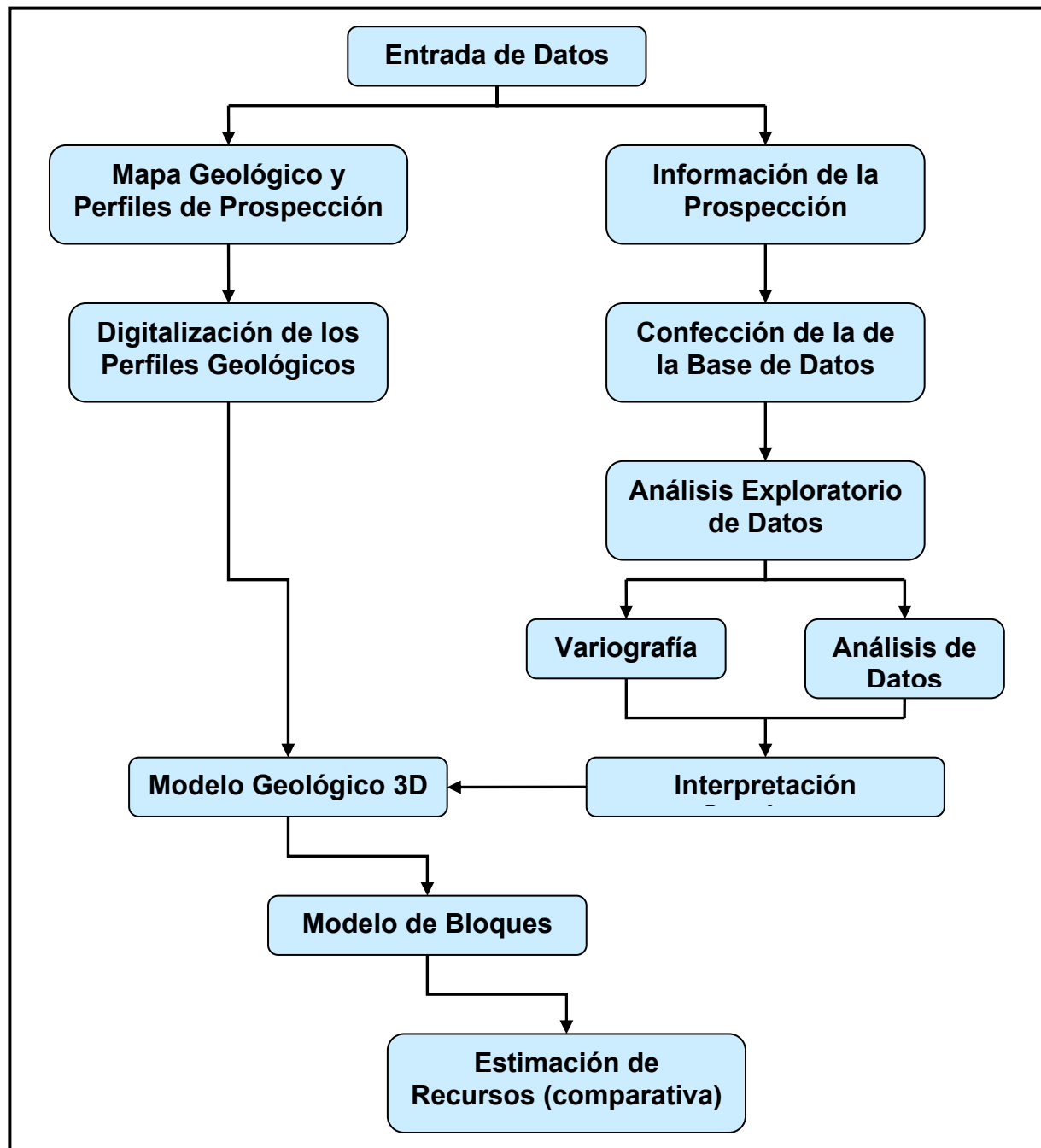


Figura 3.1- Diagrama de flujo de la metodología empleada.

III.1 Obtención de la Base de Datos.

La base de datos fue facilitada por la Empresa del Centro Geominera S.A de Villa Clara, como parte del proyecto “Prospección de Oro del Sector Sombrero de Hierro San Fernando”, municipio Manicaragua. En dicha empresa no se pudo realizar un estudio geoestadístico de los datos obtenidos por no contar con las herramientas necesarias, principalmente de un software actualizado y con licencia para su uso. Este trabajo constituye entonces un complemento de dicho proyecto, al tener como principal objetivo realizar esos tipos de análisis. Durante la fase de prospección, la Empresa Geominera realizó una serie de trabajos que incluyen la perforación, muestreo, ensayos y análisis de las muestras. En ellos quedó establecida la red de pozos de perforación con un espaciamiento de 100m entre perfiles y 50m entre pozos (ver figura 3.2). Se ejecutaron 22 pozos verticales con una profundidad promedio de 15m y se tomaron y analizaron 229 muestras de Au con una longitud media de 1.5m. También se tomaron muestras de surco, en trincheras y afloramientos, pero las mismas no fueron utilizadas en esta investigación.

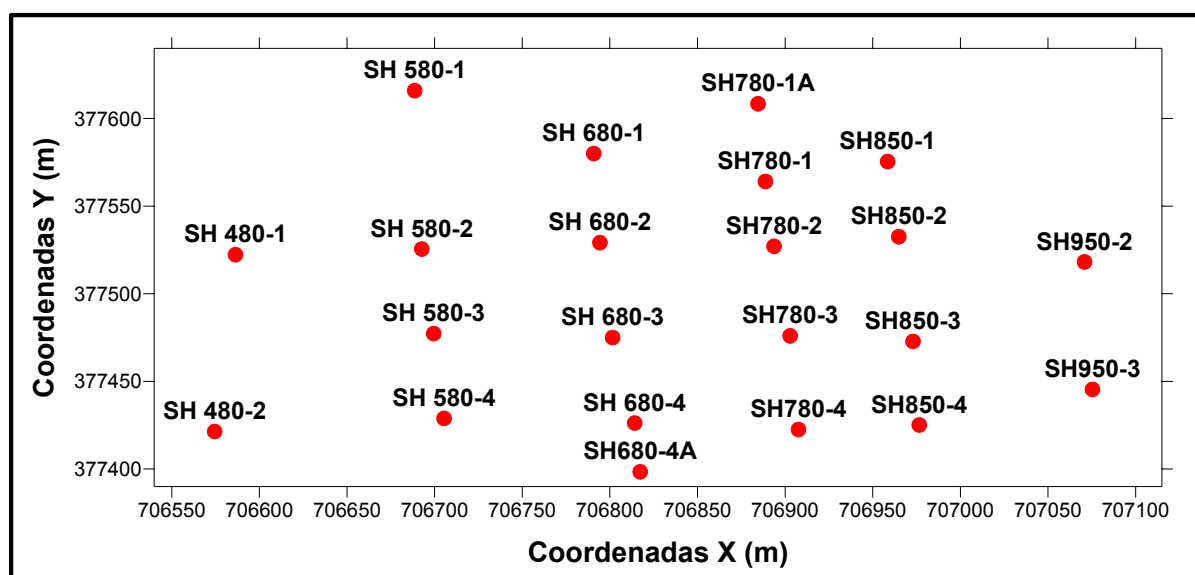


Figura 3.2- Red de pozos de perforación utilizada para la investigación del sombrero de hierro San Fernando.

III.2 Confección de la Base de Datos.

La base de datos con los resultados de los análisis de laboratorio y la documentación geológica, se encontraba disponible en formato Excel. La información está conformada por las coordenadas de los pozos, los contenidos de Au (g/t) y el tipo de mena por intervalos en cada uno de los pozos estudiados (ver anexo 2 y 3). Se consideró al sombrero de hierro (zona de oxidación) como un tipo tecnológico que incluye los tres tipos naturales de mena, al resultar difícil la separación de éstas por la complejidad en que se presentan en el corte geológico. La saprolita y el estéril son las otras dos unidades geológicas consideradas.

Una vez conformada dicha clasificación, se prepararon diferentes tablas en Excel de acuerdo al tipo de procesamiento estadístico a efectuar. Para el procesamiento en GEMCOM, las tablas se elaboraron de acuerdo a los requerimientos propios de la aplicación y se exportan con la estructura adecuada a formato CSV (delimitado por coma) para su posterior importación (ver figura 3.3).

Las cuatro tablas se describen a continuación:

- **Header** (collar): Contiene las coordenadas X y Y del pozo, la cota (Z) y el largo del sondaje (Lenght).
- **Survey**: Registra la información referente a la inclinación y el azimut de los pozos.
- **Lithology**: Se registra en forma codificada la litología de las muestras. En este caso se indican los tipos naturales de mena.
- **Assay**: Se muestran los resultados de los análisis realizados a las muestras.

Tabla de Coordenadas (Header)						
	HOLE-ID	LOCATION[X]	LOCATION[Y]	LOCATION[Z]	LENGTH	POZO
1	SH480-1	706586.37	377522.26	141.81	3.00	1
2	SH480-2	706574.50	377421.40	142.36	10.50	2
3	SH580-1	706688.64	377615.87	148.27	7.50	3
4	SH580-2	706692.68	377525.52	151.32	16.50	4
5	SH580-3	706699.48	377477.26	144.71	12.00	5
6	SH580-4	706705.38	377428.87	154.11	18.00	6
7	SH680-1	706790.79	377579.98	154.76	16.00	7

Tabla de Inclínometría (Survey)					
	HOLE-ID	FROM	TO	AZIMUTH	DIP
1	SH680-1	0.00	16.00	0.00	-90.00

Tabla de Litología (Lithology)				
	HOLE-ID	FROM	TO	ROCK TYPE
1	SH680-1	0.00	3.00	LLA
2	SH680-1	3.00	9.00	LMP
3	SH680-1	9.00	13.50	LLA
4	SH680-1	13.50	16.00	LMP

Tabla de Muestreo (Assay)					
	HOLE-ID	FROM	TO	SAMPLE_IIO	AU
1	SH680-1	0.00	1.60	3051	0.98
2	SH680-1	1.60	3.00	3052	0.94
3	SH680-1	3.00	4.50	3053	1.29
4	SH680-1	4.50	6.00	3054	16.00
5	SH680-1	6.00	7.50	3055	21.92
6	SH680-1	7.50	9.00	3056	3.12
7	SH680-1	9.00	10.50	3057	0.87
8	SH680-1	10.50	12.00	3058	0.40
9	SH680-1	12.00	13.50	3059	0.98
10	SH680-1	13.50	15.00	3060	3.96
11	SH680-1	15.00	16.00	3061	1.83

Figura 3.3- Estructura relacional de la base de datos.

III.3 Análisis Exploratorio y Estructural de los Datos.

El análisis exploratorio consiste en el procesamiento de los datos disponibles o los generados a partir de los compósitos, con el objetivo de caracterizar el comportamiento estadístico de las distintas variables en el depósito y en las unidades geológicas (dominios) que lo integran. El análisis estadístico se fundamenta en el cálculo de algunos estadígrafos de la estadística descriptiva, además de la construcción de histogramas y gráficos de probabilidades. El estudio de la distribución de la frecuencia nos indica cómo se distribuyen las muestras en intervalos regulares de los posibles valores, obteniendo entonces el tipo de distribución que siguen los datos, la presencia de valores huracanados y la posible existencia de poblaciones complejas (bimodalidad o multimodalidad).

El análisis estructural o variográfico se realizó para investigar y cuantificar la variabilidad espacial de los contenidos de Au en los diferentes dominios geológicos presentes en el área. Este estudio consiste en el cálculo y modelación de los semivariogramas experimentales, ajustándolos luego a un modelo teórico, con el objetivo de determinar los parámetros descriptivos del semivariograma que posteriormente serán usados en la estimación.

El ajuste de los variogramas constituye un punto crucial en el estudio geoestadístico, debido a que todos los cálculos posteriores se realizan utilizando exclusivamente el modelo teórico. Por esta razón, el modelo teórico debe respetar al variograma experimental, sobre todo en los primeros puntos que son los más confiables.

III.4 Detección y Tratamiento de los Valores Huracanados (Outlier).

Una característica común de los depósitos de Au es la distribución de la frecuencia altamente asimétrica. Dicha distribución presenta coeficientes de variación (CV) de dos o mayor y trae implícita que un pequeño número de muestras sean responsables de una gran proporción de la cantidad de metal en el depósito (Parker, 1991). Un outlier es una observación numéricamente distante del resto de los datos (Grubbs, 1969), donde este tipo de valores afectan considerablemente los resultados finales de los análisis estadísticos y su interpretación, sobre todo si se trabaja con muestras pequeñas. Sinclair (2002), define al outlier como una observación que parece inconsistente con el resto de los valores. Su definición está basada en criterios subjetivos y se describen varias formas de identificar y evaluar los mismos.

En la literatura se discuten diversos métodos para corregir la presencia de los valores identificados como outlier, entre los cuales se pueden citar: truncarlos atendiendo a un valor de corte o cutoff, sustituirlo por otro valor (media, mediana o límites del intervalo de confianza, etc.), ignorar su influencia potencial manteniéndolos en la base de datos, disminuir su influencia agregando factores de peso o ponderadores, corregir el valor atendiendo a la tendencia general del modelo de distribución asumida y otros.

Entre los procedimientos más frecuentes en el tratamiento que reciben los outlier, se encuentra su eliminación y sustitución por otro valor. Sin embargo, Srivastava (2001) considera que descartar un valor real no es una buena práctica, por lo que se hace necesario un análisis completo de las causas que lo originan, lo cual puede conducir a una reinterpretación de las suposiciones iniciales que se hicieron con respecto a la base de datos. La decisión sobre el tratamiento a los outlier puede ser una de las más críticas en la estimación de los recursos.

En este trabajo, la identificación de los valores huracanados se basó en tres procedimientos diferentes: dos gráficos (diagrama de dispersión de Au vs Ag y el gráfico del coeficiente de variación (CV) acumulativo) y uno analítico (tiene en cuenta la dispersión alrededor de la media).

En el modelo de recursos, los valores outlier identificados fueron tratados según los métodos estándar descritos en la literatura.

III.5 Modelo Geológico.

Aunque el presente trabajo no persigue mostrar y discutir los resultados de la estimación global de los recursos del sombrero de hierro San Fernando, la construcción de un modelo geológico del área permitirá definir con mayor exactitud la geología interna del depósito, su geometría y volumen, así como la continuidad geológica de las principales unidades (tipos naturales y tecnológicos de mena, litologías etc.). Por otra parte, el modelo geológico constituye el soporte de todo el procesamiento posterior.

El objetivo que cumple esta etapa es la creación de un modelo geométrico tridimensional, que con el empleo de GEMCOM, permita representar la posición y la forma de las distintas unidades o dominios geológicos presentes en el mismo. La construcción del modelo se obtendrá aplicando el método de los perfiles. Este método se fundamenta en la construcción de una serie de secciones regularmente espaciadas, en el que las distintas unidades se digitalizan y posteriormente se correlacionan los perfiles contiguos a través de los puntos de inflexión para conformar el modelo de sólidos.

III.6 Modelo de Recursos.

Para arribar entonces a la obtención de un modelo de recursos del sombrero de hierro San Fernando, ya contando con el modelo geológico tridimensional, resulta necesario conocer la variación espacial de las variables de interés y los demás parámetros relacionados.

El método a emplear para la estimación de los recursos es el modelo de bloques, el cual consiste en la discretización del espacio 3D en bloques o celdas tridimensionales (voxels), que contienen los atributos (litología, tipo de mineralización, etc.) y las mediciones (leyes, propiedades físico-mecánicas) del dominio geológico en que se encuentran (ver figura 3.4).

Los atributos de los bloques se determinan sobre la base de la intersección con el modelo geológico o su posición respecto a una superficie triangulada y las leyes a través de la estimación con técnicas de interpolación espacial.

