

**UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
“HNOS. SAÍZ MONTES DE OCA”
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS**

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE DOCTOR
EN CIENCIAS TÉCNICAS**

**CRITERIOS GEOQUÍMICOS PARA LA
PROSPECCIÓN DE MINERALIZACIÓN SULFUROSA
EN EL DISTRITO METALOGÉNICO DORA-
FRANCISCO**

Autor: José Francisco Lastra Rivero

**Pinar del Río
1998**

DEDICATORIA

*A mima y papi.
A Yanelis y Susana.
A toda mi familia y amigos.
A mis maestros.
A mi patria.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero dejar constancia, en primer lugar, de mi reconocimiento y gratitud a la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited-Geominera S.A. por darme la posibilidad de ejecutar los trabajos de campo, el procesamiento integral de la información y la edición total de la tesis. En especial, deseo agradecer las deferencias y comprensión que siempre tuvieron el Dr. Sethu Raman, Daniele Spethman, Tom Neelands y Jesús Hernández.

Agradezco igualmente las oportunidades que me brindó la dirección de la Universidad de Pinar del Río y, en lo particular del Departamento de Geología, para desarrollar este trabajo.

En lo personal deseo expresar mi agradecimiento a todos aquellos colegas que compartieron conmigo largas jornadas de trabajo durante estos años, especialmente a los ingenieros Jesús Lara Blanco y Julio A. Blanes Arce y al técnico Agustín Alfonso.

Muy agradecido me siento de los consejos, recomendaciones y ayuda recibidos del doctor Bienvenido Echevarría, quien siempre confió en mí y me apoyó.

En especial, les doy mis más expresivas gracias a los doctores Esther M. Cruz Gámez, René Fernández de Lara y Antonio Rodríguez Vega por las sugerencias, opiniones y críticas formuladas a la versión original de la tesis, que posibilitaron mejorarla con posterioridad.

A mis compañeros de trabajo del Departamento de Geología, de los que siempre recibí su apoyo moral y el impulso para continuar hasta el final a pesar de las dificultades.

Un agradecimiento muy especial a mis padres, por su preocupación constante en aras de mi formación profesional y por el apoyo que me han brindado en los momentos más difíciles.

INDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCION.....	3
CAPITULO I- GEOLOGIA REGIONAL.....	7
1.1- Ubicación geográfica.....	7
1.2- Situación geológica.....	8
1.3- Reseña de las investigaciones anteriores.....	8
1.4- Estructura geológica.....	10
1.5- Depósitos y manifestaciones minerales.....	17
CAPITULO II- CARACTERISTICAS GEOLOGICAS Y RASGOS GEOQUIMICO- MINERALOGICOS DE LAS ESTRUCTURAS METALIFERAS	22
2.1- Estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.....	22
2.2- Estructura metalífera Cándida.....	30
2.3- Estructura metalífera Dora-Amistad.....	36
CAPITULO III- PRONOSTICO GEOQUIMICO DE MINERALIZACION SULFUROSA.....	41
3.1- Modelo Geoquímico Conceptual.....	41
3.2- Elaboración de los Sistemas Expertos para el pronóstico geoquímico.....	44
3.3- Metodología para el pronóstico geoquímico.....	47
3.4- Mapas patrones para el pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa.....	48
3.5- Comprobaciones experimentales de la potencialidad metalífera.....	56
3.6- Recolección, preparación y análisis de las muestras de sedimentos de fondo.....	57
3.6- Valoración integral de los resultados del procesamiento de los datos geoquímicos regionales y proyección de investigaciones prospectivas.....	62
CAPITULO IV- INVESTIGACIONES GEOQUIMICAS EN SECTORES PROSPECTIVOS..	65
4.1- Recolección, preparación y análisis de las muestras.....	65
4.2- Metodología para el procesamiento de los datos geoquímicos.....	68
4.3- Resultados de las investigaciones geoquímicas en suelos. Estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.....	74

4.4- Resultados de las investigaciones litogeoquímicas. Manifestación Oro Cándida.....	87
CAPITULO V- MODELO GEOLOGO-GEOQUIMICO-METALOGENICO.....	96
5.1- Antecedentes.....	96
5.2- Evaluación preliminar de las condiciones físico-químicas de formación de los depósitos y manifestaciones minerales.....	98
5.3- Modelo genético e implicaciones metalogénicas.....	101
5.4- Transformaciones hipergénicas de la mineralización sulfurosa.....	102
CONCLUSIONES.....	105
RECOMENDACIONES.....	111
BIBLIOGRAFIA.....	112

RESUMEN

Esta investigación estuvo encaminada a determinar las regularidades en la distribución espacial, composición química e intensidad de las anomalías geoquímicas, tanto regionales como locales, con vistas a establecer los criterios geoquímicos que garanticen la prospección de mineralización sulfurosa en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco. Dentro de este objetivo fundamental se propone aplicar una metodología novedosa para el procesamiento integral de los datos geoquímicos, haciendo uso de diversos sistemas automatizados, así como la interpretación compleja de las características geológicas de la región, la composición químico-mineralógica, texturas y estructuras de la mineralización sulfurosa asociada a los diferentes depósitos y manifestaciones minerales existentes y las anomalías geoquímicas superficiales, con fines prospectivos y metalogénicos.

En primer lugar fueron establecidas las características geológicas de las diferentes estructuras metalíferas que integran el Distrito Metalogénico Dora-Francisco y los rasgos químico-mineralógicos más significativos de la mineralización sulfurosa descubierta.

Sobre la base del procesamiento de los datos litogeoquímicos en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco a escala regional (1:50 000), con la utilización combinada de sistemas expertos y Análisis de Componentes Principales, fue creado un Patrón Geoquímico para el pronóstico de mineralización sulfurosa en el que se expresan diferentes categorías prospectivas. La comprobación experimental de este procesamiento se realizó a partir del muestreo de sedimentos de fondo ejecutado dentro de los límites de esta región, resultando convincentes las relaciones espaciales y composición de ambos tipos de anomalías geoquímicas. La interpretación conjunta del mapa patrón para el pronóstico de mineralización sulfurosa y el mapa geoquímico complejo de sedimentos de fondo permitió seleccionar diferentes sectores prospectivos para la prospección.

Las investigaciones geoquímicas en la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro (suelos) y manifestación Oro Cándida (rocas) posibilitaron el esclarecimiento de los nexos entre las anomalías geoquímicas locales y los tipos de mineralización a las que están asociadas, lo cual contribuye notablemente a la definición de los criterios geoquímicos de prospección. Estos resultados fueron obtenidos a partir de la aplicación de una metodología novedosa para el procesamiento de la información geoquímica, factible de ser utilizada en la prospección geoquímica de depósitos minerales en otras regiones.

La integración de las características geológicas de la región, los rasgos mineralógicos y geoquímicos de la mineralización sulfurosa, la distribución de las anomalías geoquímicas regionales y las características inherentes a la composición química, distribución espacial e intensidades de las anomalías geoquímicas

locales permitieron ofrecer algunas consideraciones sobre las condiciones de formación de los diferentes tipos de mineralización y las transformaciones hipergénicas ocurridas, confirmando la idea acerca del desarrollo de depósitos de tipo SEDEX y aportando nuevos elementos que permiten realizar una estimación preliminar de la metalogenia de la región. De esta interpretación se sugiere un modelo geólogo-geoquímico-metalogénico en el que se demuestra la unidad de los diferentes procesos que originaron los diferentes depósitos minerales.

INTRODUCCION.

El Distrito Metalogénico Dora-Francisco está ubicado en el extremo suroeste de las Alturas Pizarrosas del Norte, provincia de Pinar del Río, Cuba Occidental.

Durante muchos años esta región ha sido objeto de numerosas investigaciones geológicas debido a sus potencialidades para el desarrollo de diferentes tipos de depósitos minerales asociados a las secuencias de rocas clásticas del Jurásico Medio-Superior. En este sentido se ha prestado una atención especial a la prospección de depósitos minerales sulfurosos y polimetálicos de origen hidrotermal vinculados genéticamente con los procesos endógenos acompañantes al desarrollo de un margen continental pasivo en el que estaba ocurriendo una deposición notable de sedimentos.

El significado económico de estas investigaciones estaba avalado por la posibilidad de existencia de mineralización sulfurosa contenedora de metales básicos (Cu, Pb, Zn), metales raros (In, Cd) y metales nobles (Au, Ag).

En esta región se distinguen diferentes tipos de mineralización sulfurosa que responden a procesos hidrotermales con una génesis común, representativos de un largo y complejo proceso de mineralogénesis:

- Mineralización pirito-cuprífera asociada a zonas de stockwork: pirita, pirrotina, calcopirita, etc.
- Mineralización pirito-cuprífera-arsenopirítica asociada a zonas de stockwork: pirita, calcopirita, arsenopirita, oro, etc.
- Mineralización pirito-polimetálica estratiforme: pirita, pirrotina, galena, esfalerita, minerales de plata, barita, etc.

Además, está demostrado que en las zonas de oxidación y sombreros de hierro existen concentraciones interesantes de oro y plata, lo que justifica su evaluación como objetos con un valor potencial para estos metales preciosos.

La importancia metalogénica de esta región se reafirma por la existencia de varias minas antiguas (Francisco, Cándida, Dora, San Gervacio, etc) de las que fueron extraídas miles de toneladas de mineral de cobre y el descubrimiento del depósito Amistad con mineralización pirito-polimetálica. A ello se unen las expectativas acerca de la asociación de metales preciosos (Au, Ag) a la mineralización sulfurosa y su presencia en las zonas de oxidación y sombreros de hierro.

A partir de 1994 el autor de este trabajo, en estrecha colaboración con la Asociación Económica Holmer

Gold Mines Limited - Geominera S.A., realizó un estudio de los principales rasgos geólogo-geoquímico-mineralógicos del Distrito Metalogénico Dora-Francisco y participó en diferentes actividades orientadas al descubrimiento de zonas mineralizadas mediante la aplicación de métodos geológicos y geoquímicos en un ambiente geotectónico propicio para el desarrollo de mineralización de tipo SEDEX.

Este proyecto de investigación partió de:

Problema: Necesidad de definir los criterios geoquímicos que faciliten el descubrimiento de diferentes tipos de depósitos minerales sulfurosos en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco, sobre la base de la interpretación integral de las características geológicas de la región, los rasgos geoquímico-mineralógicos de la mineralización sulfurosa descubierta y las peculiaridades de las anomalías geoquímicas regionales y locales.

Objetivos:

- Definir los criterios geoquímicos para la prospección de depósitos minerales de tipo SEDEX en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco sobre la base investigaciones geoquímicas en suelos y rocas, a escala regional y local.
- Elaborar un patrón geoquímico para el pronóstico de mineralización sulfurosa sobre la base de la aplicación conjunta de sistemas expertos y análisis estadístico multivariado, que contribuya a la orientación de trabajos de prospección futuros.
- Crear una metodología novedosa y confiable para el procesamiento de la información geoquímica, aplicable también a otras regiones donde se desarrolle la prospección de depósitos minerales sulfurosos.
- Conformar un modelo geólogo-geoquímico-metalogénico que caracterice integralmente a la región y sirva de guía para la prospección de depósitos minerales de tipo SEDEX.

Para cumplimentar estos objetivos resultó necesario:

- 1- Recopilar y analizar la información existente en los archivos de la Empresa Geominera de Pinar del Río y Fondo Geológico Territorial sobre esta región, así como de trabajos realizados en otras regiones del mundo con características geológicas y metalogénicas semejantes.
- 2- Digitalizar la información geológica y topografía del Distrito Metalogénico Dora-Francisco (escala 1:50 000).
- 3- Generalizar la información geólogo-geoquímica precedente con el fin de obtener un mapa patrón para el pronóstico geoquímico a escala 1:50 000.
- 4- Procesar estadística y gráficamente los resultados de análisis químico (Cu, Pb, Zn y Ag) en las zonas mineralizadas primarias resultantes del muestreo en pozos de perforación, socavones, etc, ejecutados

durante trabajos anteriores y actuales.

- 5- Realizar trabajos de prospección en los sectores de mayor interés, incluyendo: mapeo geológico, muestreo litogeoquímico y muestreo de suelos.
- 6- Aplicar técnicas de estadística multivariada al procesamiento de la información geoquímica, dirigidas a: racionalizar los análisis utilizados, caracterizar las principales asociaciones de elementos en su relación con los tipos de mineralización existentes, etc.
- 7- Preparar un conjunto de materiales gráficos (mapas, gráficos, figuras, esquemas, etc.) con el fin de ilustrar los principales rasgos geólogo-geoquímicos que caracterizan la metalogenia de esta región.
- 8- Elaborar un modelo geólogo-geoquímico-metalogénico que facilite la comprensión de los procesos de mineralogénesis ocurridos en el Jurásico dentro de esta región y su relación genética con otros depósitos minerales alojados en la Formación San Cayetano.
- 9- Interpretar y generalizar los resultados para ofrecer una caracterización geólogo-geoquímica de la región de los trabajos de utilidad científico-práctica en la prospección geoquímica de depósitos minerales.

En todo momento se ha pretendido utilizar al máximo las técnicas de computación con su amplia gama de posibilidades, expresándose en este trabajo en:

- Texto: **MICROSOFT WORD** (Versión 7.0).
- Tablas: **MICROSOFT EXCEL** (Versión 7.0).
- Procesamiento estadístico: **STATISTICA FOR WINDOWS** (Versión 4.0).
- Construcción de mapas y gráficos: **SURFER FOR WINDOWS** (Versión 6.04), **ROCKWARE**, **STATISTICA FOR WINDOWS** (Versión 4.0), **AutoCAD** (Versión 14).
- Procesamiento de imágenes: **IDRISI FOR WINDOWS**.

Este trabajo ha proporcionado información suficiente para esclarecer los vínculos entre los diferentes tipos de mineralización y el ambiente geólogo-geoquímico en que se formaron, tomando como referencia las teorías metalogénicas más actuales, la información geológica precedente y actual de la región, el procesamiento de los datos litogeoquímicos a escala regional, los análisis mineralógicos y químicos de la mineralización sulfurosa y los resultados de las investigaciones geoquímicas realizadas en sectores de prospección. También tiene un interés científico-práctico al proponer una metodología para ejecutar tareas similares en otras regiones perspectivas para este tipo de mineralización, procesando de manera integral y automatizada los datos geoquímicos.

CAPITULO I- GEOLOGIA REGIONAL.

1.1- Ubicación geográfica.

Geográficamente el Distrito Metalogénico Dora-Francisco se encuentra situado en el extremo suroeste de las Alturas de Pizarras del Norte, provincia de Pinar del Río, municipio Guane aproximadamente 50 km al oeste de la capital provincial, a 20 km de la Industria Minera Matahambre-Santa Lucía y a 24 km del pueblo de Mantua (Fig. 1.1).

El relieve de la región es ondulado formado por cadenas montañosas de poca altura; en ocasiones y de forma local suelen encontrarse cañadas profundas con pendientes muy abruptas. Las direcciones predominantes de las cadenas montañosas es noroeste-sureste y norte-sur y las elevaciones máximas alcanzan hasta 360 m sobre el nivel del mar, formando todas ellas parte de la cordillera de Guaniguanico.

Al igual que en todo el territorio nacional, el clima de la región es de tipo tropical presentando durante el año dos periodos bien definidos: uno lluvioso (Mayo-Octubre) y uno de seca (Noviembre-Abril).

La humedad relativa oscila entre 77% en el período de seca y 85% en el período lluvioso. La precipitación media anual se estima entre 1200-1400 mm. La temperatura en el mes de Agosto es de 28-30° C y en el mes de Enero es de 20-22°C. En la región son características las precipitaciones en forma de cortos e intensos aguaceros, fundamentalmente en horas de la tarde, lo que facilita el escurrimiento superficial.

La vegetación es rica y abundante, creciendo bosques de pinos; en las zonas bajas y orillas de los arroyos y ríos, se desarrollan distintas variedades de malezas y arbustos.

La red hidrográfica es más o menos densa en dependencia de la estación, es decir, la misma está representada por arroyos y afluentes de poco caudal cuya alimentación depende de las aguas meteóricas; en la época de lluvia presentan un gran drenaje superior y en tiempos de seca disminuyen considerablemente, llegando en muchos casos a interrumpir completamente su corriente.

1.2- Situación geológica.

Desde el punto de vista geológico, esta región forma parte de la zona estructuro-facial Guaniguanico, subzona Sierra de los Organos (Pszczolkowski et al., 1975) (Fig. 1.2). Está integrada por depósitos terrígenos del Jurásico Inferior-Jurásico Superior (pre-Oxfordiano), un complejo terrígeno-carbonatado del Jurásico Superior (Oxfordiano) - Cretácico Inferior, rocas del Paleógeno representadas por un complejo olistostrómico que incluye rocas carbonatadas, clásticas y vulcanógeno-sedimentarias, y

depósitos del Cuaternario.

Los eventos tectónicos del Eoceno han afectado a las secuencias más antiguas provocando la ocurrencia de numerosos sobrecorrimientos en la región, lo cual complica extraordinariamente la estructura geológica.

Los principales depósitos y manifestaciones minerales están alojados en las rocas clásticas del Jurásico Medio-Superior (Formación San Cayetano), representando mineralización de stockwork cuarzo-sulfurosa (cuprífera) y estratiforme (pirito-polimetálica). Simón (1984) considera que estas primeras manifestaciones de procesos metalogénicos tuvieron relación con la evolución del margen continental pasivo creándose las premisas favorables para la intensificación de estos en etapas posteriores.

1.3- Reseña de las investigaciones anteriores.

El Distrito Metalogénico Dora-Francisco ha estado incluido como objetivo de múltiples investigaciones geológicas a escala regional y de detalle, dirigidas a esclarecer aspectos vinculados con la estratigrafía, la estructura geológica y la metalogenia.

El desarrollo histórico de estos trabajos se remonta al descubrimiento del depósito Matahambre y, consiguientemente, el interés de localizar nuevos depósitos minerales dentro del mismo ambiente geológico.

De esta manera, dentro del marco de una geología regional muy compleja, las investigaciones en este campo han permitido el esclarecimiento de los elementos estratigráficos, litológicos, estructurales y metalogénicos, siguiendo dos tendencias fundamentales: la teoría del geosinclinal y la teoría de la Nueva Tectónica Global.

Las investigaciones sobre la geología y metalogenia del Distrito Metalogénico Dora-Francisco han estado insertadas en el panorama de la geología de Cuba Occidental y tienen como características generales la diversidad de grados de detalle y los diferentes puntos de vista respecto al origen de la mineralización.