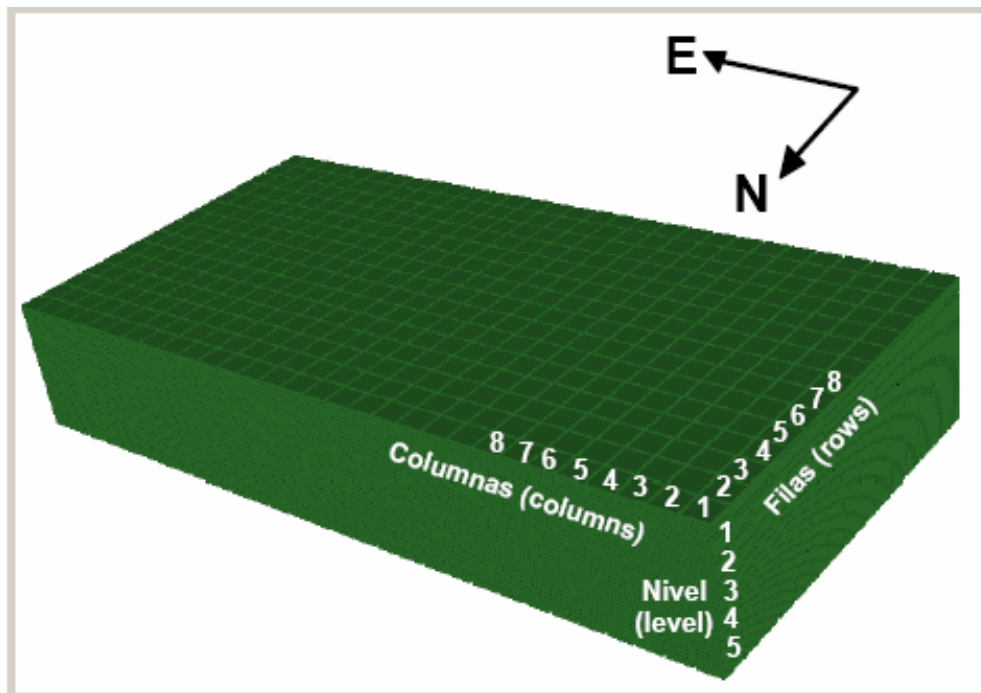


Figura 3.4- Modelo de bloques.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS EXPLORATORIO Y ESTRUCTURAL DE LOS DATOS.

IV.1 Análisis Exploratorio de los Datos.

El análisis exploratorio de los datos se realizó con el objetivo de establecer el carácter estadístico de la distribución de Au en el yacimiento y dentro de cada dominio geológico. Este consiste en el cálculo de estadígrafos de la estadística descriptiva, construcción de histogramas y gráficos de probabilidades, así como la verificación de la normalidad de los datos. Además, se establece el tipo de distribución que poseen los datos, se detecta la presencia de valores anómalos y la existencia de poblaciones complejas (modalidad o bimodalidad).

IV.1.1 Estadística Descriptiva.

En un principio, los estadígrafos de la estadística descriptiva se calcularon para el contenido de Au en todo el yacimiento, sin contar los tipos naturales de mena en los cuales se manifiesta específicamente. Los resultados arrojaron una distribución asimétrica positiva típica, con un coeficiente de variación mayor que uno, la asimetría mayor que cero y una marcada diferencia entre la moda, la media y la mediana (ver tabla 4.1).

Dado el hecho de que el Au no se concentra de igual forma en los distintos tipos naturales de mena, se estudió el comportamiento de dicho elemento en las diferentes unidades o dominios geológicos determinados anteriormente (ver tabla 4.1).

Tabla 4.1- Valores medios de los contenidos de Au en las distintas unidades o dominios geológicos que conforman el yacimiento.

Tipo de mena		Simbología		Promedio Au (g/t)	
Sombrero de Hierro	Limonita Masiva Primaria	Somb_Fe	LMP	4.41	2.15
	Limonita Laterítica		LLA	0.75	
	Limonita Laterítica Pobre		LLP	0.23	
Saprolita		SAP		0.11	
Estéril		EST		0.01	

El análisis estadístico de la ley de Au en los distintos dominios permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- Estéril: Sólo 5 muestras de un total de 96 revelan contenidos de Au con los valores mínimos (0,1g/t), debido a que las rocas riodacíticas y andesíticas, así como las

tobas y toba-brechas, que constituyen la roca de caja, sólo se encuentran cortadas por algunas vetillas de limonitas con pequeñas cantidades de Au.

- Saprolita: Todas las muestras descritas como saprolita reportan contenidos de Au, pero con valores inferiores a 0.2g/t. Estos valores resultan extremadamente bajos.
- Sombrero de hierro: Es la mena más rica con respecto a las demás citadas anteriormente, pues en ella se concentran los mayores valores de Au en el depósito con un rango de 21.82g/t.

De estos tres grupos solo se tomaron en cuenta para los estudios siguientes, los datos pertenecientes a la saprolita y al sombrero de hierro, exceptuando los correspondientes al estéril por no presentar valores significativos. Los principales estadígrafos calculados se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2- Estadística descriptiva de los contenidos de Au en los principales dominios geológicos.

Estadígrafos	Yacimiento	Yacimiento	
		Saprolita	Sombrero de Hierro
No de muestras	99	55	44
Mínimo	0.10	0.10	0.10
Máximo	21.92	0.19	21.92
Rango	21.82	0.09	21.82
Media	0.87	0.12	1.81
Moda	0.10	0.10	0.98
Mediana	0.16	0.10	0.72
Primer cuartil	0.10	0.10	0.25
Tercer cuartil	0.43	0.14	1.34
Error estándar	0.28	0.00	0.60
Varianza	7.73	0.00	16.00
Desviación estándar	2.78	0.03	4.00
Coeficiente de variación	3.20	0.27	2.21
Asimetría	6.26	1.30	4.18
Kurtosis	42.14	0.13	18.14
Kolmogorov-Smirnov stat	0.39	0.39	0.34
Critical K-S stat, alpha=.05	0.14	0.19	0.20
Ln (Au)			
Kolmogorov-Smirnov stat	0.22	0.39	0.12
Critical K-S stat, alpha=.05	0.14	0.19	0.2

A partir de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov se determinó que los contenidos de Au en el sombrero hierro se ajustan a una distribución lognormal para un nivel de significación de 5%. Los gráficos “boxplot” confirman el carácter asimétrico de los

contenidos de Au en el yacimiento, especialmente en el sombrero de hierro, y revelan la presencia de valores extremadamente altos (5 valores).

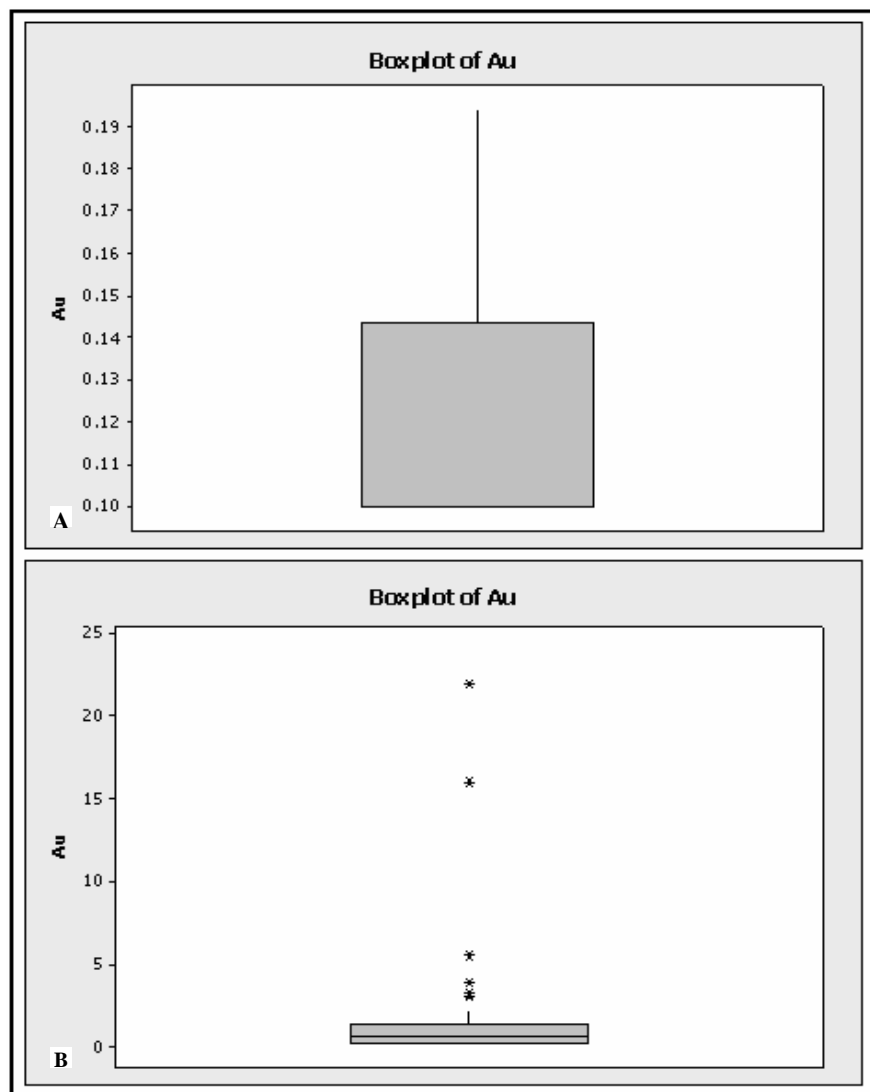


Figura 4.1- Gráficos "boxplot" de los diferentes dominios geológicos. **A-** Saprolita, **B-** Sombrero de hierro.

Como parte de este estudio, también se caracterizó el comportamiento estadístico de las leyes de Au en las muestras limitadas por los contornos de los cuerpos interpretados (modelos No.2 y 3) durante la modelación geológica (capítulo V). El modelo geológico No.2 incluye aquellas muestras que presentan contenidos de Au por encima de 0.3g/t, mientras que el modelo geológico No.3 incluye aquellas con contenidos de Au mayores que 0.11g/t. La figura 4.2 muestra que en ambos casos la ley de Au se ajusta a una distribución lognormal, con uno o dos valores que se apartan de los modelos ajustados.

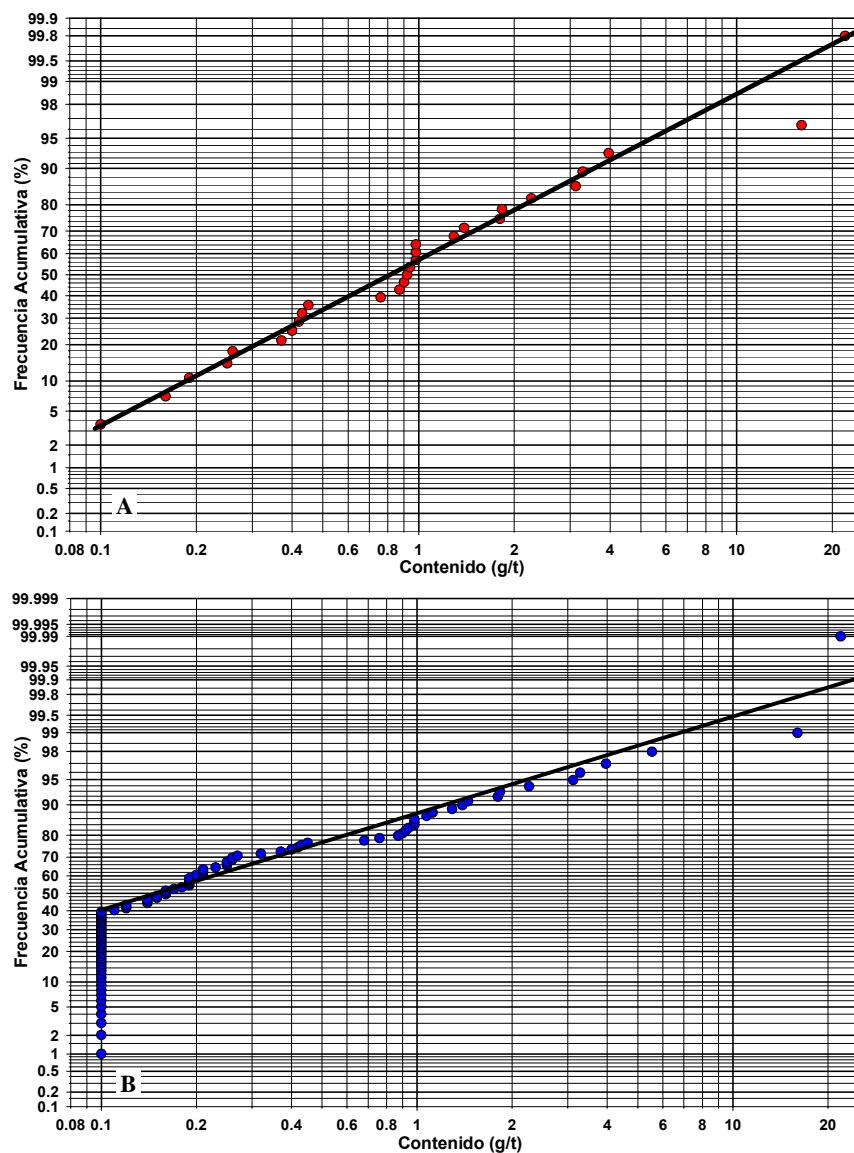


Figura 4.2- Papel probabilístico lognormal. **A-** Modelo geológico No.2 **B-** Modelo geológico No.3.

A partir del comportamiento de los histogramas, se puede observar la existencia de dos poblaciones diferenciadas en cada uno de los grupos (ver figura 4.3). La población 1 de la saprolita, presenta contenidos que van de 0.1-0.17g/t, y la población 2 posee valores de 0.18-0.2g/t. Los contenidos de la población 1 coinciden con la parte más representativa del estéril referente a la saprolita, con solo algunas manifestaciones de finas vetillas limoníticas y zonas arcillosas. Mientras tanto, la población 2 corresponde a aquellas partes más limoníticas de la saprolita con pequeñas cantidades de fragmentos de riodacitas, pórfidos andesítico-dioríticos, tobas, etc.

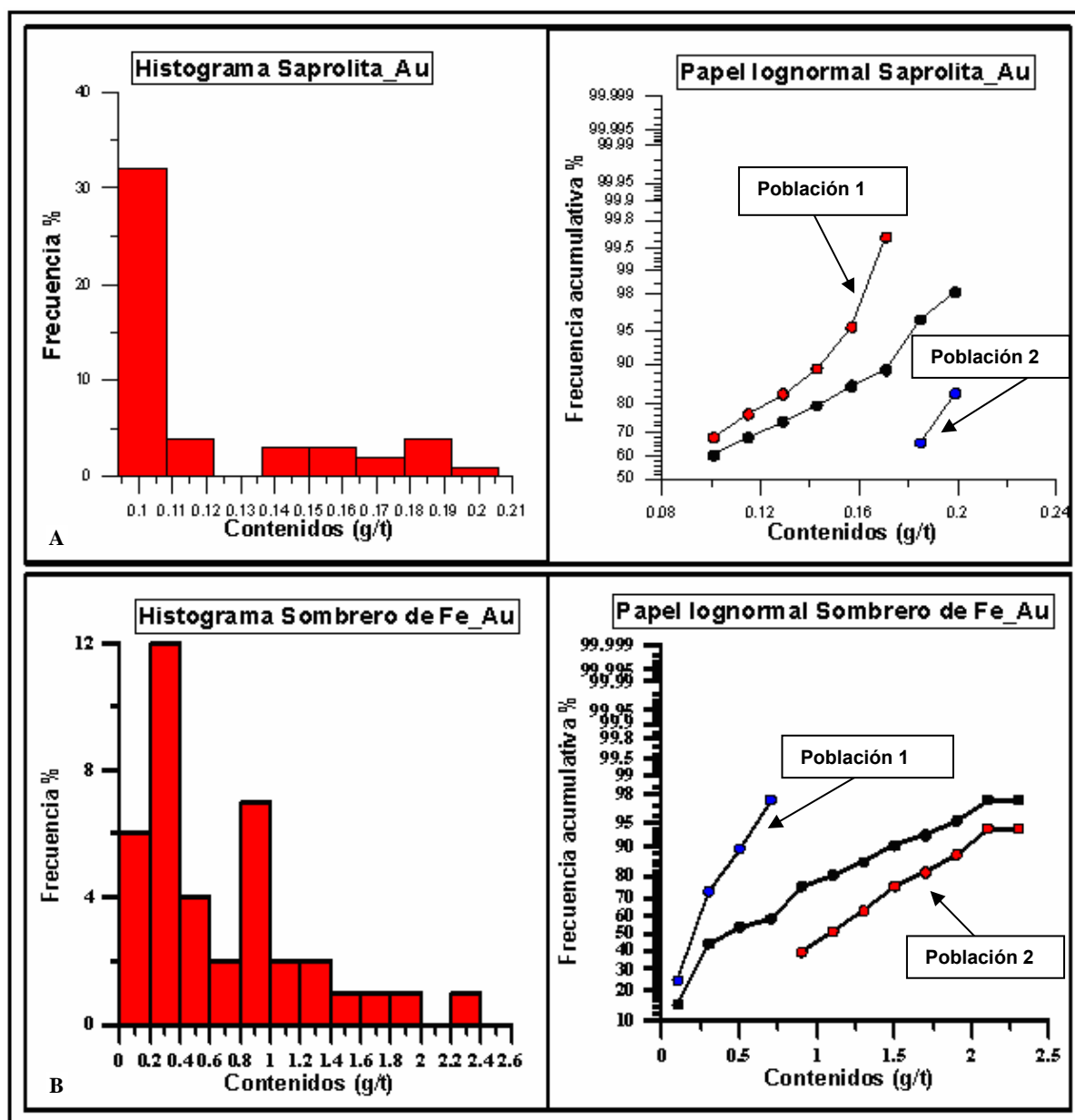


Figura 4.3- Histogramas de frecuencia acumulativa. **A-** Saprolita, **B-** Sombrero de hierro.