Durante una primera etapa (1957-1983) la geología regional fue explicada a partir de las ideas acerca del surgimiento y desarrollo del geosinclinal cubano, destacándose en este sentido los trabajos de Hatten et al. (1957), Rigassi-Studer (1963), Knipper y Puig-Rifa (1967), Khudoley y Meyerhoff (1971), Jain (1973), Pszczolkowski et al. (1975), Piotrowska (1977, 1978), Iturralde-Vinent (1982), Burov et al. (1983), Astajov (1981).

Nuevos criterios comenzaron a imponerse desde inicios de la década del 80, incorporándose las ideas vinculadas con las teorías de la Tectónica de Placas y la Nueva Tectónica Global (Simón et al., 1983, 1984, 1987).

La mayoría de estos trabajos geológicos sirvieron de base para el desarrollo de diferentes criterios metalogénicos que le confirieron cierto impulso a la prospección de depósitos minerales en esta región, evaluándose así el grado de perspectividad de mineralización cuprífera y polimetálica en los complejos terrígenos del Jurásico.

En el período de la década del 60, varios especialistas soviéticos (Vologdin et al., 1963; Poplasvki et al., 1966; Novitski, 1963, etc.) realizaron trabajos de búsqueda en diferentes áreas entre los depósitos Francisco y Dora obteniéndose como resultado varias anomalías geoquímicas y geofísicas de interés que posteriormente fueron comprobadas por trabajos de perforación.

A mediados de la década del 80 se realiza un levantamiento geológico regional a escala 1:50 000 en la parte noroeste de la provincia de Pinar del Río (Burov et al., 1985) que incluyó al Distrito Metalogénico Dora-Francisco. Estos trabajos sirvieron de base para la detección de áreas perspectivas para la ejecución de trabajos de prospección.

La prospección de depósitos minerales sulfurosos y polimetálicos en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco a escala 1:10000 se llevó a cabo por un equipo multidisciplinario cubano (geólogos, geoquímicos, geofísicos) con el asesoramiento de especialistas soviéticos, aplicándose un complejo de métodos geólogo-geoquímico-geofísicos que posibilitó el descubrimiento de nuevas manifestaciones minerales y la evaluación parcial de la potencialidad de las minas antiguas o sus flancos (Lara et al., 1989). Como uno de los resultados de su tesis de doctorado, Fernández de Lara (1993) obtuvo un mapa de perspectividad y cálculo de recursos pronósticos del área ocupada por la base topográfica Dimas, basándose para ello en la aplicación de métodos de clasificación matemáticos con datos geoquímicos, geológicos y geofísicos (aeromagnetometría, aeroelectromagnetometría y gravimetría).

1.4- Estructura geológica.

El mapeo geológico de esta región a escala 1:50 000 (Burov et al., 1985) ha permitido evaluar el corte estratigráfico, las particularidades de los movimientos tectónicos del Eoceno y la presencia de algunas manifestaciones de magmatismo jurásico y paleocénico.

1.4.1- Estratigrafía.

Diversidad de columnas estratigráficas han sido propuestas en los últimos años, motivado por el descubrimiento sucesivo de nuevos rasgos litoestratigráficos, bioestratigráficos y tectónicos, que han permitido establecer límites cada vez más precisos acerca de la edad de las diferentes formaciones geológicas y evaluar el carácter de sus contactos. Para este trabajo se ha utilizado la columna estratigráfica propuesta por Burov et al. (1985), la cual están en correspondencia con los resultados más actuales y confiables de mediciones geocronológicas y correlaciones estratigráficas en la sub-zona Sierra de los Organos.

FORMACION SAN CAYETANO (J₁₋₃ sc).

Fue descrita originalmente por De Golyer (1918) confiriéndole la denominación de Cayetano Formation. Dickerson y Butt (1935) la renombraron, comenzando a llamarse a partir de ese momento con la denominación actual.

Esta unidad ha sido mapeada en la zona estructuro-facial Guaniguanico, extendiéndose desde el pueblo de Guane hasta Soroa en la provincia de Pinar del Río.

Haczewski (1976, 1987) demuestra que su origen está asociado a la existencia de un paleodelta jurásico y esta idea es sustentada por otros investigadores, coincidiendo en la deposición de los sedimentos en un mar somero bajo la influencia de un régimen deltaico y la redistribución de los sedimentos por corrientes turbidíticas en el margen continental pasivo mesocenoico de Cuba occidental (Iturralde-Vinent, 1988; Cobiella, 1996a, 1996b).

Las opiniones son divergentes al tratar de explicar la ubicación de la fuente de aporte de los sedimentos, expresándose esto a través de interpretaciones diversas y contradictorias sobre el carácter de esta secuencia terrígena. Khudoley y Meyerhoff (1971) e Iturralde-Vinent (1981) consideran que estas secuencias son el resultado de la erosión del fundamento paleozoico de la plataforma de Bahamas; por otra parte, Haczewski (1976, 1987), basándose en algunas mediciones de paleocorrientes, concluyó que la fuente se encontraba al sur o al sureste del área de sedimentación; en los últimos tiempos se han emitido nuevas ideas que consideran que la fuente de aporte debió ser el fundamento metamórfico del Paleozoico Inferior ubicado entre los escarpes de la Florida y de Campeche, el cual fue reactivado durante el Jurásico Inferior y sometido parcialmente a la erosión hasta el Cretácico Inferior.

La composición litológica de esta formación es muy variada, aunque en todos los perfiles descritos existe un predominio del componente terrígeno observándose en ocasiones alguna transición a depósitos carbonatados (parte superior del corte). Entre las rocas integrantes se encuentran fundamentalmente: areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas, limolitas, lutitas, esquistos arcillosos, pizarras negras y calizas.

Fósiles índices: Ammonites: Perisphinctes (Dichotomosphinctes) sp., Perisphinctes (Discosphinctes) sp.; Pelecípodos: Trigonia (Vaughonia) Krommelbeini, (Neocrassina) sp., Neocrassina (Coelastarte) sp., Inoceramus Inoceramus sp., Eocallista (Hemicorbula) sp., Helechos: Phlebopteris cubensis (Piazopteris branneri).

Su edad es reportada como Jurásico Inferior - Jurásico Superior (Oxfordiano Medio).

Burov et al. (1985) propuso la subdivisión de esta formación en 6 subformaciones de acuerdo con sus particularidades litológicas, aunque en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco sólo han sido distinguidas las que se indican a continuación:

- **Primera Subformación (sc₁).** Está constituida por rocas clásticas representadas fundamentalmente por limolitas esquistosas (60-70%) y areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas de grano fino. Las limolitas aparecen carbonificadas y a veces piritizadas, lo que les confiere un color de gris oscuro-negro; las areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas son de colores claros y se asocian a la mitad inferior del corte. Se aprecia que las rocas están bien estratificadas e intensamente cloritizadas. En la base del corte se observan horizontes de rocas carbonatadas. Es característica la presencia de concreciones ferrosas y cortezas de intemperismo arcillosas de color rojo y gris. En la base del corte se observan horizontes de rocas carbonatadas. Burov (1983) sugiere que estos depósitos corresponden a la parte más baja del corte de la Formación San Cayetano. De acuerdo con sus características litológicas, esta subformación fue dividida en dos paquetes: **paquete inferior (sc₁¹)** y **paquete superior (sc₁²)**
- **Segunda Subformación (sc₂).** Su composición litológica está representada por las mismas rocas que constituyen la primera subformación, pero varía la correlación en el corte. Aquí son predominantes las variedades psamíticas (hasta 60%), correspondiéndole un predominio a las areniscas cuarzosas claras. Se describe una disminución de las limolitas esquistosas carbonosas en la medida que subimos en el corte. Algunas diferencias litológicas motivaron a la división de esta subformación en dos paquetes: **paquete inferior (sc₂¹)** y **paquete superior (sc₂²)**.

- **Tercera Subformación (sc₃).** Está representada por areniscas cuarzosas de grano fino y limolitas que se alternan en el corte. Su característica distintiva está dada por la presencia de capas de limolitas de color violáceo algo esquistosas. Por sus características litológicas esta subformación es dividida en dos paquetes: **paquete inferior (sc¹₃) y paquete superior (sc²₃).**

Como resultado del mapeo geológico ejecutado durante la prospección preliminar de mineralización cuprífera y polimetálica en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco (Lara et al., 1989), se propone la subdivisión de la Formación San Cayetano para esta región en 5 secuencias: sc^a, sc^b, sc^c, sc^d, sc^e. Estas se corresponden estrechamente con las secuencias descritas por Burov et al. (1985) y tienen un sentido eminentemente práctico como auxiliar para los trabajos prospectivos.

Miembro Castellanos (J₃ ct).

Propuesto por Mormil et al. (1980) como el miembro superior de la Formación San Cayetano. Su diferencia esencial respecto al resto de la formación radica en que sus rocas presentan un incremento considerable del componente arcilloso y carbonatado y de su carbonosidad. Está representada litológicamente por lutitas con intercalaciones de calizas. No se desarrolla dentro de los límites del Distrito Metalogénico Dora-Francisco.

FORMACIÓN JAGUA (J₃ jg).

Fue descrita originalmente por Palmer (1945) y redescrita por Myczynsky en: Pszczolkowski et al. (1975).

Su litología está representada por calizas micríticas, esquistos arcillosos margosos y lutitas calcáreas.

Yace concordantemente sobre la Formación San Cayetano y presenta un contacto estratigráfico con los depósitos del grupo Viñales (Formación Guasasa) que la sobreyacen.

Fósiles índices: Foraminíferos: Conicospirillina basiliensis; Bivalvos: Liostrea sp., Neocrasina sp., Griphaea sp., Plicatula sp., Posidonia sp.; Ammonites: Cubaochetoceras sp., Cubaspidoceras sp., Discosphinctes spp., Euaspidoceras spp., Glochiceras sp., Ochetoceras spp., Llamellaptychus sp., Mirosphinctes sp., Perisphinctes spp., Vinalesphinctes spp., Incertae sedis: Globochaete alpina.

Su edad determinada es Jurásico Superior (Oxfordiano Medio-Superior).

Está integrada por cuatro miembros: Pan de Azúcar, Zacarías, Jagua Vieja y Pimienta.

FORMACION GUASASA (J₃-K₁ gs).

Fue descrita originalmente por Herrera (1961). Estas secuencias son equivalentes a las denominadas Quemadito Formation por Palmer (1945). Ha sido redescrita por Housa (1974) y Myczynski (1975).

La composición litológica de esta formación es muy regular, estando representada fundamentalmente por: calizas micríticas, calcarenitas y lentes de pedernales. Las calizas son frecuentemente laminadas y, en ocasiones pueden ser granulares.

Está integrada por cuatro miembros: San Vicente, El Americano, Tumbadero y Tumbitas.

Está cubierta concordantemente por la Formación Pons y discordantemente por la Formación Ancón y alcanza un espesor máximo de 40 m.

FORMACION PONS (K₁-K₂ pn).

Fue descrita originalmente por Hatten (1957) y redescrita por Piotrowska en: Pszczolkowski et al. (1975).

Está compuesta litológicamente por calizas micríticas oscuras, bien estratificadas con lentes y nódulos de pedernal gris-negro.

Fósiles índices: Foraminíferos: Hedbergella delrioensis, Planomalina buxtoni, Praeglobotruncana sp., Rotalipera sp., Ticinella sp.; Nannoplancton: Nannoconus bucheri, N. elongatus, N. truitti, N. wassalli; Incertae sedis: Globochate alpina.

Yace concordantemente sobre el miembro Tumbitas (Formación Guasasa) y está cubierta discordantemente por la Formación Ancón y la unidad informal Caliza Peñas. No sobrepasa los 300 m de espesor.

FORMACIÓN ANCON (P₁ ac).

Fue descrita originalmente por Truitt (1956). Con posterioridad, Herrera (1961) la incluye dentro del Grupo Cabezas, siendo redescrita por Myczynski et al. en: Pszczolkowski et al. (1975).

Se desarrolla limitadamente en forma de fajas estrechas y discontinuas en la Cordillera de Guaniguanico.

Está constituida por: calizas pelitomórficas finamente estratificadas, calizas arcillosas, margas y, ocasionalmente, calcarenitas; en la parte superior del corte aparecen lentes de pedernales.

Fósiles índices: Acarinina brodermanni, Acarinina cf., Acarinina Wilcoxensis, Morozovela cf., Morozovela aequa, Morozovela pseudobulloides, Morozovela velascoensis.

A partir de esta fauna esta secuencia estratigráfica ha podido ser datada de edad Eoceno Inferior.

Yace discordantemente sobre las formaciones Guasasa y Pons. Está cubierta concordantemente por el Miembro Pica Pica (Formación Manacas) y discordantemente por la unidad informal Olistostroma Vieja (Formación Manacas). Su espesor oscila entre 50-70 m.

FORMACIÓN MANACAS (P₁₋₂ mnc).

Fue descrita originalmente por Hatten (1957) y reconocida como Pinos por Herrera (1961) y como Vigoa por Pszczolkowski et al. (1983). Se extiende a lo largo de la Cordillera de Guaniguanico.

En ella se han descrito: areniscas polimícticas, limolitas, lutitas, calcarenitas, pedernales, calizas, depósitos caóticos, policomponentes de matriz limolítica y polimíctica con intercalaciones de areniscas vulcanomícticas y pedernales.

Está subdividida en dos secuencias: Miembro Pica Pica y unidad informal Olistostroma Vieja.

Yace concordantemente sobre la Formación Ancón y el Miembro Pica Pica (Formación Manacas). Su límite superior es erosivo.

1.4.2- Tectónica.

El territorio insular de Cuba fue afectado por varios eventos tectónicos desde el Jurásico (Triásico?) hasta el Eoceno.

En el extremo occidental de Pinar del Río existe un sistema de fallas muy lineales y verticales detectadas durante el levantamiento geológico a escala 1:50 000 (Burov et al., 1985) de rumbo noroeste-sureste que parecen haberse formado en el Jurásico. Una de estas fallas pasa por encima de los depósitos Amistad y Dora, mientras que otra estructura de este tipo atraviesa la región Cándida-Francisco. Estas fueron descubiertas por medio de los métodos magnetométricos (aéreo y pedestre) y gravimétrico, que coinciden con cambios en la estructura de los campos físicos.

El segundo sistema de fallas que afecta el territorio son los sobrecorrimientos o escamas. Estos son más jóvenes (posiblemente eocénicos), dislocando las formaciones sedimentarias de sur a norte, en un desplazamiento sureste-noroeste. Algunas veces estas fallas en sus planos contienen láminas de la Formación Manacas y son de bajo ángulo (hasta 35°). En todos los casos, las fallas son postminerales. También se presenta un sistema de fallas transversal que complica y desplaza los cuerpos minerales, así como dislocaciones plicativas bien marcadas.

1.4.3- Magmatismo.

El magmatismo está desarrollado muy limitadamente y la mayoría de los cuerpos son poco aflorados. Existe referencia de cuerpos magmáticos vinculados a los depósitos Matahambre, Unión y Castellanos, caracterizados como porfiritas dioríticas y brechas de explosión que se intercalan entre los sedimentos clásticos de la Formación San Cayetano (Buguelsky et al. en: Iturralde-Vinent, 1988).

Khudoley y Meyerhoff (1971) indicaron el hallazgo de rocas de origen volcánico en la Formación Guasasa, confiriéndole una edad de Tithoniano. Este hecho representó para Meyerhoff la principal demostración del inicio del desarrollo del eugeosinclinal en el ortogeosinclinal de las Antillas Mayores.

Posteriormente, Piotrowski (1987) señala la existencia de tres o cuatro horizontes de rocas tufíticas ligeramente metamorfizadas de algunos centímetros de espesor. En las calizas de la Formación Jagua se presenta una intercalación de roca volcánica cataclastizada, carbonatizada y cloritizada, la cual debió corresponder antes del proceso metamórfico a una lava básica o media. A estas manifestaciones de magmatismo, dada su posición en el corte estratigráfico le asigna una edad de Oxfordiano Medio. El propio autor refiere la presencia de tobas andesíticas, diabasas, andecitas y dacitas formando parte de la secuencia vulcanógeno-sedimentaria en la parte alta de la Formación Pica Pica (actualmente miembro de la Formación Manacas). Sin embargo, aclara que su posición estratigráfica no es segura y que probablemente se deben tratar de rocas incluidas en el melange.

1.5- Depósitos y manifestaciones minerales.

El Distrito Metalogénico Dora-Francisco ha sido subdividido en tres estructuras metalíferas: **Francisco-Loma Hierro, Cándida y Dora-Amistad.**

La continuidad entre ellas se expresa en forma de una franja alargada en dirección noreste-suroeste, donde se alojan diferentes depósitos y manifestaciones minerales. El grado de estudio de una parte de estos es

variado, expresándose en las etapas de investigación geológica en que se encuentran (prospección, exploración), mientras que otros han sido explotados parcial o totalmente (Fig. 1.3).

Todos ellos están ubicados en las secuencias terrígenas de la Formación San Cayetano (J_{1-3} sc), existiendo un evidente control litológico para los diferentes tipos de mineralización (Lara et al., 1989).

◆ **Estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.**

Dentro de ella están incluidos los depósitos Francisco y Loma Hierro y la manifestación Loma Roja.

Depósito Francisco.

Existe referencia de este depósito desde finales del siglo XIX, siendo su denuncia oficial en 1913. Su explotación se realizó a diferentes intervalos en el período 1918-1965 con dos pozos de minas y seis niveles de explotación. Está constituido por mineralización pirito-calcopirítica en forma de lentes y vetas con cuarzo (stockwork).

Lara et al. (1989) refieren la evaluación de la mineralización por el buzamiento por medio de la perforación de dos pozos (P-21 y P-22) por debajo del nivel VI, interceptando la mineralización en los intervalos 190,65-192,0 m y 62,8-64,0 m, respectivamente, con concentraciones de cobre entre 1,59-1,87%.

Depósito Loma Hierro.

Se conoce desde el mismo año que el depósito Francisco, pero no se hizo su evaluación parcial hasta el año 1958 (Pfeffer, 1958). La exploración y cálculo de las reservas de hierro en forma de limonitas reportó un total de 418 000 t (Jujvit y Fesenko, 1965).

Varios trabajos de prospección involucraron al área que ocupa el depósito Loma Hierro (Vologdin et al., 1963 y Poplavski, 1966).

El área ocupada por este depósito formó parte de la revisión realizada durante los trabajos regionales de levantamiento geológico (Burov et al., 1985).

La aplicación de un complejo de métodos de prospección permitió obtener un campo anómalo geofísico-geoquímico perspectivo para menas pirito-polimetálicas con plata (Lara et al., 1989). Por primera vez se

recomienda la manifestación para su evaluación futura teniendo en cuenta los altos contenidos de plata detectados en la mena primaria cortada por el pozo P-27 (309 g/t en 8,60 m) y los obtenidos en la zona de oxidación.