En cuanto al sombrero de hierro, los valores de la población 1 varían de 0.1-0.7g/t, mientras que la población 2 está representada por valores de 0.9-2.3g/t. Para este caso, los bajos contenidos de la población 1 se manifiestan en suelos y en las limonitas lateríticas más arcillosas del sombrero de hierro, mientras que los valores más altos hasta anómalos del contenido de Au, corresponden a la zona más rica en limonita masiva primaria (costras duras), constituida por óxidos e hidróxidos de hierro (hematita y goethita). Aunque estos resultados coinciden muy bien con los tipos naturales de mena identificados en el yacimiento, en el tratamiento posterior se trabaja con una población única (zona de oxidación) al estar muy mezclados los tipos naturales, dificultando su separación espacial sobre la base de datos de los pozos.

IV.2 Regularización de las Muestras.

La regularización o compositación no es más que un procedimiento mediante el cual las muestras de los análisis se combinan en intervalos regulares (igual longitud), que no coinciden con el tamaño inicial de las muestras. El objetivo de la regularización, según Barnes (1980), es obtener muestras representativas de una unidad litológica o de mineralización particular, las cuales pueden ser usadas, a través de una función de extensión, para estimar la ley de un volumen mucho mayor de la misma unidad. El tamaño del intervalo de regularización seleccionado fue de 1.50m, tomando en cuenta la longitud media entre las muestras de cada uno de los pozos. Como la distancia entre las muestras es de 1.50m en gran parte del yacimiento, los resultados de la estadística descriptiva son prácticamente similares a los arrojados por las muestras originales.

IV.3 Análisis Estructural o Variográfico de los Datos.

El análisis estructural se realizó para investigar y cuantificar la variabilidad espacial de los contenidos de Au de los diferentes dominios geológicos presentes en el área. El mismo se ejecutó sobre la base de los contenidos con las muestras compositadas, para aquellas que tuvieran valores de Au por encima de 0.3g/t y para todas las muestras, que en el marco de los 22 pozos, reportaran contenidos mayores que 0.11g/t. Se calcularon dos variogramas experimentales: omnidireccional y por la vertical (ver figuras 4.4 a 4.7). Para intentar revelar la estructura espacial de la variabilidad se trabajó no solo con la variable original (Au), sino también con la transformada ($\ln(\text{Au})$) y la indicatriz ($\text{Au} > 0.3\text{g/t}$).

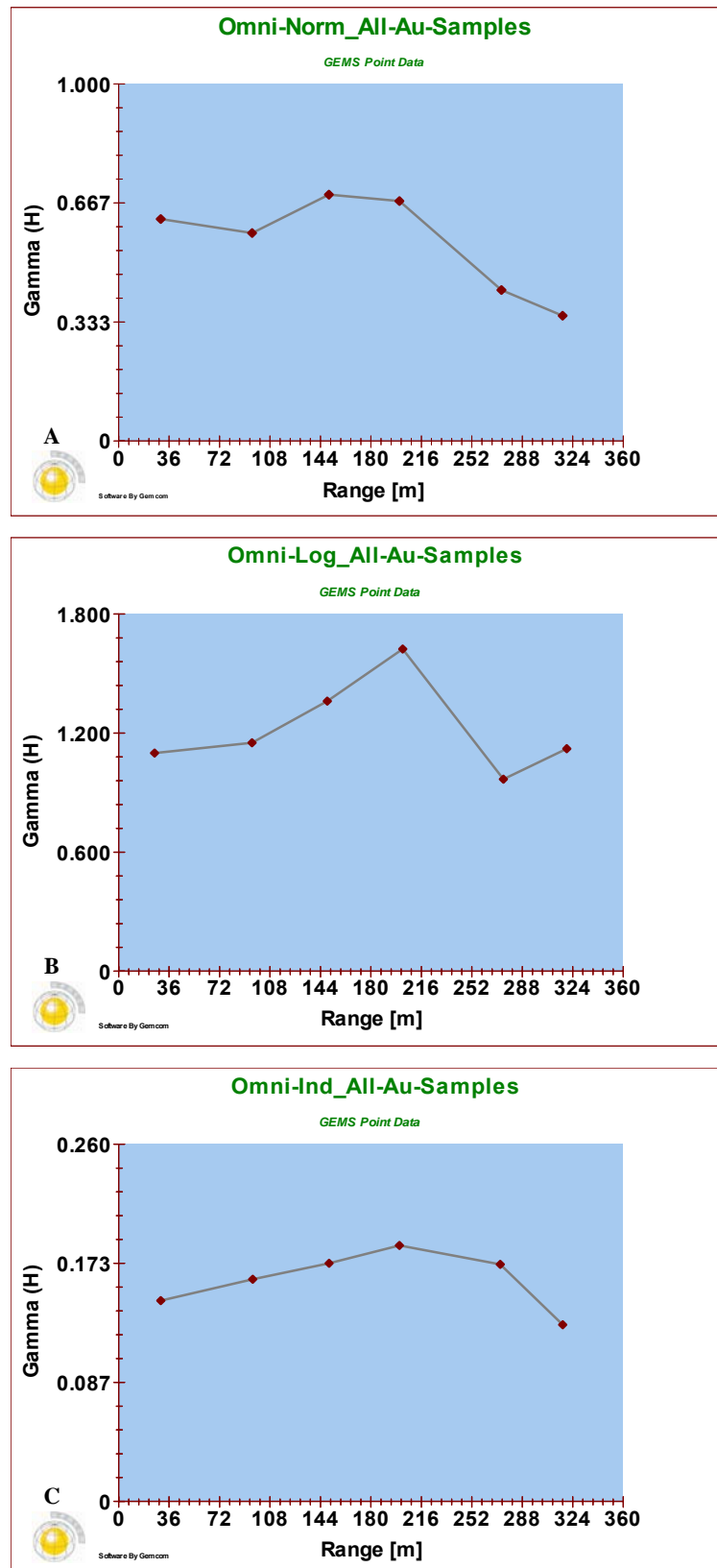


Figura 4.4- Variogramas omnidireccionales de todas las muestras con contenidos de Au. **A-** Normal, **B-** Logarítmico y **C-** Indicador.

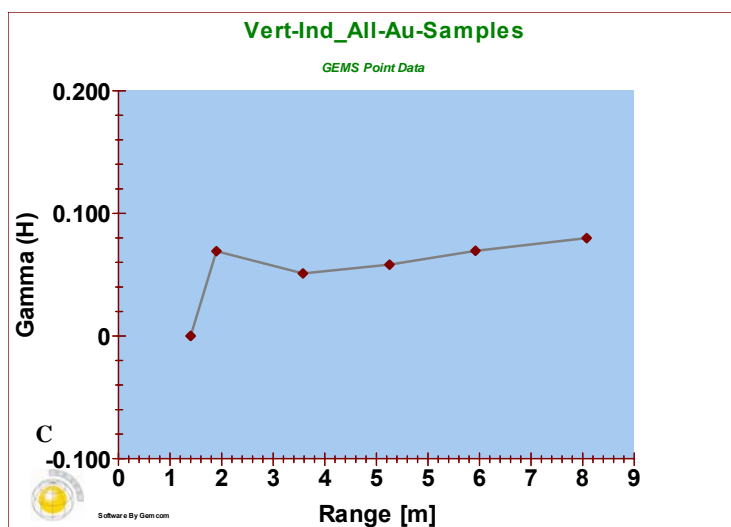
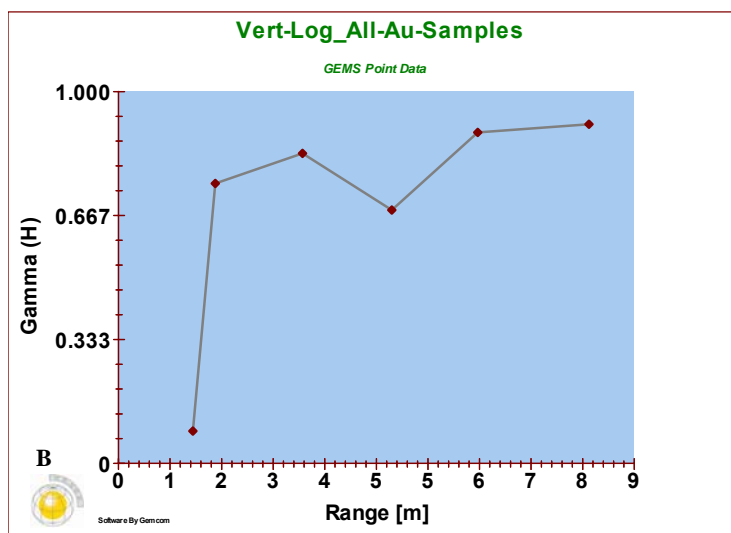
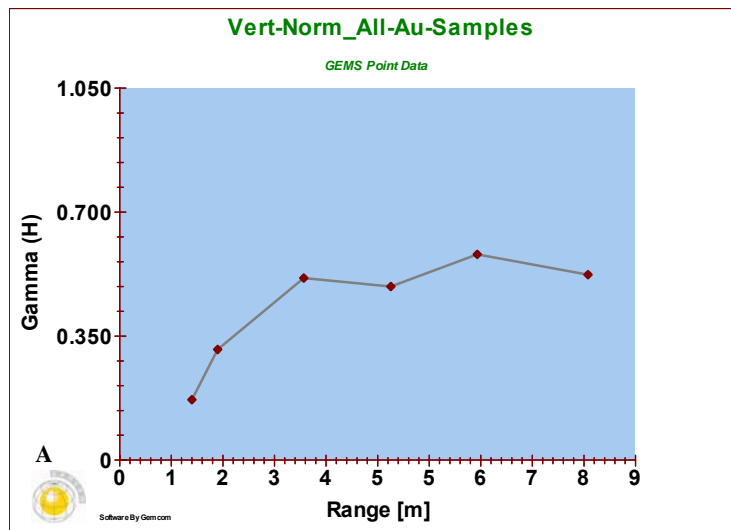


Figura 4.5- Variogramas por la vertical de todas las muestras con contenidos de Au. **A-** Normal, **B-** Logarítmico y **C-** Indicador.

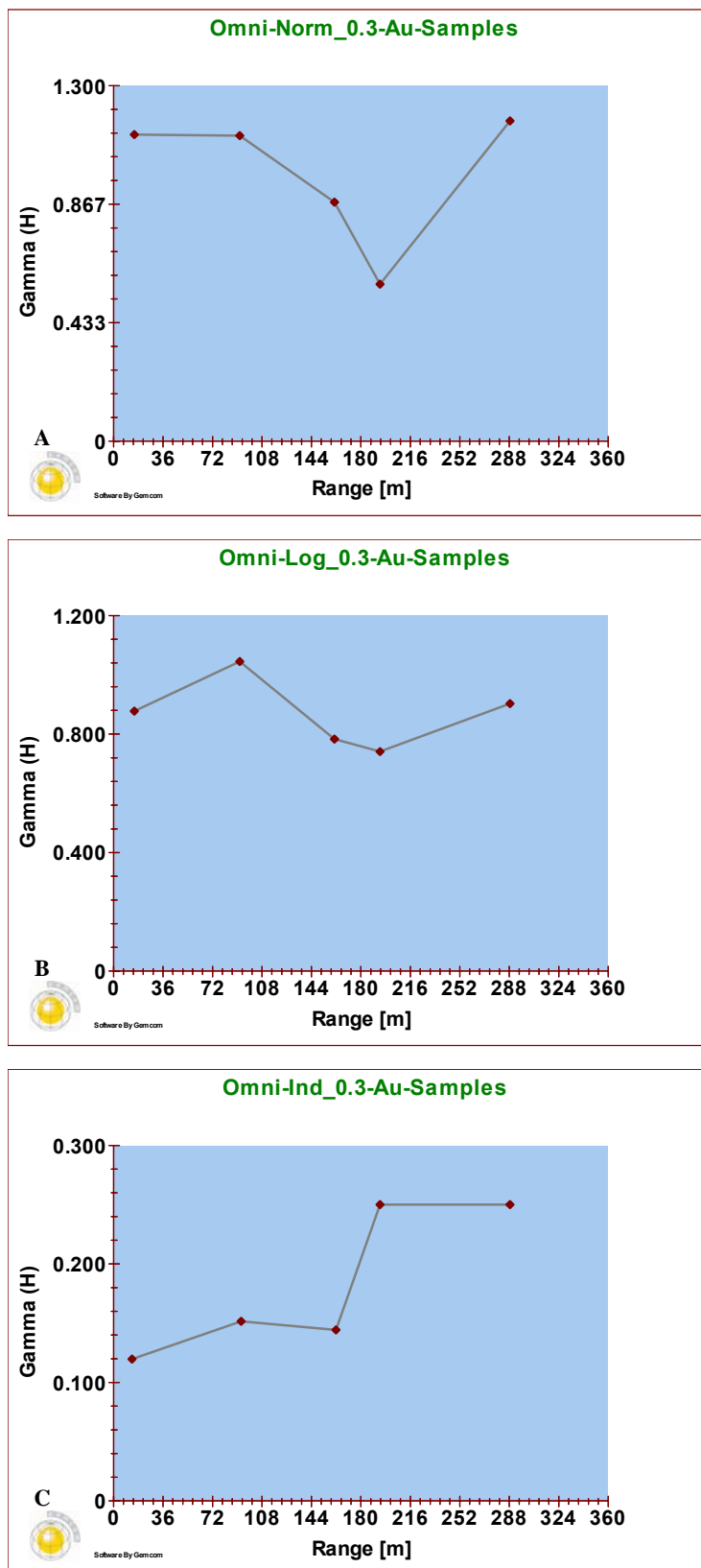


Figura 4.6- Variogramas omnidireccionales de las muestras con contenidos de Au por encima de 0.3g/t. **A-** Normal, **B-** Logarítmico y **C-** Indicador.

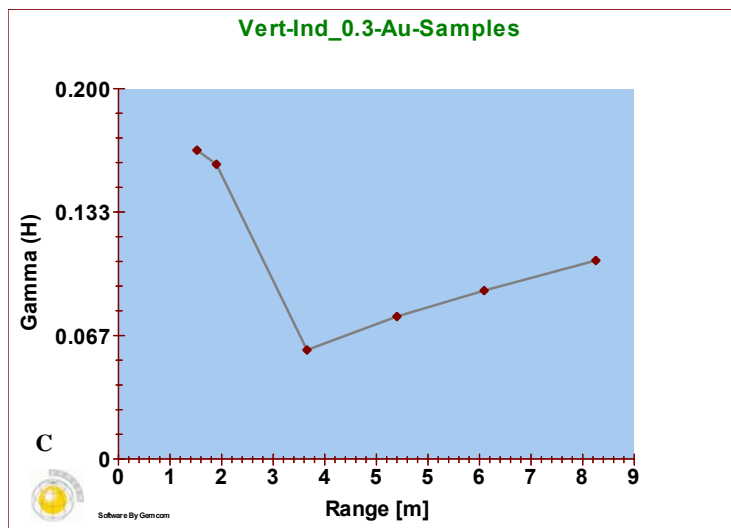
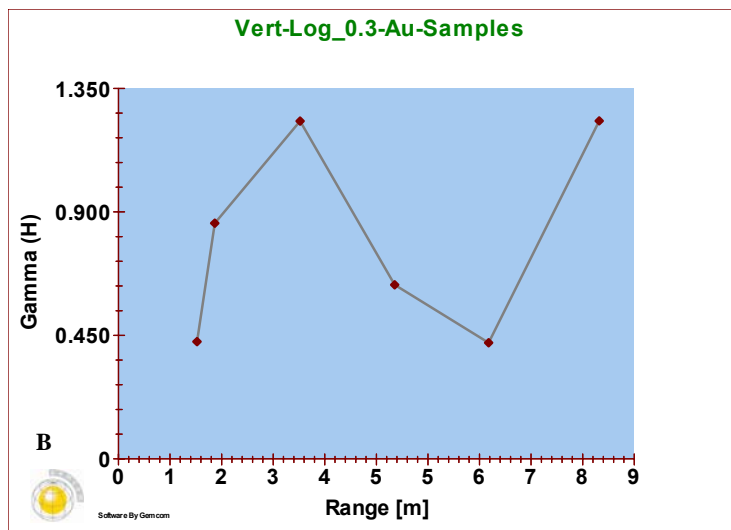
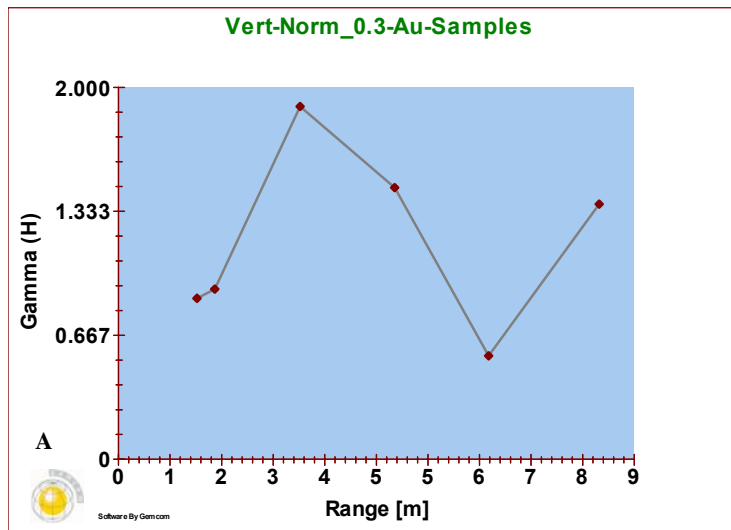


Figura 4.7- Variogramas por la vertical de las muestras con contenidos de Au por encima de 0.3g/t. **A-** Normal, **B-** Logarítmico y **C-** Indicador.