Los trabajos realizados por la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited-Geominera S.A. en el período 1994-97 han contribuido a evaluar la potencialidad argentífera de las menas oxidadas, otorgándole la categoría de depósito. En la actualidad se concluyó la etapa de exploración de este depósito con resultados positivos.

Manifestación Loma Roja.

Surge como resultado de los trabajos de prospección realizados por Lara et al. (1989). Mediante la aplicación de un complejo de métodos geofísicos y geoquímicos se obtuvieron anomalías contrastantes de Cu, Pb, Zn, Ag y As.

Su evaluación parcial se realizó por el pozo P-29 interceptando una mena piritó-calcopirítica de interés dentro de la secuencia arenosa de la Formación San Cayetano.

Los trabajos de prospección realizados por la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited durante 1984-97 incluyeron la ejecución de mapeo geológico, investigaciones geoquímicas en suelos y perforación de 4 pozos (1 de ellos destinado a cortar la mineralización sulfurosa detectada por el pozo P-29 y los 3 restantes para evaluar la zona de oxidación).

♦ Estructura metalífera Cándida.

En ella se ubican el depósito Cándida y las manifestaciones Oro Cándida, San Gervacio-La Mejor y La Estrella.

Depósito Cándida.

Fue descubierto en el año 1913 y explotado periódicamente hasta 1952 por socavones y galerías de dos niveles. Durante este tiempo fueron extraídas 40 000 t de mineral con un contenido promedio de cobre que oscilaba entre 9.25-10 %. En general, las reservas de mineral calculadas ascendían a 53 900 toneladas.

La mineralización cuprífera en el sector fue estudiada por diferentes especialistas soviéticos (Vologdin et al., 1963; Poplavsky et al., 1966).

Los trabajos realizados por Poplavsky durante los años 1962-1965 en la región del depósito Cándida posibilitaron el descubrimiento de varias anomalías geofísicas de Campo Eléctrico Natural, las que fueron comprobadas posteriormente por 15 pozos de perforación.

Las conclusiones emitidas sobre la base de estos trabajos destacan una zona de mineralización cuprífera, pero se aclara que la situación estructuro-geológica de la mineralización del tipo indicado no está bien definida.

Durante el mapeo geológico regional, Burov et al. (1985) proponen el sector Cándida como prospectivo para mineralización cuprífera.

En el período 1985-89 un grupo de geólogos cubanos con la participación de especialistas soviéticos acometen la prospección preliminar y detallada obteniéndose nuevos sectores o manifestaciones para realizar trabajos futuros (Lara et al., 1989).

Como parte de los trabajos de prospección ejecutados por la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited en los años 1994-97 se realizó mapeo geológico, muestreo litogeoquímico y 2 pozos de perforación. Estos últimos estuvieron dirigidos a evaluar la potencialidad aurífera de la zona de oxidación.

Manifestación Oro Cándida.

Limita al oeste con el depósito Cándida. Fue descrita por Lara et al. (1989), confiriéndole la denominación de Anomalía Hidrotermal. Durante las investigaciones realizadas por la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited-Geominera S.A. (1994-96) adquirió la denominación actual

Está constituida por mineralización pirito-arsenopirítica con oro acompañante y tiene asociada una amplia zona de alteraciones hidrotermales (cuarzificación, cloritización, sericitización) y un desarrollo notable de zonas de oxidación representadas por stockwork cuarzoso con vetillas de limonitas y hematita, rocas hematitizadas y suelos rojizos.

Durante los años 1994-95 se realizaron algunos trabajos de reconocimiento por parte de la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited-Geominera S.A. Con posterioridad, se llevó a cabo el mapeo geológico e investigaciones litogeoquímicas a escala 1:10 000, así como la perforación de 2 pozos con el objetivo de evaluar la potencialidad aurífera de las zonas de oxidación.

Manifestación La Mejor - San Gervacio.

Se ubica al sureste del depósito Cándida. En los años 1962-1965, según trabajos de Poplavsky, fue revelada en los límites de esta manifestación una anomalía de Campo Eléctrico Natural de intensidad hasta -200 mV, comprobada por 8 pozos, 5 de los cuales descubrieron una mineralización sulfurosa intensa.

En el año 1964 en la manifestación fueron excavados un socavón y un pozo de mina, los cuales descubrieron la mineralización sulfurosa rica en cobre.

Manifestación La Estrella.

No se cuenta con información sobre los trabajos realizados con anterioridad. Esta surge de los trabajos de detalle realizados en la estructura Cándida durante el proyecto de prospección de mineralización sulfurosa en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco (Lara et al., 1989), detectándose la presencia de un sistema de socavones y galerías con pozos ciegos interiores.

La mineralización está representada por calcopirita, pirita y cuarzo en forma de vetas y vetillas dentro de un horizonte de areniscas alteradas hidrotermalmente.

◆ Estructura metalífera Dora-Amistad.

Los representantes fundamentales de esta estructura metalífera son los depósitos Dora y Amistad.

Depósito Dora.

El depósito Dora fue descubierto en el año 1914 y ha sido explotado en diferentes etapas hasta profundidades de 70 m por un pozo vertical y tres galerías (40, 55 y 70 m desde la superficie). Su constitución está dada por la existencia de pirita y calcopirita fundamentalmente, siendo explotada su mineralización cuprífera en diferentes períodos comprendidos entre 1915-1963.

En los años 1994-95 se incluye dentro de los trabajos de reconocimiento realizados por la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited-Geominera S.A., consistente en mapeo geológico y muestreo geoquímico.

Depósito Amistad.

Fue descubierto cuando se realizaban los estudios de la ampliación de Dora (Novistki et al., 1963). Nunca

ha sido explotado y se encuentra investigado hasta la etapa de exploración con una red de 25x25 m. Está constituido esencialmente por pirita, esfalerita y galena.

La Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited-Geominera S.A. desarrolla trabajos de reconocimiento en sus inmediaciones durante los años 1994-95. Como resultado de estos se perforan 2 pozos en la zona de oxidación destinados a la evaluación de su potencialidad argentífera.

CAPITULO II- CARACTERISTICAS GEOLOGICAS Y RASGOS GEOQUIMICO-MINERALOGICOS DE LAS ESTRUCTURAS METALIFERAS.

Gustafson y Williams (1981) hacen una revisión integral de las características de los depósitos de cobre, plomo y zinc alojados en sedimentos del mundo, incluyendo el análisis de: estructuras y texturas de las menas, condiciones de formación, ambiente geológico, composición química, zonación químico-mineralógica (vertical y horizontal), edad, temperatura de la mineralización, etc. Para explicar y comparar algunos rasgos químicos de este tipo de depósito utilizan diagramas ternarios de Cu-Zn-Pb, Ag-Cu-(Pb+Zn).

Sobre la base de la recopilación de numerosos datos geológicos, mineralógicos y químicos de las menas sulfurosas localizadas en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco pretendemos describir las características geológicas y rasgos geoquímico-mineralógicos de la mineralización presente en los depósitos y manifestaciones minerales estudiados. Esto, a su vez, ha de servir de fundamento a la proyección, ejecución e interpretación de los resultados de las investigaciones geoquímicas.

2.1- Estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.

La estructura metalífera Francisco-Loma Hierro se sitúa en el extremo septentrional del Distrito Metalogénico Dora-Francisco, limitando al suroeste con la estructura metalífera Cándida (Fig.1.3).

2.1.1- Características geológicas.

Las características geológicas de la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro puede ser explicada a grandes rasgos a partir de los resultados del mapeo geológico superficial y de los pozos perforados en diferentes etapas investigativas (Poplavski, 1966; Burov et al., 1985; Lara et al., 1989) y de los trabajos de prospección y exploración geológicas ejecutados por la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A. en el período 1994-97 (Fig. 2.1).

De esta forma se ha podido definir la existencia de dos secuencias típicas, separadas entre sí por una falla de sobrecorrimiento:

- Una secuencia predominantemente arenosa perteneciente a la parte media y media-superior de la Formación San Cayetano (sc_2^1 , sc^c), caracterizada por horizontes potentes de areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas de granulometría media a gruesa y limolitas, con intercalaciones de secuencias arcillosas (lutitas y pizarras).
- Una secuencia arcillosa situada al sur correspondiente a la parte superior de la Formación San Cayetano (sc_1^2 , sc^d) constituida por lutitas y pizarras negras, además de aparecer limolitas y areniscas de grano fino

con abundante material arcilloso en la matriz aglutinante. Está caracterizada por una amplia variación facial tanto en la vertical como en la horizontal. Las relaciones granulométricas en las rocas son paulatinas, existiendo gradación entre ellas. Las rocas presentan una variada gama de colores provocados por los procesos exógenos que las han afectado; sin embargo, las lutitas y limolitas de color negro y marrón conservan su color original, pudiendo llegar a constituir horizontes guías o indicadores del ambiente de sedimentación, posiblemente un medio de deposición semicerrado con carácter parcialmente reductor.

Todos los elementos apuntan a que en la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro ocurrieron 4 eventos tectónicos disyuntivos de edad eocénica bastante bien diferenciados en tiempo y espacio, los cuales han dejado su huella de forma visible en el terreno.

Como primer evento tectónico ocurrió la fracturación de las rocas en dirección paralela y subparalela a su rumbo y el sobrecorrimento de placas o escamas de rocas y zonas mineralizadas sobre otras a través de estos planos de ruptura. Este evento es conocido como escamamiento o sobrecorrimento y, como regla general, los esfuerzos y el movimiento se produjeron en dirección sureste-noroeste y los planos de sobrecorrimento buzaban hacia el noroeste con ángulos entre 45-60°. En la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro este evento está representado por dos fallas de sobrecorrimento grandes. Estas zonas de falla dividen el área en tres escamas tectónicas fundamentales:

- La primera, aparentemente estéril, delimita la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro por el noroeste.
- En la segunda se ubican el depósito Francisco y la manifestación Loma Roja.
- La tercera encaja al depósito Loma Hierro.

En sentido general, este sistema de fallas tiene gran implicación para poder explicar la posición actual de estas manifestaciones y, de hecho, para dirigir la prospección de depósitos minerales.

Se pueden observar también tres sistemas de fallas cortantes de las estructuras que las desplazan en forma de bloques. El primero de ellos se extiende en dirección norte-sur y buza hacia el oeste con ángulos entre 60-70°, fracturando los cuerpos minerales y las estructuras perpendiculares a su rumbo; le sigue otro que se extiende en dirección este-oeste y buza hacia el norte con ángulos entre 70-80°, cortando las estructuras y los cuerpos minerales con un ángulo agudo según su rumbo; el último se extiende en dirección suroeste-noreste y buza hacia el noroeste con ángulos entre 30-50°, siendo subparalelo al rumbo y al buzamiento general de la estructura.

2.1.2- Mineragrafía y composición química de la mineralización sulfurosa.

Depósito Francisco.

La zona mineral se localiza en la parte inferior de la secuencia arenosa sc_2^1 (sc^c) de la Formación San Cayetano, cerca del contacto con los esquistos arcillosos infrayacentes representativos de la secuencia sc_2^2 (sc^c). Estructuralmente este depósito se encuentra en los límites de un bloque tectónico, donde las rocas yacen monoclinamente con buzamiento hacia el noroeste (Fig. 2.2).

Los cuerpos minerales aparecen en forma de vetas cuarzo-sulfurosas, extendiéndose por el rumbo y el buzamiento unos 200 m con una potencia promedio de 2.8 m. En todas sus partes está constituido por pirita, calcopirita, galena y esfalerita, los cuales se distribuyen regularmente. A veces se pueden observar menas masivas de calcopirita con una potencia de 0.01-0.5 m; la galena y la esfalerita se presentan en forma de venillas, lentes y nidos aislados en la parte del contacto del cuerpo mineral con la roca de caja.

- **Estudios mineragráficos.**

a) Composición mineralógica.

Según las investigaciones realizadas por Vologdin et al. (1963) se reconoce la composición mineralógica siguiente:

- **Minerales principales:** pirita y calcopirita.
- **Minerales subordinados:** esfalerita, galena.
- **Minerales raros:** bornita
- **Minerales accesorios relícticos:** titanatos.
- **Minerales no metálicos:** cuarzo.

El estudio de las relaciones mineralógicas en secciones pulidas le permiten diferenciar dos etapas de mineralogénesis:

- **Etapla pirítica:** Cuarzo, Pirita I.
- **Etapla pirito-calcopirítica:** Cuarzo, Pirita II, Calcopirita, Esfalerita, Galena

- **Composición química.**

Las concentraciones de Cu en este depósito son de 3.3%, con variaciones entre 2-4.5%.

Las perforaciones realizadas por Lara et al. (1989) para cortar los cuerpos minerales de este depósito según su prolongación en profundidad, demuestran concentraciones variables de Cu, Pb y Zn (Tabla 2.2), resultando únicamente significativos los resultados de Zn (1.03%) y Pb (0.72%) obtenidos en el pozo de perforación P-21 con relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ de 0.75 para el intervalo de 148.20-154.70 m. Moderadamente bajos son los resultados de Cu (0.93%) revelados en el pozo de perforación P-22 dentro del intervalo 62.50-64.00.

Manifestación cuprífera Loma Roja.

Se ubica 700 m al noroeste del depósito Francisco y su localización coincide con la secuencia arenosa sc_2^1 (sc^c) de la Formación San Cayetano. Coincide con los límites de un monoclinal que se inclina al noroeste con ángulos entre 25-30° y se extiende hacia el oeste, constituyendo así una estructura que incluye también al depósito Francisco.

Está situada en una zona que se caracteriza por presentar un relieve abrupto con una elevación central de 325 m de altura sobre el nivel del mar, la cual se extiende en dirección suroeste-noreste. La ladera que yace hacia el noroeste es suave y va decreciendo en esta dirección; por el contrario, la que yace hacia el sureste es muy abrupta y forma grandes escarpes que en ocasiones tienen hasta 20 m de altura (Fig. 2.2).

Ha sido posible mapear la existencia de 3 zonas de stockwork principales:

Zona 1- Asociada a la trinchera TR-21 y al pozo de perforación P-29.

Zona 2- Asociada a la plataforma de los pozos P-23, P-192 y P-24 y a la trinchera TR-30.

Zona 3- Se extiende paralela a las 2 primeras coincidiendo casi con la cima de la elevación principal.

En la plataforma del pozo P-23 se pudo medir con bastante claridad la yacencia de la zona 2, la cual buza hacia el este-sureste con ángulos de 75-80°.

- **Composición química.**

A partir del análisis minerográfico realizado en varias secciones pulidas del pozo de perforación P-29, se pudieron determinar algunas características relativas a la composición mineralógica, textura y estructura de este tipo de mineralización.

a) Composición mineralógica.

- **Minerales principales:** pirita (2-12%) y calcopirita (5-15%).
- **Minerales subordinados:** esfalerita (hasta 1%), galena (hasta 1%), marcasita (hasta 1%), pirrotina (hasta 1%), bornita (hasta 1%), arsenopirita.
- **Minerales raros:** cobaltina.
- **Minerales accesorios relicticos:** titanatos.
- **Minerales no metálicos:** cuarzo, grafito.

b) Texturas.

La pirita se encuentra en agregados aglomeráticos y vetillas en el no metálico; también forma cristales finos diseminados y granos irregulares en la calcopirita y esfalerita y a veces formando ribetes alrededor de la calcopirita (textura de sustitución).

La calcopirita aparece fundamentalmente en segregaciones xenomórficas en el no metálico, constituyendo acumulaciones en forma de mancha y a veces cadenas con textura alotriomórfica granular. Contiene segregaciones de esfalerita, raramente galena, pirrotina y cristales de pirita, formando texturas de emulsión y poiquilitica. También existe en emulsiones finas en la esfalerita que en ocasiones están orientadas según la dirección del clivaje de ésta. La esfalerita se presenta formando emulsiones con la pirita y calcopirita y a veces con la pirrotina.

c) Estructuras.

- Vetítica.
- Vetítico-diseminada.

En la deposición mineral existen 2 etapas claramente definidas:

- **Etapla pirítica:** Cuarzo, pirita I, marcasita y titanatos.
- **Etapla pirito-calcopirítica:** Cuarzo, pirita II, calcopirita, esfalerita, galena, cobres grises.

• Composición química.

La composición química de estas menas está representada por las concentraciones de Cu, Pb, Zn y Ag en el intervalo 54.00-68.80 m del pozo de perforación P-29 (Tabla 2.1). La imposibilidad de utilizar una información más amplia tiene relación con la no existencia de otras perforaciones con resultados

significativos hasta el momento.

Del análisis de estos resultados se destaca la existencia de concentraciones altas de Cu (3.56%), moderadas de Ag (44.74 g/t) y bajas de Zn (0.83%) y Pb (<0.1%). Las relaciones Zn/(Zn+Pb) varían entre 0.76-0.95, con una media de 0.88, aunque estos valores están afectados por las concentraciones extremadamente bajas de Pb (inferiores a 0.1%) que no pueden ser detectadas por el método de Absorción Atómica. El diagrama ternario Cu-Pb-Zn (Fig. 2.3) la relación cuantitativa entre estos metales, ocupando un campo que resulta propio de este tipo de depósito y que es representativo de un proceso mineralizante particular dentro del Distrito Metalogénico Dora-Francisco.

Esta idea se reafirma al analizar el diagrama ternario Ag-Cu-(Pb+Zn) (Fig. 2.3), en el que el conjunto de muestras se circunscribe a una región específica del gráfico con ligeras variaciones en sus proporciones; por supuesto, dadas las concentraciones de plomo inferiores a 0.1%, su influencia no es determinante en esta interpretación. Ambos diagramas son muy específicos para la manifestación Loma Roja, no existiendo semejanzas con otros patrones establecidos a nivel mundial (Gustafson y Williams, 1981).

Depósito argentífero Loma Hierro.

Su emplazamiento geológico se corresponde con la secuencia sc_1^2 (sc^d).

Su posición actual coincide con una elevación central de 370 m de altura sobre el nivel del mar, la cual se extiende en dirección suroeste-noreste. En el extremo noroeste se presenta un escarpe con pendientes muy abruptas alcanzando hasta 40 m de altura (Fig. 2.4).