Los variogramas omnidireccionales no revelan continuidad espacial en el plano del yacimiento, lo cual es reflejo de la alta variabilidad que poseen los contenidos de Au en la zona de oxidación y la limitada cantidad de datos con que se cuenta. La estructura espacial, en caso de existir, debe manifestarse a escalas mayores que la utilizada para la prospección del yacimiento (100x50m). Aunque se observa cierta continuidad espacial por la vertical, los resultados deben tratarse con cautela, ya que el estudio realizado a lo largo de los pozos revela una alternancia de zonas mineralizadas y estériles. Solamente en 3 de los 22 pozos, el intervalo perforado está total o parcialmente mineralizado con valores significativos de Au, en el resto de los casos se manifiesta una clara discontinuidad en los contenidos del metal. Estos resultados limitan el uso de los métodos geomatemáticos para la estimación de las leyes de Au.

IV.4 Detección y Tratamiento de los Valores Huracanados (Outlier).

Uno de los objetivos de esta etapa es detectar y darle un tratamiento adecuado a los valores huracanados presentes en el área de estudio. La definición de estos valores está basada en criterios subjetivos y existen varias formas de identificar y evaluar estos valores. Resulta útil para examinar los outlier el empleo de un modelo general de distribución de los datos, donde dicha distribución se refleja como poblaciones múltiples en histogramas y gráficos de probabilidades, de acuerdo a sus características geológicas propias (incluyendo el contenido). En particular, subpoblaciones bien definidas pueden representar comúnmente diferentes dominios geológicos (McKinstry, 1948) caracterizados por atributos variados. En el modelo de interpretación de los datos mostrado esquemáticamente en la figura 4.8, los outlier constituyen una subpoblación representada por pocos valores en un conjunto multimodal de datos (bimodal en la ilustración).

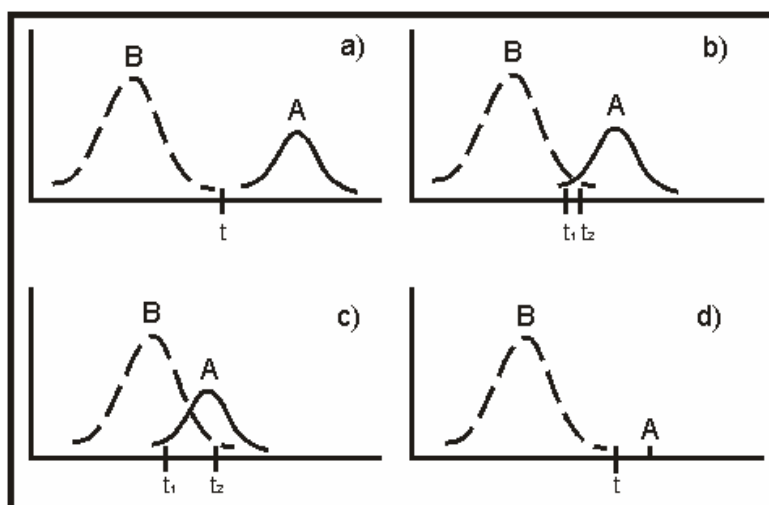


Figura 4.8- Modelo conceptual para dos poblaciones, incluyendo el concepto general de outlier (Sinclair, 1991). a) Dos subpoblaciones con un solape efectivo de los valores,

separados por un umbral simple. b) Ligero solape de dos subpoblaciones con dos umbrales que pueden ser expresados en la práctica como un umbral promedio. c) Solape sustancial de dos subpoblaciones, en el cual un simple umbral no es un separador eficiente. d) Concepto tradicional de outlier en el inventario mineral, que se presenta como pocos valores relativamente altos (subpoblaciones altas) en relación con un volumen de datos (subpoblaciones bajas). *Tomado de Sinclair et al., 2002.

La distribución de los contenidos de Au del yacimiento reflejada en los histogramas realizados anteriormente (capítulo III), corresponde con el caso d) del modelo conceptual para outlier de Sinclair (1991), donde se manifiestan un número limitado de valores altos en una mayoría de datos con valores bajos.

Una variedad de reglas pueden ser implementadas por la computadora para identificar probables outlier, las cuales hacen uso comúnmente de la desviación estándar o dispersión de los datos sobre una tendencia. Los datos que están por encima de 3 veces la desviación estándar a partir de la media, pueden ser clasificados como outlier (Sinclair et al., 2002). En otros casos, la media más 2 veces la desviación estándar puede ser usada como un umbral para separar los outlier de los datos originales (ver tabla 4.3).

Tabla 4.3- Detección automática de valores huracanados.

Variable	Media (g/t)	Desv. Est. (S)	Media+2S	Outlier	Media+3S	Outlier
Au	0.87	2.78	6.43	16.00	9.21	16.00
				21.92		21.92
Ln (Au)	-1.37	1.23	1.09	1.14 (3.12)	2.32	2.77 (16)
				1.19 (3.28)		
				1.38 (3.96)		
				1.71 (5.54)		3.09 (21.92)
				2.77 (16)		
				3.09 (21.92)		

El análisis automático se llevó a cabo tanto para la variable original, como la transformada, teniendo en cuenta que la ley de Au del yacimiento está lognormalmente distribuida. Para la variable original, sólo se reconocen dos valores huracanados en ambos criterios, definiendo a 6.43 como el umbral según las reglas establecidas. El número de outlier identificados para la variable transformada es mucho mayor, seis valores para el criterio de la media más 2 veces la desviación estándar y dos valores para el segundo.

Una gran variedad de procedimientos de ploteo estándar, incluyendo histogramas, papel probabilístico, diagramas de dispersión (X vs Y), gráficos de coeficiente de variación acumulativo y otros, también son muy usados para la identificación de valores anormales que pueden ser verificados contra los datos originales (Sinclair et al., 2002). Para

identificarlos se tuvieron en cuenta dos procedimientos gráficos, de forma tal que se puedan hacer comparaciones y comprobar la similitud entre sus resultados: 1- diagrama de dispersión Au vs Ag y 2- gráfico de CV acumulativo de Au. El primero de ellos ilustra las ventajas de los plots binarios en el reconocimiento de outlier solamente, identificándose cuando se salen de la línea de correlación entre el Au y la Ag (ver figura 4.9). Mientras tanto, el gráfico de CV acumulativo de Au identifica y determina además, el umbral que separa los valores anormales del resto de los datos, en el que el punto a partir del cual el coeficiente se acelera hacia arriba (breakpoint), es donde la influencia de los outlier en la cola superior comienza a fortalecerse (Parker, 1991).

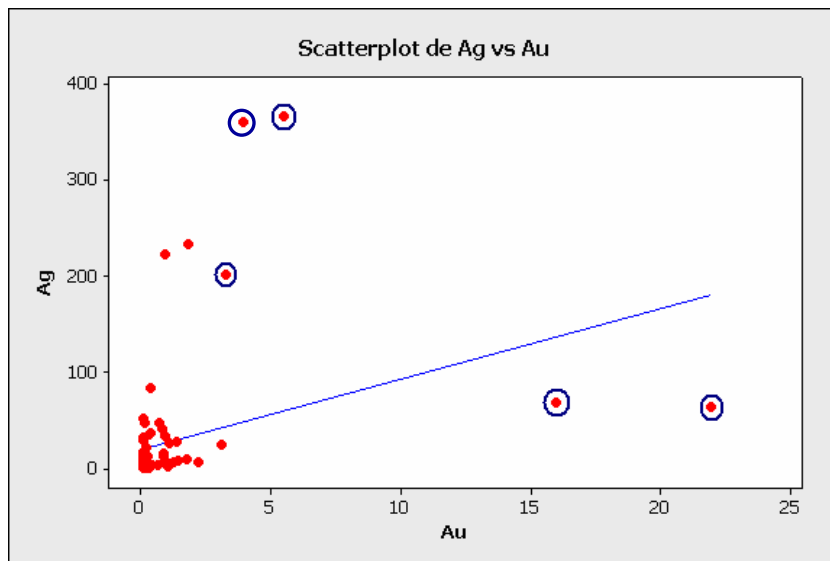


Figura 4.9- Diagrama de dispersión de Au vs Ag con valores outlier de Au encerrados en azul.

En el diagrama de dispersión que muestra los valores del contenido de Au que se apartan de la línea de correlación entre los dos metales, se identifican 5 valores extremadamente altos a partir de 3.12g/t.

Por otra parte, el gráfico de CV acumulativo (ver figura 4.10) reveló un valor de corte (3.12g/t) que coincide con el punto donde la asimetría de la cola superior se acelera, ejerciendo mayor influencia con respecto a los demás valores. La distribución se rompe en este punto, considerando todos los valores por encima del breakpoint como huracanados.

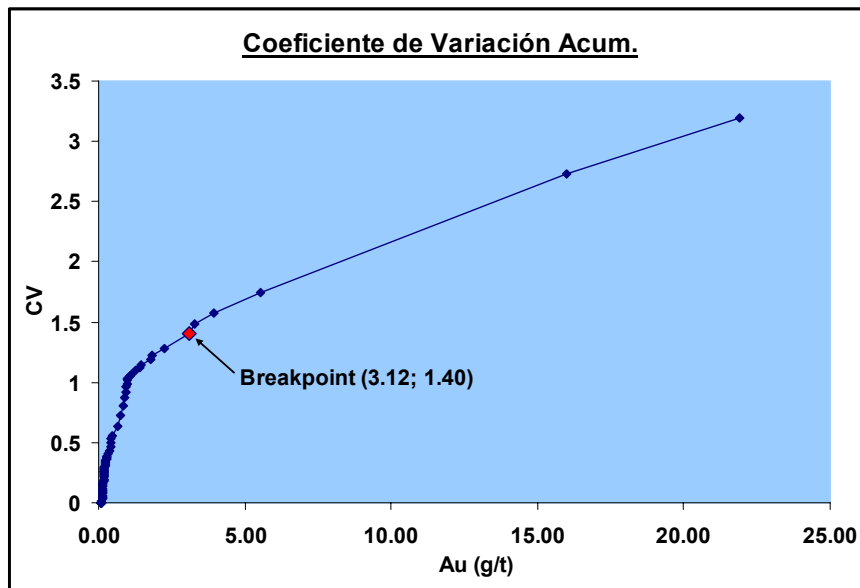


Figura 4.10- Coeficiente de variación acumulativo de Au.

Por encima de 3.12g/t solamente se detectan 5 muestras, las cuales fueron tratadas de tres formas diferentes durante la construcción del modelo de recursos:

- Se incluyen los outlier.
- Se incluyen los outlier, pero reduciendo la zona de influencia una distancia determinada.
- Se corta la distribución sustituyendo los outlier por el valor de corte.

Estos resultados son consistentes con los obtenidos en los dos procedimientos anteriores.

Los valores aquí detectados como outlier presentan ciertas características comunes y significativas que explican el porqué de su contenido y que fueron tomadas en cuenta durante la construcción del modelo de recursos. Ellas son:

- Se asocian a las limonitas masivas primarias.
- Se limitan a dos pozos solamente.
- Se suceden en la vertical alcanzando un longitud entre 3-5m.

CAPÍTULO V. MODELO GEOLÓGICO.

En este capítulo abordaremos los resultados obtenidos en la modelación geológica y de recursos del sombrero de hierro San Fernando.

V.1 Modelo Geológico.

Ya en esta etapa, el grado de conocimiento geológico que se posee sobre la estructura que se está estudiando, su continuidad y leyes, es mucho más amplio que en etapas anteriores. Esto permitirá la definición de unidades o dominios geológicos que posean una forma geométrica diferente unas de otras.

Los dominios geológicos no son más que zonas geológica y estadísticamente homogéneas. Lo que realmente se hace cuando se crea el modelo geológico del yacimiento, es subdividir el depósito en subpoblaciones que cumplan o se aproximen a la hipótesis de estacionaridad. La división del yacimiento en dominios siempre debe basarse en el conocimiento geológico y el sentido común. Guibal (1997) señala que la selección de los dominios geológicos debe estar respaldada y validada por la estadística y la variografía.

El modelo geológico o geométrico representa la localización espacial y la morfología de los cuerpos minerales y se emplea para controlar geológicamente el modelo de recursos. Los modelos se generaron a partir de la correlación geológica de un dominio o unidad y atendiendo a los contenidos de Au en este depósito. Las secciones verticales transversales elaboradas fueron 11 en total (orientación de N-S y E-W), permitiendo el trazado de las líneas (contornos) entre pozos de una misma sección y entre los distintos perfiles.

Se crearon tres modelos geológicos de acuerdo a los siguientes elementos:

- Litológico.
- Ley del componente útil.

El modelo geológico No.1 se confeccionó sobre la base de la litología (tipos de mena), constituido a su vez por sombrero de hierro, saprolita y estéril. Para la delimitación de los límites físicos, las muestras fueron codificadas de acuerdo a los tipos litológicos, como se observa en la tabla 5.1.

Tabla 5.1- Modelo geológico No.1. Clasificación lito-tecnológica de los tipos de menas.

Descripción		Abreviatura		Tipo de mena	Código de mena	Código de color
Sombrero de Hierro	Limonita Masiva Primaria	ZONA_OXI	LMP	Mena 1	1	Red
	Limonita Laterítica		LLA			
	Limonita Laterítica Pobre		LLP			
Saprolita		SAPROLIT		Mena 2	2	Blue
Estéril		ESTERIL		Mena 3	3	Green

Mientras tanto, los modelos geológicos No.2 y 3 se elaboraron atendiendo a la ley del componente útil del depósito, delimitando por intervalos aquellas zonas que tienen alta, media o baja ley (ver tabla 5.2).

Tabla 5.2- Modelo geológico No.2 y 3. Clasificación atendiendo al contenido de Au.

Modelo Geológico	Descripción	Contenido de Au (g/t)	Código de mena	Código de color
2	AU_CUTOFF	> 0.3	4	Yellow
	AU_NOCUT	0.10-0.3	5	Magenta
	AU_EST	< 0.10	6	Orange
3	AU_0.11	> 0.11	7	Yellow
	AU_0.10	< 0.11	8	Magenta

A priori y sin tener en cuenta variables económicas, el valor de corte debe estar en el orden del contenido del metal en las colas resultantes del proceso de beneficio (0.44-0.47g/t). Sin embargo, en esta investigación se utilizó un valor ligeramente inferior (0.3g/t) sobre la base de la etapa de las investigaciones geológicas en la que se encuentra el yacimiento (prospección) y para lograr cuerpos lo suficientemente continuos. El otro valor de corte utilizado está relacionado con el límite de detección de la técnica analítica empleada (0.1g/t).

V.1.1 Digitalización de los Contactos (Perímetros) y Creación de los Sólidos.

Partiendo de la digitalización de los contactos entre los diferentes tipos de mineralización e intervalos de los contenidos de Au, se confeccionaron una serie de perfiles que reflejan la distribución espacial de las diferentes unidades interpretadas. Primeramente se crean una serie de polígonos cerrados (3D Rings) en cada perfil, que delimita las unidades atendiendo a la litología y a los contenidos del componente útil. A dichos polígonos se les asigna un nombre que corresponde con el tipo de información a delimitar y con la dirección del perfil en cuestión.

Los parámetros espaciales de los perfiles utilizados para construir el modelo geológico 3D, se especifican en la tabla 5.3. Para validar el modelo geológico, la interpretación se realizó en dos sistemas de perfiles ortogonales (N-S, E-W).

Tabla 5.3- Secciones verticales transversales.

No.	Perfiles	Dirección	Zona de Influencia	
			Hacia atrás (m)	Hacia adelante (m)
1	377425	Norte	17.50	17.50
2	377470	Norte	17.50	30.00
3	377530	Norte	30.00	25.00
4	377580	Norte	25.00	17.50
5	706580	Este	60.00	60.00
6	706700	Este	60.00	37.50
7	706775	Este	37.50	12.50
8	706800	Este	12.50	50.00
9	706900	Este	50.00	35.00
10	706970	Este	35.00	50.00
11	707070	Este	50.00	50.00

Se procede luego a la conexión de cada uno de los polígonos cerrados (3D Rings) con el tipo de línea “tie line”, para que los perímetros digitalizados se correlacionen entre sí en perfiles continuos, de forma tal que se pueda generar un sólido tridimensional que represente la zona modelada. Un ejemplo de ello se observa en la figura 5.1 con la modelación de la zona de oxidación (sombrero de hierro), en la cual se manifiestan los mayores valores de Au en el depósito.