El carácter estratiforme, composición química y composición mineralógica de las menas sulfurosas permiten considerar que hay correspondencia con las características descritas por Large (1981) para los depósitos de sulfuros de plomo-zinc alojados en sedimentos, con varios ejemplos en el mundo: Rammelsberg, Meggen, Silvermines, Tynagh, Mount Isa, Mc Arthur River, Broken Hill y Sullivan. Sin embargo, en este caso la mineralización sulfurosa se encuentra poco extendida representando apenas el 5% de la totalidad del depósito, siendo interceptada únicamente por los pozos de perforación P-27 (Lara et al., 1989) y LH-96-177 (Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A., 1996); el resto del depósito se encuentra completamente oxidado.

La acción conjunta de la tectónica y de los agentes hipergénicos ha conllevado a la fracturación, meteorización intensa y erosión diferenciada de este depósito. El resultado final de estos procesos se presenta en forma de 8 cuerpos minerales oxidados: L-1, L-2, L-3, L-4, L-5, L-6, L-7 y L-8, testigos elocuentes de las transformaciones ocurridas desde su formación en el Jurásico hasta la actualidad.

- **Estudios mineragráficos.**

El estudio mineragráfico realizado en secciones pulidas del pozo de perforación P-27 (Hernández y Krapiva, 1988), permitió una descripción detallada de la composición mineralógica, textura y estructura de este tipo de mineralización, la cual se resume a continuación:

a) Composición mineralógica.

- **Minerales principales:** pirita (30-35%), esfalerita (15-20%) y galena.
- **Minerales subordinados:** marcasita (1-2%), pirrotina (1-2%), calcopirita (1-2%) e ilmenita (hasta 1%).
- **Minerales raros:** plata nativa, acantita, estefanita, polibasita, rickardita y mackinawita.
- **Minerales accesorios relícticos:** granos de esfena sustituidos por leucoxeno.
- **Minerales no metálicos:** cuarzo, barita, estilpnomelana, micas, grafito.

b) Texturas.

La pirita suele aparecer con textura metacoloidal, colomórfica y, a veces, porfidoblástica. También existe en entrecrecimiento con esfalerita, marcasita y galena formando textura subgráfica. Otra forma de presentarse es como metacristales dentro de los minerales no metálicos o incluidos en la esfalerita.

La esfalerita se desarrolla generalmente como segregaciones con emulsiones finas de pirrotina y con metacristales de pirita. En muchas ocasiones se encuentra asociada a la galena cementando cristales de pirita.

La galena se presenta cementando cristales y rellenando grietas en la pirita o en forma de inclusiones dentro de esta.

c) Estructuras.

- Bandeada.
- Moteada diseminada.
- Vetítico-diseminada.

De acuerdo con las particularidades texturo-estructurales y las relaciones mineralógicas, Hernández et al. (1988) establecen que la deposición mineral ocurrió en tres etapas con asociaciones paragenéticas de minerales y elementos características para cada una de ellas:

Etapa pirítica: Pirita I, marcasita y materia orgánica.

Etapa argentífero-polimetálica: Pirita II, esfalerita, calcopirita, pirrotina, galena, plata nativa y rickardita.

Etapa argentífera: Acanita y sulfosales de plata.

- **Composición química.**

La composición química de estas menas se expresa a partir de las concentraciones de Ag, Cu, Pb, y Zn en el intervalo 24.60-35.10 m del pozo de perforación LH-96-177 (Tabla 2.3). Un análisis más amplio de este aspecto resulta imposible debido a que los cuerpos minerales que integran este depósito mineral están completamente oxidados y en ellos no se expresan las concentraciones originales de la mineralización.

Del análisis de estos resultados se destaca la existencia de concentraciones significativas de Ag (451.58 g/t) y algo moderadas de Zn (3.94%) y Pb (2.02%) en el intervalo de 24.60-32.20 m, mientras que el Cu está prácticamente ausente como elemento menífero. Un dato interesante lo constituyen las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ que varían entre 0.53-0.72, con una media de 0.66.

Large (1978) refiere el estudio de 38 depósitos de plomo-zinc alojados en sedimentos y sólo en 6 de ellos las leyes de plata superan los 100 g/t, reportando el valor más alto de 180 g/t para el depósito Hilton, Australia. Además, reporta leyes ponderadas de Cu (0.07%), Pb (3.98%) y Zn (7.98%) y relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ para estos 6 depósitos entre 0.46-0.68.

Las concentraciones de Ag (451.58 g/t) reportadas en el pozo LH-96-177 son excepcionales para los depósitos estratiformes de plomo-zinc alojados en sedimentos comparado con otros del mundo y Cuba. Sin embargo, las concentraciones de Cu (0.01%), Pb (2.02%) y Zn (3.94%) son inferiores a la media mundial y sólo comparables en Cuba con el depósito Santa Lucía. La relación $Zn/(Zn+Pb)$ de 0.66 lo convierte en un depósito formado en condiciones redox semejantes a las correspondientes a los 6 depósitos indicados (Large, 1978), pero algo diferentes al ambiente en que se formaron los depósitos Amistad y Santa Lucía, Cuba Occidental (Tabla 2.9).

Un análisis del diagrama ternario Cu-Pb-Zn (Fig. 2.5) para las muestras del pozo LH-96-177 permite asegurar que existen depósitos en el mundo que se asemejan a Loma Hierro por las relaciones cuantitativas de estos metales, tales como el Silvermines, Irlanda y el Lady Loretta, Australia (Gustafson y Williams, 1981). Sin embargo, resulta muy diferente a cualquier otro depósito del mundo según el diagrama ternario Ag-Cu-(Pb+Zn) (Fig. 2.5), ocupando una posición muy específica próxima al vértice de la plata.

2.2- Estructura metalífera Cándida.

Su emplazamiento geográfico corresponde con la parte central del Distrito Metalogénico Dora-Francisco, limitando hacia el noreste con la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro y al suroeste con la estructura metalífera Dora-Amistad (Fig. 2.6).

2.2.1- Características geológicas.

Litológicamente la estructura metalífera Cándida está emplazada en la secuencia arenosa sc_2^1 (sc^c) de la Formación San Cayetano representadas por: areniscas cuarzosas, limolitas, lutitas, pizarras y filitas; ocasionalmente se han mapeado brechas pero estas se encuentran asociadas a fenómenos tectónicos, con un predominio del componente psamítico.

Las areniscas cuarzosas y cuarzo-feldespáticas presentan granulometría fina-media y son de color gris, naranja, verde y violáceas. Las limolitas y lutitas presentan estructura laminar y se observan transiciones gradacionales entre estas.

El sector de trabajo presenta un amplio desarrollo de estructuras tectónicas que son el reflejo de los esfuerzos a que han sido sometidas las secuencias rocosas.

Las estructuras plegadas se manifiestan desde flexiones simples hasta formas complejas con pliegues pequeños de orden inferior. La dirección predominante de los ejes de estas estructuras es noreste-suroeste y en menor proporción con dirección norte-sur (Plataforma Pozo P-15). Pliegues acostados con vergencia noroeste fueron mapeados en las cercanías del socavón N° 2 en una secuencia de areniscas cuarzosas cloritizadas.

Las grietas son muy abundantes fundamentalmente de extensión y de cizalla, las primeras están rellenas por cuarzo y tienen espesores variables y con frecuencia aparecen de forma combinada en áreas cercanas a zonas de dislocaciones tectónicas disyuntivas. En las mediciones del agrietamiento, a pesar de no existir un procesamiento estadístico, se observa una dirección predominante noroeste-sureste, coincidiendo con la dirección de las zonas de stockwork y de alteración hidrotermal mapeadas.

Las dislocaciones en el área poseen como peculiaridad la existencia de un sistema de fallas radial con dirección noreste-suroeste asociados a la manifestación Oro Cándida, y norte-sur y noroeste-sureste en la medida que nos desplazamos hacia el depósito Cándida. Este sistema de fallas desplaza

perpendicularmente por el rumbo a otro que tiene forma semicircular o pseudoconcéntrica y que corta el área con dirección este-oeste.

La generación cronológica del sistema de fracturas resulta difícil de establecer, los rasgos tectónicos indican superposición de fenómenos tectónicos en zonas anteriormente dislocadas o formación sincrónica de varios sistemas de fallas a partir de un mismo evento tectónico.

Dentro de la estructura metalífera Cándida se destaca la existencia de varias zonas mineralizadas representadas por: zonas de oxidación y zonas de stockwork cuarzo-sulfurosas.

2.2.2- Minerografía y composición química de la mineralización sulfurosa.

Depósito Cándida.

Este depósito está asociado a la secuencia arenosa sc_2^1 (sc^c) de la Formación San Cayetano. Sus cuerpos minerales se presentan en forma vetas cuarzo-sulfurosas alojadas en zonas de stockwork lineales (discordantes) y de sulfuros masivos estratiformes (concordantes).

En superficie se revelan zonas de oxidación donde se observa un amplio desarrollo de las alteraciones hidrotermales (cuarzificación, sericitización, cloritización) y alteraciones hipergénicas (limonitización, caolinitización, hematitización).

Mediciones realizadas indican que el rumbo principal de las zonas de stockwork es noroeste-sureste y asociado a este un sistema secundario con rumbo noreste-suroeste y otro concordante con la estratificación de las rocas.

- **Estudios mineragráficos.**

a) Composición mineralógica.

Minerales principales: Pirita, calcopirita, esfalerita, arsenopirita.

Minerales subordinados: Galena.

Minerales raros: Pirrotina, marcasita, oro, plata.

Minerales de alteración: Cobaltina, covelina, bornita, hidróxidos de hierro.

b) Texturas.