Algunos de los perfiles transversales interpretados se pueden visualizar en las figuras 5.2, 5.3 y 5.4, en los cuales se reflejan los parámetros que se tomaron en cuenta para la construcción de los modelos geológicos No.1 y 2. Se seleccionaron aquellos perfiles que tienen mayor representatividad con respecto a las zonas y variables de interés, principalmente los que interceptan los cinco pozos situados al Norte del depósito, que son los que reflejan los mayores valores de Au.

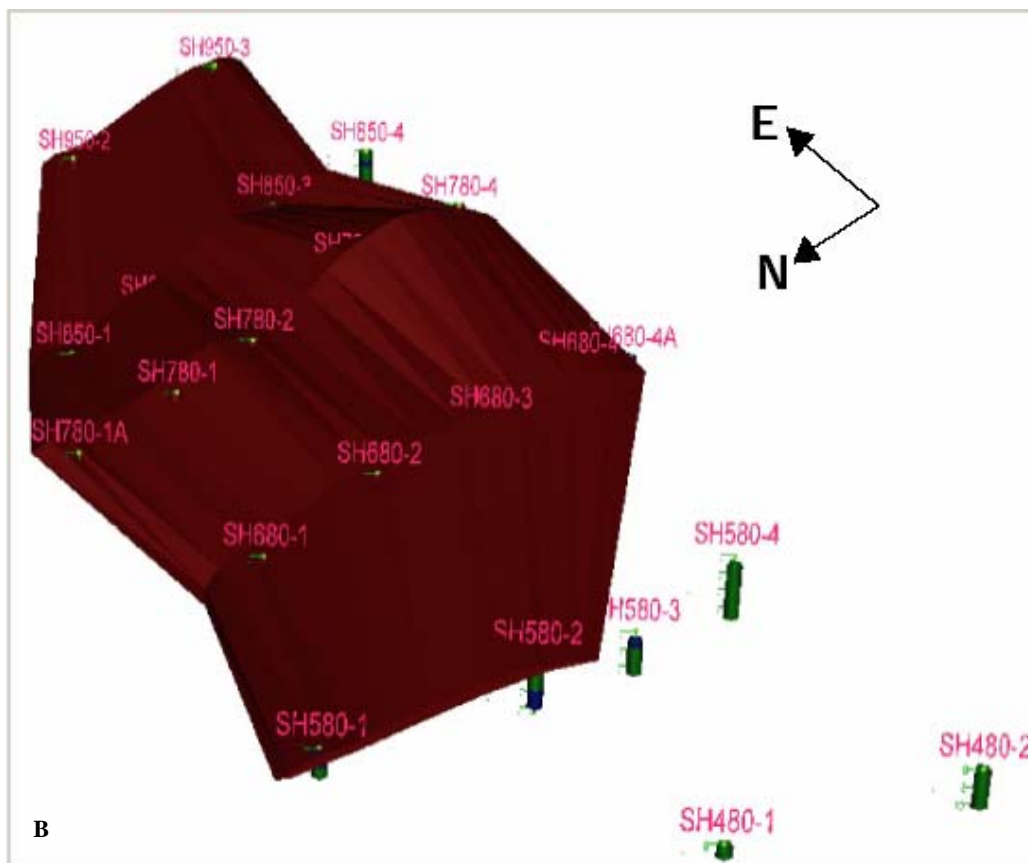
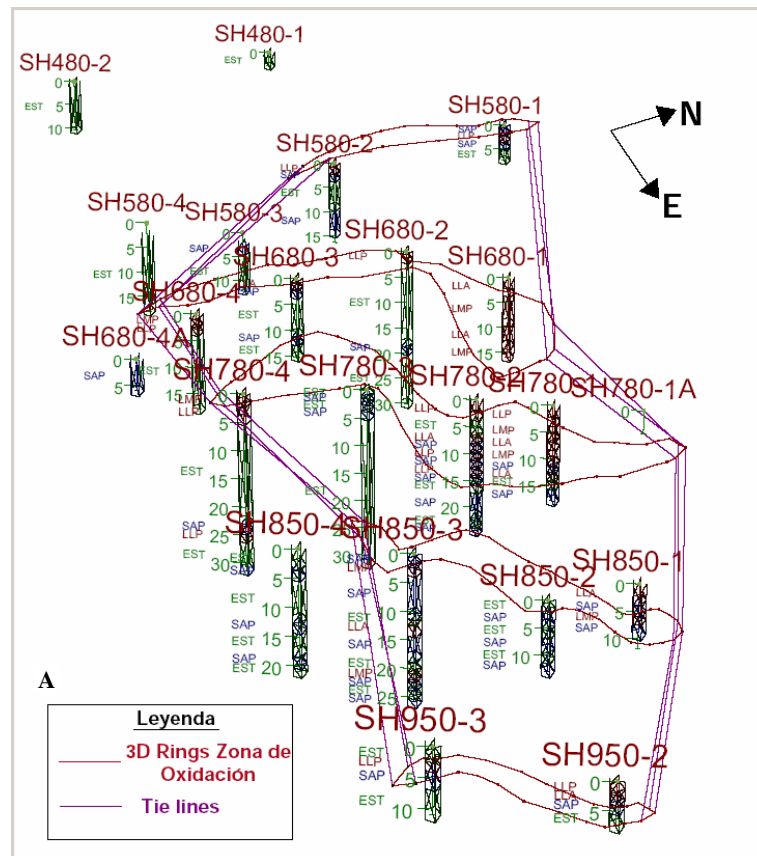


Figura 5.1- A- Polígonos cerrados (3D Rings) unidos a tie lines. **B-** Sólido de la zona de oxidación.

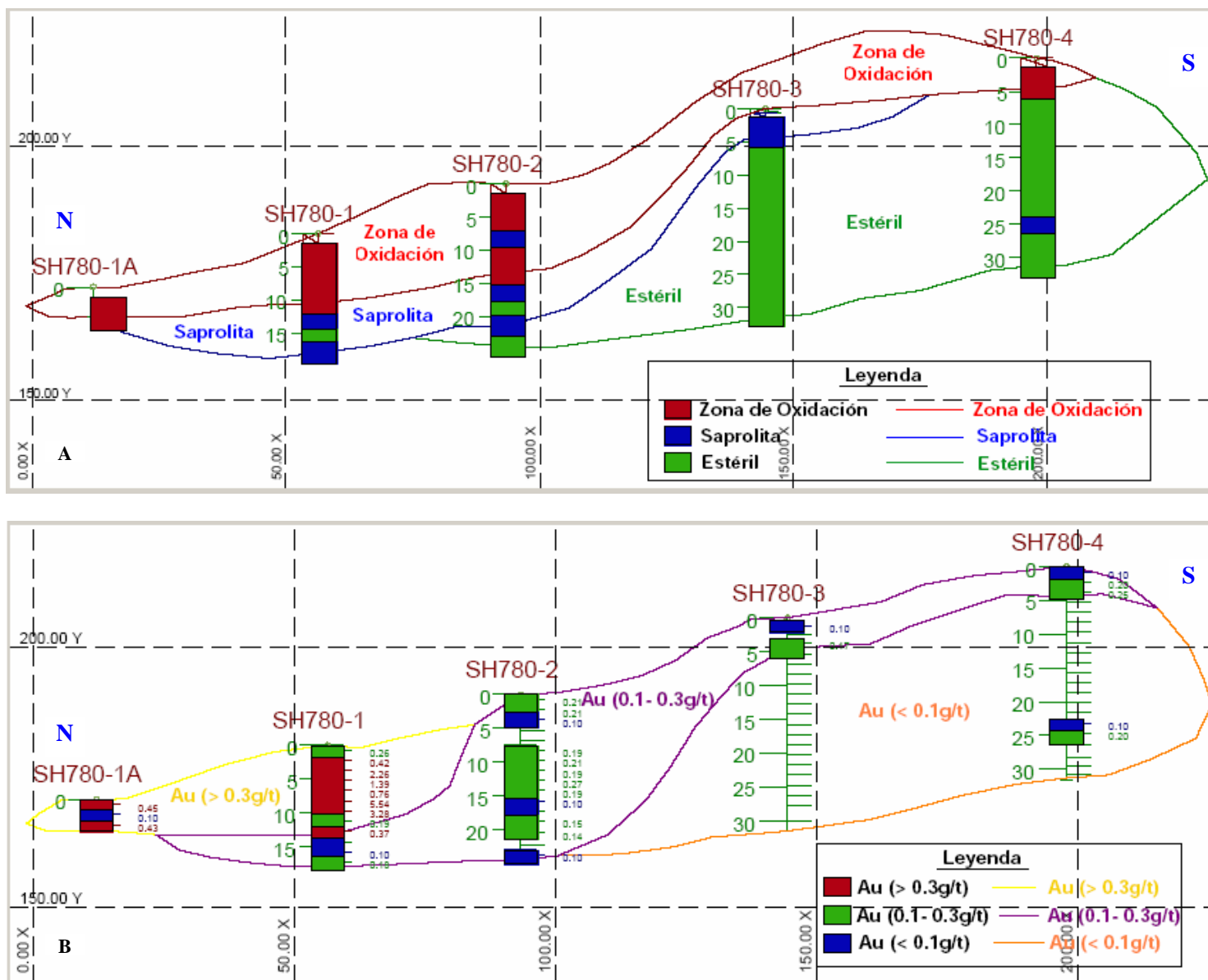


Figura 5.2- Perfil geológico 706900E. A- Modelo geológico No.1. B- Modelo geológico No.2.

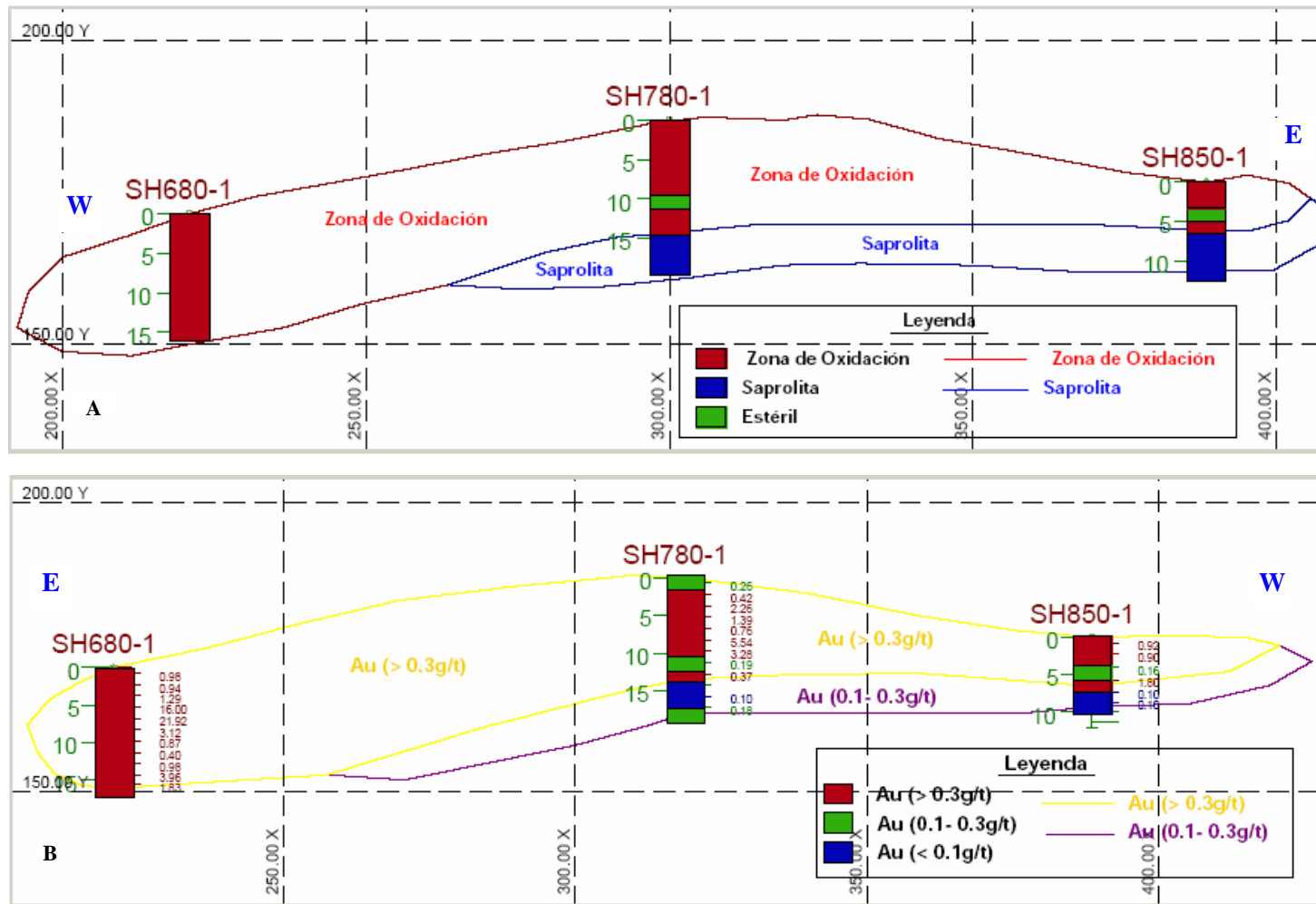


Figura 5.4- Perfil geológico 377580N. **A-** Modelo geológico No.1. **B-** Modelo geológico No.2.

El modelo geológico No.1 representa la distribución espacial de las diferentes unidades del perfil saprolítico, en el que el estéril (roca de caja) se encuentra en la parte inferior cubierto por rocas saprolíticas, y éstas a su vez sobreyacidas por una zona de oxidación en la parte noreste del depósito (ver figura 5.5).

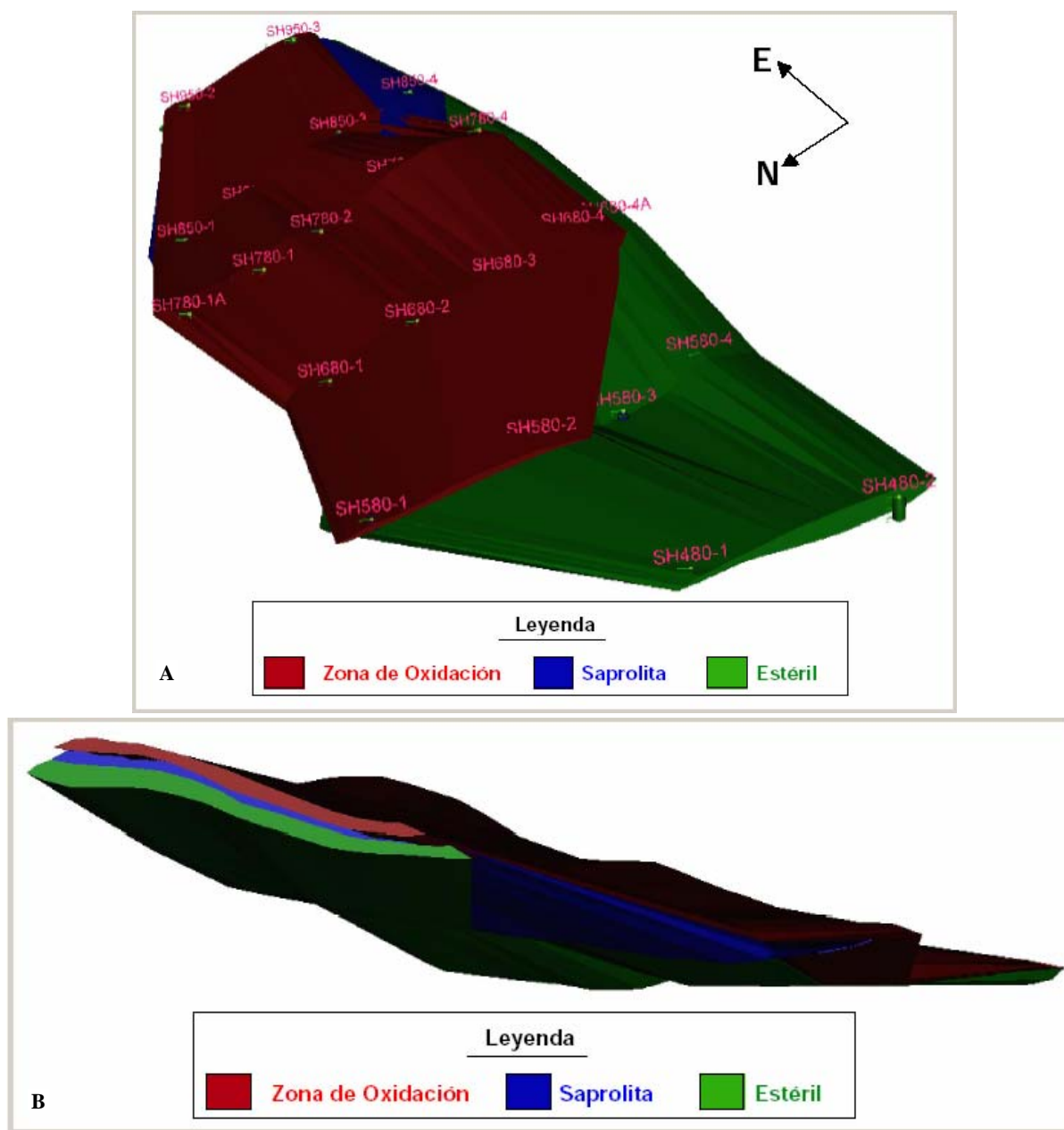


Figura 5.5- Modelo geológico No.1. Vista en diferentes direcciones **A** y **B**.

La distribución espacial del componente útil en el depósito, se ve reflejada en los modelos geológicos No.2 y 3 de las figuras 5.6 y 5.7, respectivamente. En ellos se puede apreciar la

concentración de los valores más altos de Au en la porción norte del yacimiento, coincidiendo a su vez con la zona del sombrero de hierro representada por las costras duras y esqueléticas de limonita, goethita, etc. Los valores intermedios se relacionan en este caso con la saprolita y con las partes de la zona de oxidación representadas por las limonitas y arcillas lateríticas. Por otra parte, la mayoría de las muestras que no reportan contenidos de Au corresponden a las rocas riolacíticas y andesíticas, así como las tobas y toba-brechas (rocas de caja o estéril).

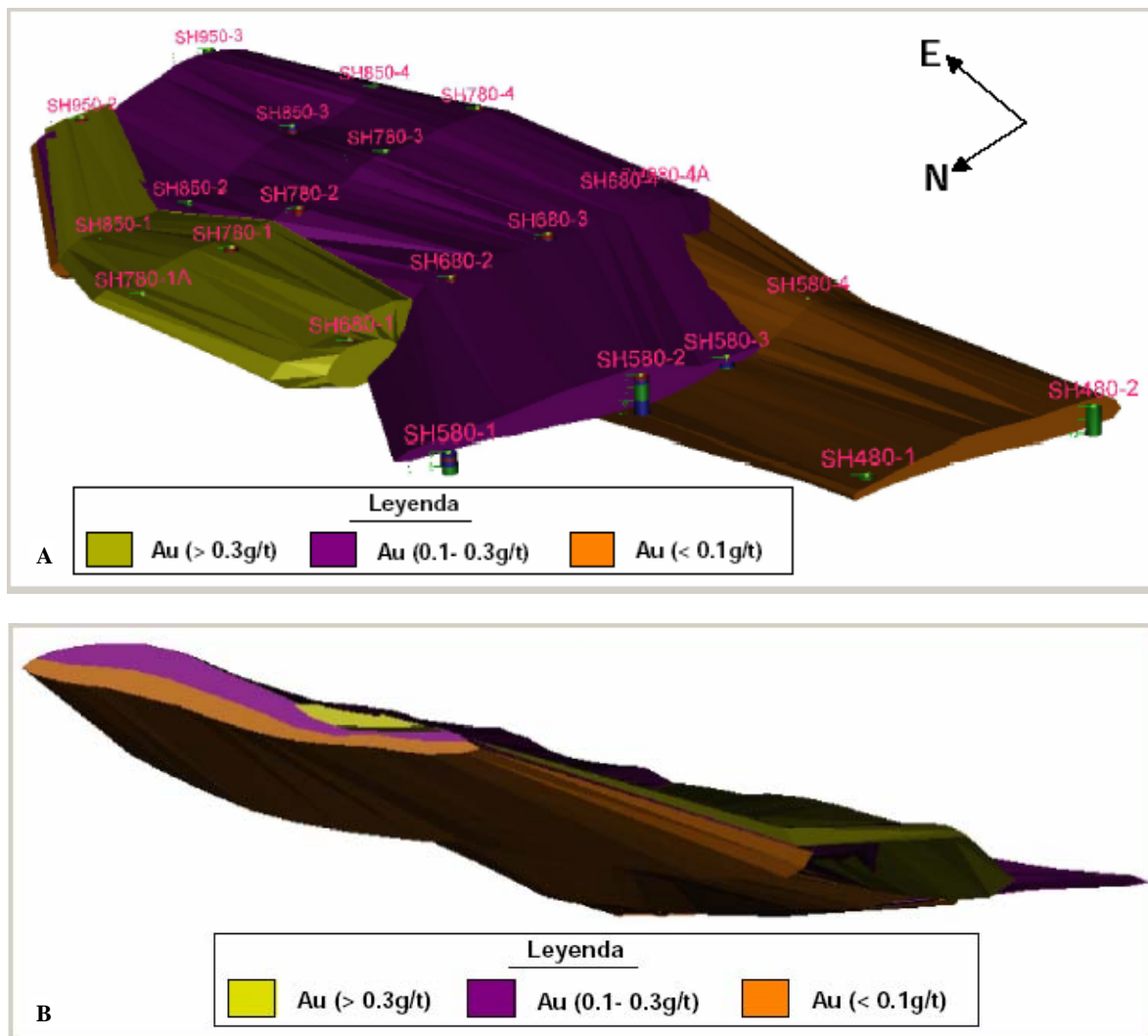


Figura 5.6- Modelo geológico No.2. Vista en diferentes direcciones **A** y **B**.

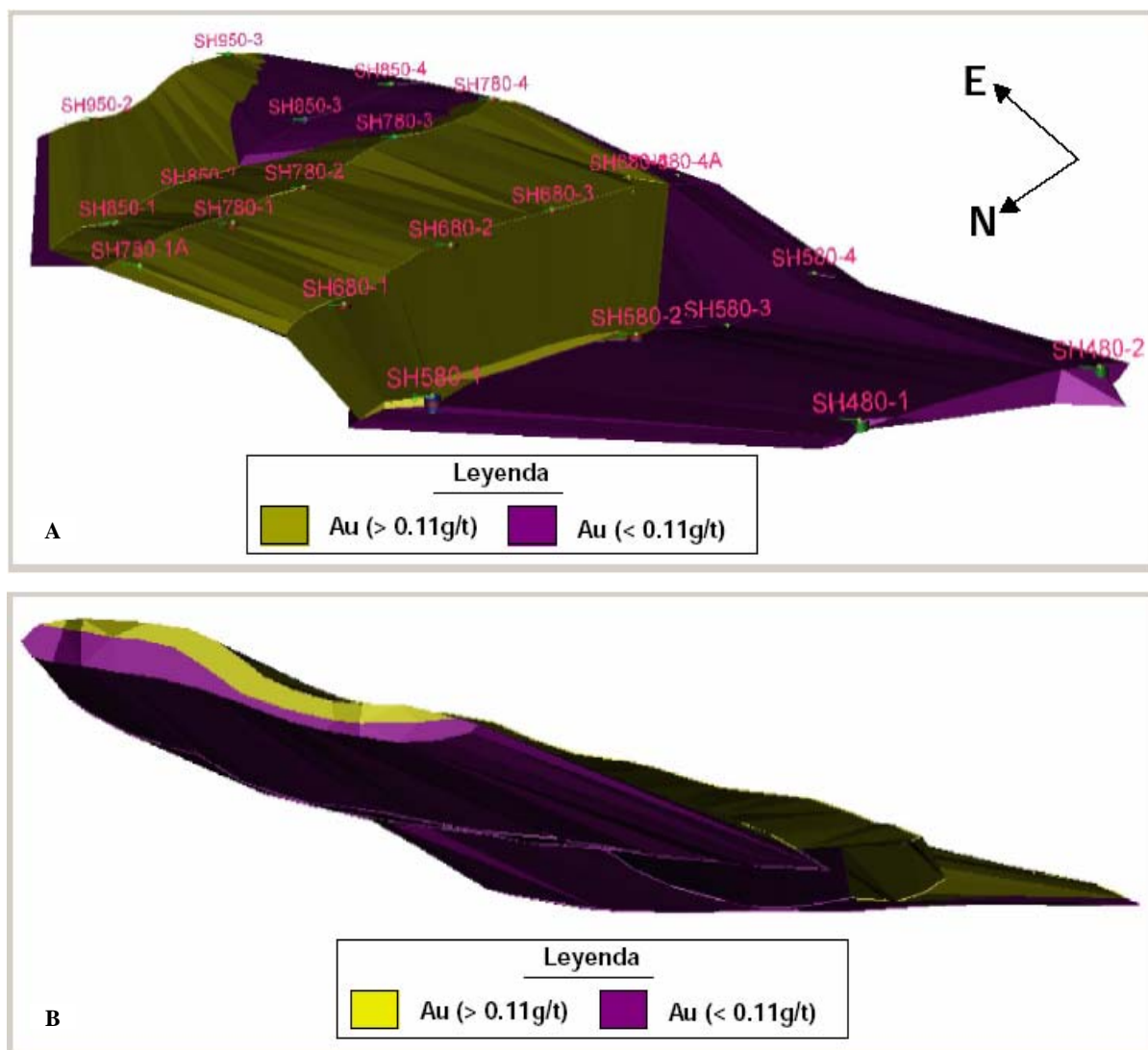


Figura 5.7- Modelo geológico No.3. Vista en diferentes direcciones **A** y **B**.

V.2 Modelo de Recursos.

Una vez obtenido el modelo geológico, se hace necesario conocer la variación espacial de las principales variables en el yacimiento y finalmente estimar el volumen, el tonelaje y la cantidad de metal a nivel local (bloque a bloque) y de forma global. Sobre la base de este modelo se valora el impacto que provocan los valores extremadamente altos (outlier) en los recursos globales del yacimiento.

Para la evaluación de los recursos, se tomó en cuenta el modelo de bloques, el cual se definió a partir de la extensión espacial de la información disponible. Este modelo consiste en la discretización del espacio 3D en bloques o celdas (voxels) regulares, que ocupan todo el volumen del depósito.

V.2.1 Definición del Modelo de Bloques.

Para la construcción del modelo de bloques, primero se establece el origen del mismo, ajustándole las coordenadas tridimensionales de la esquina inferior izquierda:

X mín: 706650 **Y mín:** 377375 **Z mín:** 110

El modelo de bloques establecido cuenta con la siguiente geometría, definida de tal manera que abarque toda el área de interés:

X mín: 706650	X máx: 707100	Tamaño columnas: 50	No. de columnas: 9
Y mín: 377375	Y máx: 377650	Tamaño filas: 25	No. de filas: 11
Z mín: 110	Z máx: 210	Tamaño niveles: 5	No. de niveles: 22

La definición de las dimensiones de los bloques se basó en el criterio manejado en la literatura: *el tamaño del bloque puede ser tan grande como el espaciamiento medio de la red y no debe ser menor a 1/4 o 1/3 del espaciamiento de esta* (Houlding, 1994; Duke et al., 1991). En este caso se trabajó con 1/2 del espaciamiento de la red, teniendo en cuenta el estadio de las investigaciones geológicas en la que se encuentra el yacimiento (prospección), donde lo más importante es lograr una estimación global de los recursos del yacimiento.

Atendiendo a las características de la red de exploración de este yacimiento (100x50m), para la dirección Este y Norte del plano se escogieron 50 y 25m, respectivamente, mientras que en la vertical se seleccionó un tamaño de 5m que coincide con la altura probable de los futuros bancos de explotación.

Ya definido el modelo de bloques, se interceptó con los modelos geológicos No. 2 y 3 determinados anteriormente, para descartar aquellas celdas que no caen dentro del contorno de los sólidos. La evaluación se realizará solamente a partir estos modelos que definen toda la envoltura de contenidos de Au reportados, ya que el nivel de conocimiento en esta etapa en la cual se realiza el estudio, no presenta gran confiabilidad con respecto a los tipos tecnológicos y naturales de mena. Por lo tanto, se elaboraron dos modelos de bloques con la misma geometría, pero para dos sólidos diferentes, con el fin de comparar la estimación para todo el yacimiento y para la zona con contenidos por encima de 0.3g/t.

A partir de los resultados de la intercepción, se obtuvieron varios modelos: modelo de Tipo de Roca, modelo de Densidad, modelo de Porciento, modelo para los contenidos de Au de cada uno de los sólidos y un modelo que refleja la cantidad de muestras empleadas para estimar cada bloque.

V.2.2 Estimación de la Ley de Au en los Sólidos.

Como toda estimación, el análisis estructural es un elemento clave para la determinación de los parámetros que se tienen en cuenta en la misma. Dado el caso de este yacimiento, en el que no se pudieron obtener modelos matemáticos que describieran la variabilidad espacial de la mineralización, el método geomatemático de estimación empleado fue el Inverso de la Distancia.

V.2.3 Método de Estimación Geomatemático Inverso de la Distancia (ID²).

Este método se basa en una combinación lineal de los datos que se encuentran dentro de un volumen de búsqueda. Los pesos atribuidos a cada muestra dependen de la distancia entre el centro del bloque y la muestra en cuestión, donde las muestras más cercanas reciben mayor peso (responde a una función inversa de la distancia) y viene dada por:

$$Z^*(x) = \sum \lambda_i Z(x_i)$$

En la que λ_i son los pesos o coeficientes de ponderación proporcionales a la distancia euclidiana entre las localizaciones muestreadas y la que se desea estimar y son calculados por:

$$\lambda_i = (1/d_{oi}) / \sum 1/d_{oj}$$

donde d_{oi} es la distancia entre la localización a estimar y la localización de la muestra i.

Sustituyendo obtenemos:

$$Z^*(x) = [\sum_{i=1,n} 1/d_{oi} Z(x_i)] / \sum_{i=1,n} 1/d_{oj}$$

Se pueden obtener distintos estimadores si escribimos la ecuación anterior como:

$$Z^*(x) = [\sum_{i=1,n} (1/d_{oi})^\omega Z(x_i)] / \sum_{i=1,n} (1/d_{oj})^\omega$$

$$Z^*(x) = [\sum_{i=1,n} Z(x_i) / (XD_i^2 + YD_i^2)^{\omega/2}] / \sum_{i=1,n} 1 / (XD_i^2 + YD_i^2)^{\omega/2}$$

Note que si el exponente de la distancia $\omega = 1$, obtenemos la ecuación anterior.

Para aplicar el método es necesario en primer lugar escoger el valor del exponente de la distancia. En la medida que aumente el exponente, disminuye la influencia de los valores de las muestras más alejadas, mientras aumenta la influencia de las muestras más próximas. Para lograr el compromiso entre los dos principios en la estimación de recursos, se ha empleado un exponente igual a dos.

V.2.4 Definición de la Vecindad de Búsqueda.

En un principio, las muestras que se emplearon para la estimación final de los sólidos, se separaron mediante extracciones (subconjuntos), de tal manera que correspondan con el sólido en cuestión. Los parámetros utilizados en la estimación, dado que no se pudo obtener ninguna estructura espacial definida del componente útil, fueron determinados según la distancia entre perfiles y la profundidad promedio de los pozos de prospección. Tales parámetros se muestran a continuación:

- Tamaño de la vecindad de búsqueda: se estableció 200m en las dos direcciones X y Y del plano horizontal y 10m por la vertical.
- Tipo de búsqueda: por octantes con un mínimo de 1 y máximo de 2 muestras.

V.2.5 Impacto de los Outlier en la Estimación de Recursos.

La experiencia ha demostrado que una pequeña proporción (en el orden de 1% o menos) de valores de Au muy altos (1 ó 2 órdenes mayores que el promedio de las muestras predominantes), puede conducir a una seria sobreestimación de la ley media. Comúnmente, las poblaciones de outlier son geológicamente diferentes y tienen una continuidad física (geológica) muy limitada en relación con los valores más bajos; por lo tanto, asumir que los valores huracanados pueden ser extendidos a los bloques adyacentes a una misma distancia que los valores bajos, puede conducir a una sobrestimación significativa de los recursos (Sinclair et al., 2002).

La categoría geológica de los outlier incluye aquellos valores extremadamente altos, rodeados por una población inferior. Esta situación que ocurre comúnmente, refleja dos estilos distintivos de mineralización 1- diseminada y 2- vetillas, como es el caso del Au en algunos depósitos de metales preciosos. Aunque se esté consciente del hecho de que ambos estilos posean una autocorrelación totalmente diferente (continuidad espacial), la práctica común en la estimación es incluir las muestras de ambas mineralizaciones como la misma variable regionalizada. Desafortunadamente, a pesar del conocimiento de este problema, se continúa tratando subjetivamente en la práctica, contribuyendo a una sobrestimación de la ley y tonelaje recuperable en muchos depósitos de metales preciosos (Sinclair et al., 2002).

Aunque en el presente trabajo los valores huracanados se manifiestan en las limonitas masivas primarias de la zona de oxidación, para la estimación de recursos se restringió su zona de influencia a un nivel más local (75x37.5x7.5m coincidiendo con las dimensiones de un bloque y medio en las tres direcciones), con el fin de evaluar su impacto en el estimado final.

V.2.6 Reporte de Recursos.

Una vez completado el modelo de recursos, se prosiguió con la estimación de la ley media del componente útil, así como la cantidad de metal, tonelaje y volumen. Los resultados de la estimación por bloques, fueron recalculados en un fichero Excel para obtener una ley media ponderada a diferencia de la media aritmética aportada por el software. Un análisis a fondo de los estimados permitió confirmar su correspondencia con los datos originales.

Los resultados estimados en GEMCOM, no se muestran por razones de confidencialidad. En cambio, se procedió a una valoración del impacto de los valores huracanados en la estimación (tabla 5.4).

Tabla 5.4- Impacto de los valores huracanados en el modelo de recursos.

Modelo	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	Ley (%)	Cantidad de metal (%)	Ley (%)	Cantidad de metal (%)	Ley (%)	Cantidad de metal (%)
No.2	100	100	90.62	90.63	57.09	57.11
No.3	100	100	87.98	87.24	60.07	59.57

**Los valores de ley y cantidad de metal se expresan en porcentajes relativos al caso base.*

Esta valoración se realizó entre tres variantes:

Variante 1: Caso base que incluye todas las muestras dentro de los modelos geológicos.

Variante 2: Similar al caso anterior, pero limitando la zona de influencia de las muestras huracanadas a una distancia equivalente a bloque y medio en las tres direcciones.

Variante 3: Incluye todas las muestras, pero cortando la distribución en el valor de corte establecido (breakpoint).

Como podemos observar, la variación de los valores de la cantidad de metal y la ley de Au en su conjunto, cuando se acotan los valores hasta 3.12g/t (breakpoint), resulta en una disminución de un 43% en el modelo geológico No.2 y de aproximadamente un 40% en el modelo geológico No.3. La influencia en este caso de solamente 5 muestras de un total de 99 y 27 de los modelos No.2 y 3, respectivamente es considerable, pues ellas son responsables de casi el 40% de la cantidad de metal presente en el depósito.

Por otra parte, cuando se restringe la zona de influencia de los valores huracanados, la variación es menor sin dejar de ser notable, siendo solo de un 10 a un 15%. El problema en esta variante radica en establecer objetivamente la zona de influencia real de los valores extremos, principalmente en el plano del yacimiento.

Las figuras 5.8-5.11 muestran los resultados de la estimación para cada uno de los modelos geológicos en niveles horizontales y perfiles transversales. En las mismas se evidencia una adecuada correspondencia entre las leyes estimadas y los valores iniciales de los contenidos de Au en los pozos de prospección. Otros perfiles del modelo de bloques construido se muestran en los anexos 4 y 5.

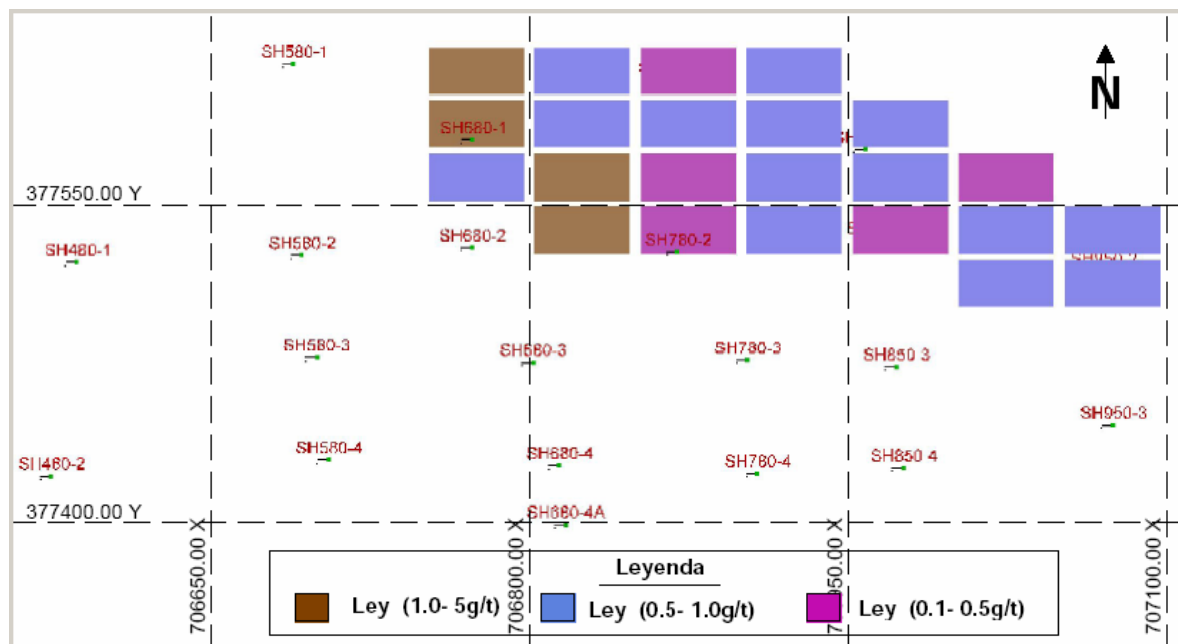


Figura 5.8- Vista en planta del modelo geológico No.2

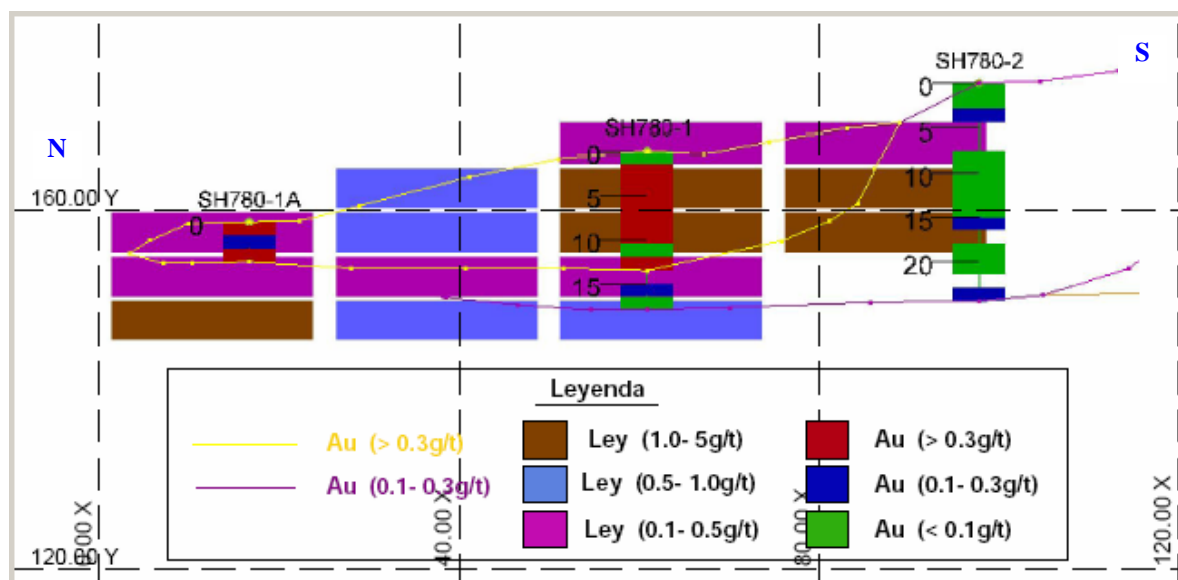


Figura 5.9- Perfil transversal del modelo geológico No.2. Fila 3 del modelo de bloques.

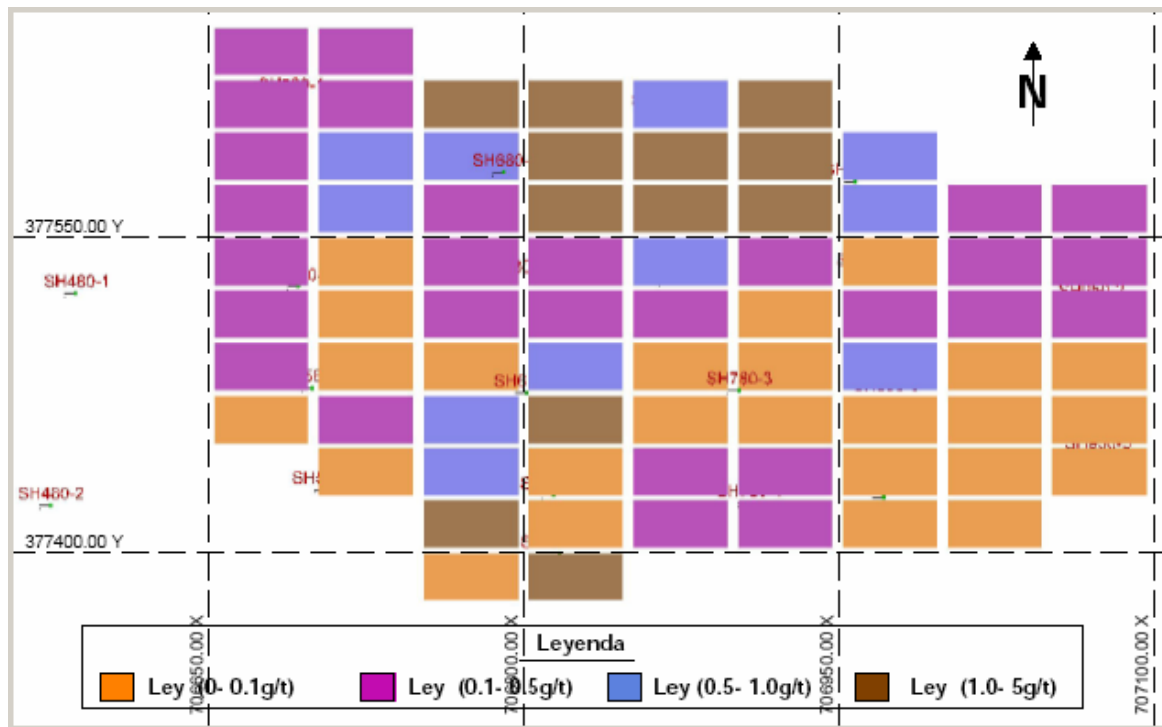


Figura 5.10- Vista en planta del modelo geológico No.3

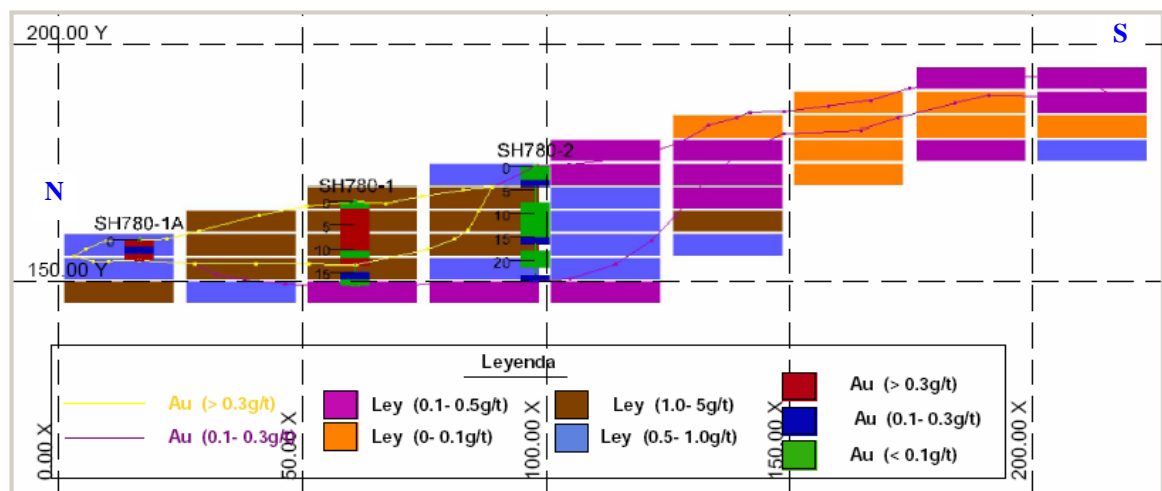


Figura 5.11- Perfil transversal del modelo geológico No.3. Columna 5 del modelo de bloques.

Conclusiones.

- Los contenidos de Au forman distribuciones asimétricas (lognormal) con valores que fluctúan entre 0.1 y 21.92g/t.
- Se evidenció la estrecha relación existente en el depósito entre los tipos naturales de mena y el contenido de Au, donde los valores cercanos al límite de detección (0.1g/t) corresponden a los stockworks limoníticos de las rocas de caja, mientras que las leyes inferiores a 0.2g/t (aún bajos) se reflejan en las arcillas lateríticas de las rocas saprolíticas. Por otra parte, las menas más ricas en Au son las LLP, LLA y LMP, siendo en esta última en la que se reportan los valores huracanados, específicamente en las costras duras, porosas y esqueléticas del sombrero de hierro.
- El análisis estructural realizado no reveló la estructura espacial de la mineralización aurífera en el yacimiento, lo cual es reflejo de la alta variabilidad de la ley de este metal. La continuidad espacial en el plano del yacimiento, si existe, se manifiesta a una escala mayor que la utilizada durante el estudio del sombrero de hierro.
- Los resultados del análisis estructural, unido al número reducido de muestras y al espaciamiento de la red de investigación, limita considerablemente el empleo de los métodos geomatemáticos.
- Se confirmó el impacto que provocan los valores huracanados en los estimados finales de la cantidad de metal. Cinco muestras con leyes extremadamente altas son responsables de cerca del 40 % del Au estimado en el yacimiento. En la literatura se describe un comportamiento similar en otros yacimientos de Au.

Recomendaciones.

- Tener en cuenta los siguientes elementos a la hora de tomar la decisión sobre la conveniencia de pasar el yacimiento a la etapa de exploración:
 1. Número significativo de muestras (casi un 50%) con contenidos de Au en las proximidades del límite de detección, siendo inferior a la ley de las colas obtenidas durante los ensayos tecnológicos.
 2. La discontinuidad de la ley de Au en la vertical.
 3. Poco espesor de la zona oxidada.
 4. La influencia de los valores huracanados.
 5. Posibilidades de incrementar los recursos hacia los extremos de la zona estudiada.
- Caracterizar y estudiar los valores huracanados para precisar de forma objetiva su zona de influencia.

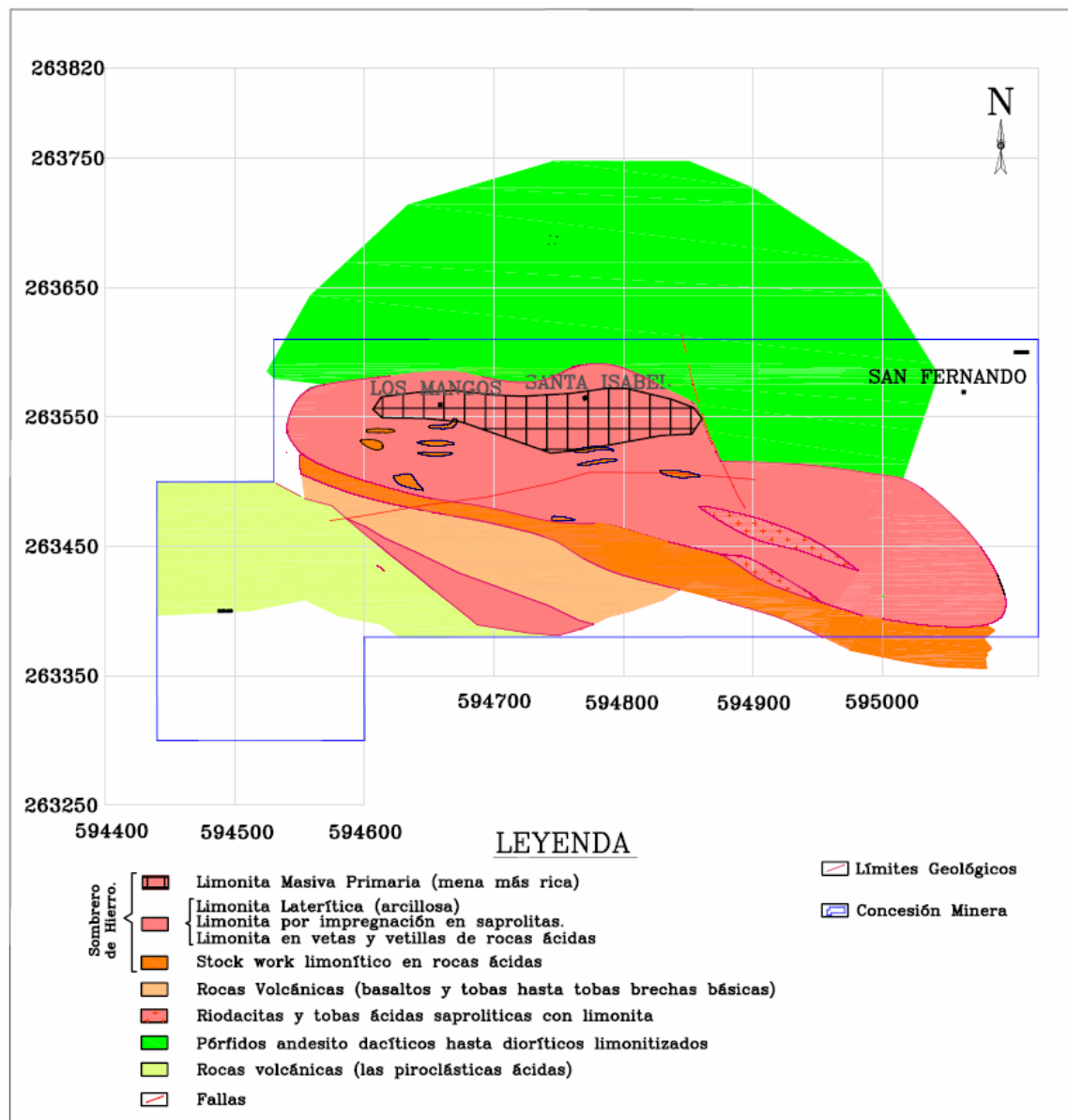
Bibliografía.

1. Arcial, F., Romero, O., 1991. "Prospección Detallada Cobre San Fernando". (Con cálculo de recursos, Julio 1991), Inventario ONRM # 4091.
2. Arcial, F., Romero, O., Oña, R., 1992. "Características geólogo-geofísicas-geoquímicas de la parcela menífera San Fernando. Reporte interno EGMC.Villa Clara", República de Cuba.
3. Cobiella Reguera, Jorge L., 2002. "Apuntes y Guía de Geología de Cuba". Sitio FTP: [ftp://geologia.upr.edu.cu/Disiplinas/Geodinámica/Geología de Cuba](ftp://geologia.upr.edu.cu/Disiplinas/Geodinamica/Geologia%20de%20Cuba).
4. Duke, J.H., Hanna, P.J., 1997. "Geological Interpretation for Resource Estimation". Proceeding of The Resource Database Towards 2000 AusIMM Seminar, May 1997, Wollongong, NSW, Australia.
5. Gallardo E., Rodríguez G., Vázquez C., Romero O. y otros, 2002. "Informe final TTP. Generalización Geológica y Pronóstico Metalogénico de la Formación Los Pasos". Inventario ONRM # 5341.
6. Grubbs, F. E., 1969. "Procedures for detecting outlying observations in samples". Technometrics 11, American Statistical Association, EUA, p 1-21.
7. Guibal, D., 1997. "Variography, A Tool For The Resource Geologist. Proceeding of the Resource Database Towards 2000 AusIMM Seminar", may 1997, Wollongong, NSW, Australia.
8. Houlding, S. W., 1994. "3D Geoscience Modelling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg", Hong Kong, p 309.
9. McKinsty, H. E., 1948. "Mining Geology", Prentice Hall, Inc., New York, 680 p.
10. Parker H.M., 1991. "Statistical Treatment of Outlier Data in Epithermal Gold Deposit Reserve Estimation", Mathematical Geology, Vol. 23, No. 2, Stanford University, California, p 175-184.

11. Sinclair, A. J., 1991. "A Fundamental Approach to Threshold Estimation in Exploration Geochemistry: Probability Plots Revisited". Jour. Expl. Geochem, Vol. 41, p 1-22.
12. Sinclair, A. J., Blackwell, Garston H., 2002. "Applied Mineral Inventory Estimation", Syndicate of the University of Cambridge.
13. Srivastava, M., 2001. "Outlier. A guide for data analysis and interpreters on how to evaluate unexpected high values: Contaminated Sites Statistical Applications Guidance" Document No. 12-8, British Columbia, Canada, p 4, Available at http://www.gov.bc.ca/epd/epdpa/contam_sites/guidance/technical/12.html.
14. Vasiliev, E., 1988, "Informe del Levantamiento Geológico y Búsqueda 1:50 000 Parte Norte Las Villas" II-Jíbaro-Báez.

Anexos.

Anexo 1- Mapa geológico del sombrero de hierro San Fernando.



Anexo 2- Localización de los pozos de prospección.

Pozo	Este (X)	Norte (Y)	Altura (Z)	Profundidad (m)
SH 480-1	706 586 366	377 522 255	141 811	3.00
SH 480-2	706 574 503	377 421 397	142 359	10.50
SH 580-1	706 688 637	377 615 870	148.27	7.50
SH 580-2	706 692 681	377 525 521	151 324	16.50
SH 580-3	706 699 479	377 477 260	144 707	12.00
SH 580-4	706 705 380	377 428 869	154.11	18.00
SH 680-1	706 790 788	377 579 977	154.76	16.00
SH 680-2	706 794 314	377 529 118	166 964	30.00
SH 680-3	706 801 572	377 475 011	170.43	15.00
SH 680-4	706 814 180	377 426 234	173 807	18.00
SH680-4A	706 817 289	377 398 405	169 835	6.00
SH780-1	706 888 752	377 564 057	166 694	18.00
SH780-1A	706 884 550	377 608 370	158 652	4.50
SH780-2	706 893 671	377 527 068	174 192	24.50
SH780-3	706 902 861	377 475 972	185 523	31.50
SH780-4	706 907 600	377 422 513	193 130	31.50
SH850-1	706 958 482	377 575 419	158 807	12.00
SH850-2	706 964 843	377 532 541	164.25	13.00
SH850-3	706 972 961	377 472 790	183 664	26.00
SH850-4	706 976 514	377 425 121	192 221	21.00
SH950-2	707 070 835	377 518 157	179 167	7.50
SH950-3	707 075 342	377 445 398	197 472	11.00

Anexo 3- Tabla con el contenido de Au y el tipo de mena correspondiente a cada pozo de exploración. EST: estéril. LLA: limonita laterítica, LLP: limonita laterítica pobre, LMP: limonita masiva primaria, SAP: Saprofita y NS: no muestreado.

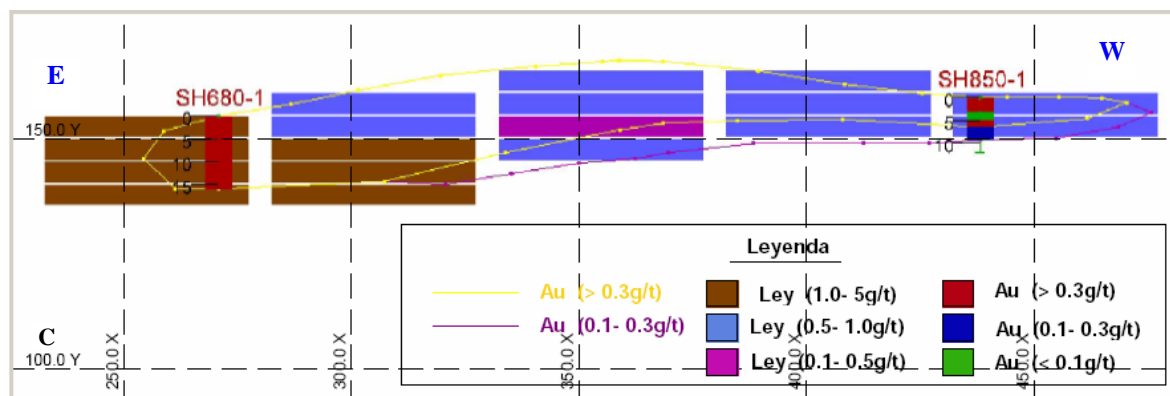
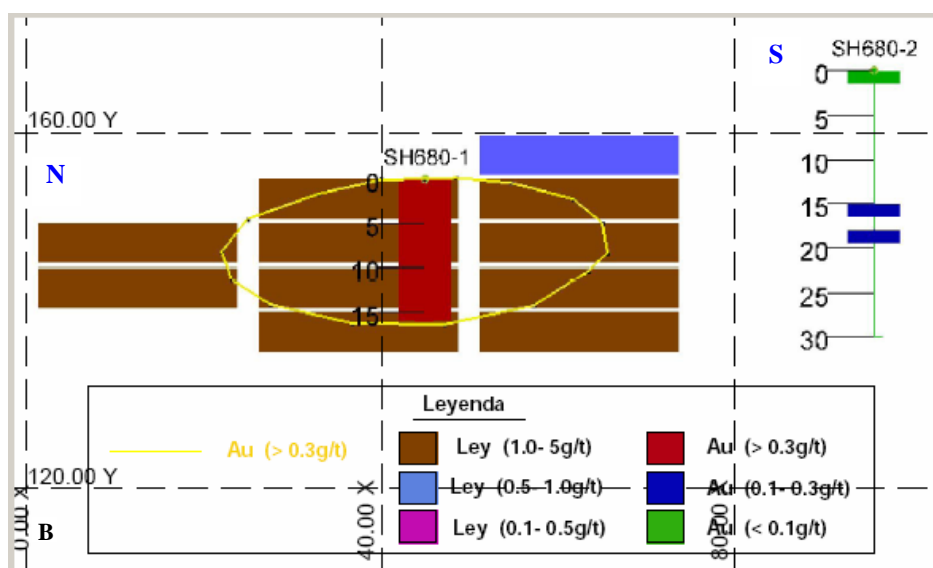
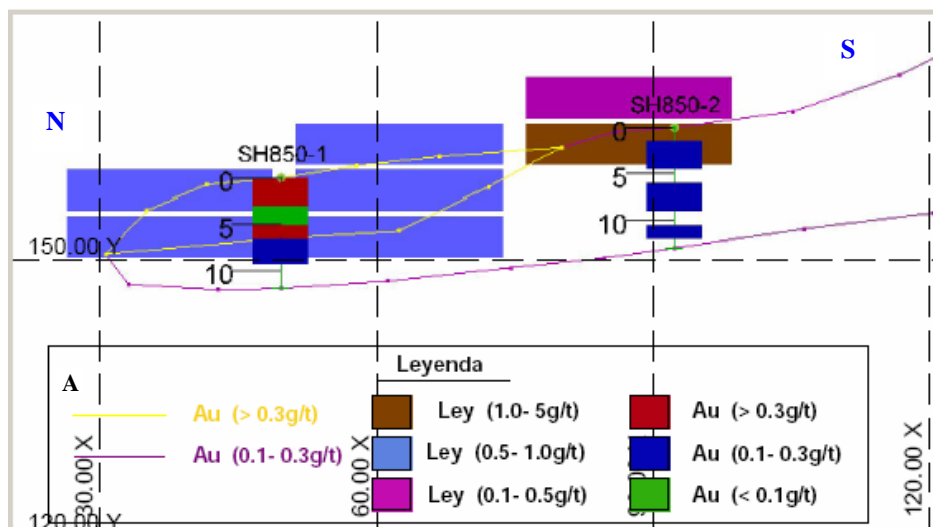
Pozo	Desde	Hasta	Long (m)	Au (g/t)	Tipo de Mena
SH-480-1	0,00	1,50	1,50		EST
	1,50	3,00	1,50		
			3,00		
SH-480-2	0,00	1,37	1,37		EST
	1,37	3,00	1,63		
	3,00	4,50	1,50		
	4,50	6,00	1,50		
	6,00	7,50	1,50		
	7,50	9,00	1,50		
	9,00	10,50	1,50		
			10,50		
SH-580-1	0,00	1,50	1,50	0,10	SAP
	1,50	3,00	1,50	0,14	LLP
			3,00	0,12	
SH-580-2	0,00	1,50	1,50	0,26	LLP
			1,50	0,26	
SH-580-3	0,00	2,30	2,30		NS
	2,30	3,85	1,55		SAP
	3,85	6,00	2,15		EST
	6,00	7,50	1,50		
	7,50	9,00	1,50		
	9,00	10,50	1,50		
	10,50	12,00	1,50		
			12,00		
SH-580-4	2,50	4,50	2,00		EST
	4,50	6,00	1,50		
	6,00	7,50	1,50		
	7,50	9,00	1,50		
	9,00	10,50	1,50		
	10,50	12,00	1,50		
	12,00	13,50	1,50		
	13,50	15,00	1,50		
	15,00	16,50	1,50		
	16,50	18,00	1,50		
			15,50		

Pozo	Desde	Hasta	Long (m)	Au (g/t)	Tipo de Mena
SH-680-1	0,00	1,60	1,60	0,98	LLA
	1,60	3,00	1,40	0,94	
	3,00	4,50	1,50	1,29	LMP
	4,50	6,00	1,50	16,00	
	6,00	7,50	1,50	21,92	
	7,50	9,00	1,50	3,12	
	9,00	10,50	1,50	0,87	LLA
	10,50	12,00	1,50	0,40	
	12,00	13,50	1,50	0,98	
	13,50	15,00	1,50	3,96	LMP
	15,00	16,00	1,00	1,83	
			16,00	4,84	
SH-680-2	0,00	1,50	1,50	0,25	LLP
			1,50	0,25	
SH-680-3	0,00	1,50	1,50	0,32	LLA
			1,50	0,32	
SH-680-4	0,00	1,80	1,80	1,45	LMP
	1,80	3,20	1,40	0,14	SAP
			3,20	0,88	
SH-680-4A	0,00	1,50	1,50	0,10	SAP
			1,50	0,10	
SH-780-1	0,00	1,50	1,50	0,26	LLP
	1,50	3,00	1,50	0,42	
	3,00	4,50	1,50	2,26	LMP
	4,50	6,00	1,50	1,39	
	6,00	7,50	1,50	0,76	LLA
	7,50	9,00	1,50	5,54	LMP
	9,00	10,50	1,50	3,28	
	10,50	12,00	1,50	0,19	SAP
	12,00	13,50	1,50	0,37	LLA
	13,50	15,00	1,50		EST
	15,00	16,50	1,50	0,10	SAP
	16,50	18,00	1,50	0,18	
			18,00	1,23	

Pozo	Desde	Hasta	Long (m)	Au(g/t)	Tipo de Mena
SH-780-1A	0,00	1,50	1,50	0,45	LLA
	1,50	3,00	1,50	0,10	SAP
	3,00	4,50	1,50	0,43	LLA
			4,50	0,33	
SH-780-2	0,00	1,50	1,50	0,21	LLP
	1,50	3,00	1,50	0,21	
	3,00	4,50	1,50		EST
	4,50	6,00	1,50		
	6,00	7,50	1,50	0,30	LLA
	7,50	9,00	1,50	0,19	SAP
	9,00	10,50	1,50	0,21	LLP
	10,50	12,00	1,50	0,19	SAP
	12,00	13,50	1,50	0,27	LLP
	13,50	15,00	1,50	0,19	SAP
	15,00	16,50	1,50		EST
	16,50	18,00	1,50	0,10	SAP
	18,00	19,50	1,50	0,15	
	19,50	21,50	2,00	0,14	
			21,50	0,15	
SH-780-3	0,60	1,80	1,20	0,10	EST
	1,80	3,00	1,20		
	3,00	4,50	1,50	0,17	SAP
			3,90	0,09	
SH-780-4	0,00	1,50	1,50	0,10	LMP
	1,50	3,00	1,50	0,20	LLP
	3,00	4,50	1,50	0,25	
			4,50	0,18	
SH-850-1	0,00	1,50	1,50	0,92	LLA
	1,50	3,00	1,50	0,90	
	3,00	5,00	2,00	0,16	SAP
	5,00	6,50	1,50	1,80	LMP
	6,50	8,00	1,50	0,10	SAP
	8,00	9,30	1,30	0,10	
			9,30	0,65	

Pozo	Desde	Hasta	Long (m)	Au(g/t)	Tipo de Mena
SH-850-2	0,00	1,50	1,50		EST
	1,50	3,00	1,50	0,10	SAP
	3,00	4,50	1,50	0,10	
			4,50	0,07	
SH-850-3	0,00	1,50	1,50	0,10	SAP
	1,50	3,00	1,50	1,07	LMP
	3,00	4,50	1,50	0,10	SAP
	4,50	6,00	1,50	0,10	
	6,00	7,50	1,50	0,10	
	7,50	9,00	1,50	0,12	
	9,00	10,50	1,50	0,12	
	10,50	11,40	0,90		EST
	11,40	13,50	2,10	0,68	LLA
	13,50	15,80	2,30	0,19	SAP
			21,80	0,20	
SH-850-4	4,50	6,00	1,50		EST
	6,00	7,50	1,50		
	7,50	9,00	1,50		
	9,00	10,50			
	10,50	12,00	1,50		
	12,00	13,50	1,50	0,16	SAP
	13,50	15,00	1,50		EST
	15,00	16,50	1,50		
	16,50	17,60	1,10		
	17,60	19,50	1,90	0,10	SAP
	19,50	21,00	1,50		EST
			16,50		
SH-950-2	0,20	1,35	1,15	0,25	SAP
	1,35	3,00	1,65	0,98	
	3,00	4,50	1,50	0,12	
			4,30	0,48	
SH-950-3	1,50	3,00	1,50	0,23	LLP
			1,50	0,23	

Anexo 4.- Perfiles transversales del modelo geológico No.2. **A-** Columna 7. **B-** Columna 3 y **C-** Fila 3 del modelo de bloques.



Anexo 5- Perfiles transversales del modelo geológico No.3. **A-** Fila 3. **B-** Columna 7 y **C-** Columna 9 del modelo de bloques.