La pirita se encuentra en forma de agregados y segregaciones xenomórficas, en algunos casos cataclastizadas. A veces contiene segregaciones de esfalerita y galena. Se presenta en segregaciones anulares y microcristales en agregados más finos, en forma de emulsiones en la esfalerita y formando cristales en la calcopirita. Puede encontrarse con textura metacoloidal colomorfa y algunos glóbulos framboidales.

La calcopirita se desarrolla en forma de vetillas dentro de la pirita y cementándola; también en segregaciones xenomórficas en el no metálico. Aparece formando emulsiones en la esfalerita, formando texturas poiquilíticas y de emulsión. Se presenta en segregaciones anulares y microcristales en agregados más finos. Puede presentar textura metacoloidal, colomorfa y glóbulos framboidales.

La esfalerita aparece en entrecrecimiento con la pirita y la galena (textura subgráfica), contiene emulsiones de calcopirita.

La galena se encuentra sustituyendo a la esfalerita, en entrecrecimiento con la pirita y en forma de granos irregulares.

La pirrotina, arsenopirita y marcasita están asociadas a la pirita.

c) Estructuras.

- Masiva.
- Vetítica.
- Brechosa.
- Moteada diseminada.

Se han podido distinguir, de forma general, tres etapas de deposición de minerales:

- **Etapla pirítica:** Pirita I, pirrotina, marcasita.
- **Etapla pirito-calcopirítica:** Pirita II, calcopirita, arsenopirita.
- **Etapla polimetálica:** Esfalerita, galena, calcopirita.

• Composición química.

Existe una información muy limitada acerca de la composición química de la mineralización que se

desarrolla en este depósito. Los resultados de análisis químicos en muestras de pozos de perforación (Tabla 2.4) resultan insuficientes para realizar una generalización de este parámetro. Debe señalarse que las concentraciones de los metales base son bajas por lo general, exceptuando el pozo P-158 (16.20% Cu, 1.51% Zn); además, existen algunos contenidos moderados de Ag en los pozos P-14 y P-159. Un rasgo interesante lo constituye el hecho de que las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ sean por lo general inferiores a 0.70, lo cual resulta semejante a lo descrito en el depósito Loma Hierro a partir de la información proveniente del pozo LH-96-177.

Manifestación Oro Cándida.

Se encuentra 500 m al noreste del depósito Cándida, ubicándose en la parte inferior de la secuencia arenosa sc_2^1 (sc^c) de la Formación San Cayetano. Estructuralmente estas rocas forman un monoclinal con buzamiento hacia el suroeste y ángulos de 10-35°.

Las zonas de stockwork se caracterizan por una red de vetillas entrecruzadas en todas direcciones de cuarzo-limonita en condiciones hipergénicas y cuarzo-pirita-arsenopirita±calcopirita en areniscas no intemperizadas, además de una alteración muy intensa de la roca de caja que se manifiesta de forma zonal, observándose un incremento de la intensidad en la medida que nos acercamos a las grietas. Las alteraciones hidrotermales más comunes son la cuarcificación, cloritización y sericitización.

En ocasiones se observa la distribución fractal en las zonas de stockwork, destacándose dentro de la red de vetillas principal otras con iguales características morfológicas pero a una escala mucho más reducida, alcanzando las estructuras dimensiones de 1-1.5 cm y simulando una estructura de escamas de pescado (plataformas de los pozos P-191 y P-15).

Existe un amplio desarrollo de zonas de oxidación, como expresión natural de las alteraciones hipergénicas a que ha estado sometida la mineralización sulfurosa primaria. En estas se observan vetillas entrecruzadas de cuarzo y de mineralización oxidada.

- **Estudios mineragráficos.**

El estudio mineragráfico realizado en secciones pulidas de afloramientos y pozos de perforación de la manifestación Oro Cándida posibilitaron realizar un análisis somero de la composición mineralógica, textura y estructura de este tipo de mineralización en la región de estudio.

a) Composición mineralógica.

- **Minerales principales:** Pirita, arsenopirita, calcopirita, esfalerita, pirrotina, galena y, a veces, marcasita.
- **Minerales raros:** Titanatos y oro nativo.
- **Minerales de alteración:** Covelina, cobaltina, hidróxidos de hierro y bornita.

b) Texturas.

La pirita se encuentra en forma de agregados aislados en el no metálico; también como cristales definidos con textura hipidiomórfica con tendencia a idiomórfica y porfidoblástica. Además, en agregados xenomórficos y metacristales con textura cataclástica y a veces esquelética.

La arsenopirita aparece en agregados xenomórficos muy cataclastizados, en ocasiones contiene pequeñas inclusiones de pirrotina (textura poiquilítica). En muchos casos la covelina se encuentra rellenando sus grietas; también en forma de cristales aislados en el no metálico. En ocasiones contiene granos de oro.

La calcopirita existe en agregados irregulares con textura alotriomórfica, que contienen inclusiones de esfalerita. También puede observarse en emulsiones en la esfalerita, en entrecrecimiento con la galena, rellenando grietas en la pirita y bordeándola.

La esfalerita se desarrolla generalmente en segregaciones con inclusiones de calcopirita y en forma de emulsiones dentro de esta.

La pirrotina, galena y marcasita están asociadas generalmente a la calcopirita y arsenopirita.

c) Estructuras.

- Moteada.
- Moteada diseminada.
- Masiva.

• Composición química.

La información existente sobre la composición química de la mineralización sulfurosa es muy limitada, por lo que no se pueden hacer generalizaciones al respecto. Sin embargo, existen concentraciones bajas de Ag y significativas de Au en el pozo P-191, asociadas a la mineralización oxidada, lo cual es un reflejo de la potencialidad aurífera de la mineralización sulfurosa primaria.

2.3- Estructura metalífera Dora-Amistad.

Está ubicada geográficamente en el extremo meridional del Distrito Metalogénico Dora-Francisco, limitando al noreste con la estructura metalífera Cándida.

2.3.1- Características geológicas.

Constituye un área donde se desarrollan las secuencias arcillosa sc_1^2 (sc^d) y arenosa sc_2^1 (sc^c) de la Formación San Cayetano, delimitadas por fallas de carácter regional y en menor proporción por fallas de segundo orden.

El área de mejor aflorabilidad de la secuencia arcillosa sc_1^2 (sc^d), constituida por pizarras negras carbonosas, limolitas y lutitas, se mapea en el extremo noroeste de esta estructura metalífera, localizándose en ésta el depósito Amistad.

La secuencia arenosa sc_2^1 (sc^c), está representada por areniscas cuarzosas de grano fino a medio con intercalaciones de limolitas de forma muy subordinada. Esta constituye un área donde se manifiestan intensas alteraciones hidrotermales con vetas y vetillas de cuarzos y sulfuros, muy excepcionales en las proximidades del depósito Dora.

Novitski (1963) llama la atención acerca de las analogías de los depósitos Dora y Amistad dentro de la estructura geológica que los aloja, aunque con diferencias en cuanto a la proporción y estructura de la mineralización.

2.3.2- Mineragrafía y composición química de la mineralización sulfurosa.

Depósito Amistad.

El depósito Amistad se localiza en el contacto de las secuencia arenosa sc_2^1 (sc^c) y la secuencia arcillosa sc_1^2 (sc^d), de la Formación San Cayetano ocupando una posición superior en el corte estratigráfico. Novitski (1963) considera que la presencia de esquistos carbono-arcillosos constituye un criterio litológico para la localización de mineralización de zinc-plomo estratiforme.

- **Estudio mineragráfico.**

Sólo se dispuso de 2 secciones pulidas, lo cual resulta insuficiente para ofrecer conclusiones definitivas

que permitan generalizarlas para todo el depósito. Sin embargo, Novitski (1963) ofrece datos suficientes sobre la composición mineralógica y química de este tipo de mineralización.

a) Composición mineralógica.

- **Minerales principales:** pirita, esfalerita, calcopirita, pirrotina.
- **Minerales subordinados:** galena, plata nativa.
- **Minerales de alteración:** covelina.
- **Minerales accesorios:** titanatos.

b) Texturas.

La pirita se presenta fundamentalmente en forma de metacristales, los cuales están ocasionalmente cataclastizados. Aparece también como glóbulos framboidales y fibrosa. Existen cristales y granos aislados en el no metálico con emulsiones de esfalerita.

La calcopirita se desarrolla como segregaciones xenomórficas; en ocasiones rellena grietas en la pirita y la cementa. Se encuentra en entrecrecimiento con la pirrotina y contiene algunos granos de pirita y emulsiones de esfalerita en forma de estrellas.

La esfalerita se observa en la calcopirita y pirita; a su vez contiene segregaciones de éstas y las bordea.

La marcasita y pirrotina están asociadas a la pirita y calcopirita.

c) Estructuras.

- Densamente diseminada. Constituida por esfalerita, pirita, calcopirita y galena.
- Vetítico-diseminada. Contenedora de esfalerita (en menor proporción que la anterior), galena, calcopirita y pirita.

• Composición química.

Según los trabajos de exploración del depósito Amistad (Novitski, 1963) son descritos 4 cuerpos minerales con características distintivas en relación con las concentraciones de Cu, Zn, Pb y Ag (Tabla 2.6).

- **Cuerpo mineral principal.** Se localiza en el contacto de pizarras negras carbono-arcillosas y areniscas

grises agrietadas. Está representado por mineralización pirito-polimetálica muy diseminada y diseminada en forma de venillas. Sus dimensiones son: 120 m por el rumbo, 90 m por el buzamiento y potencia promedio de 2.75 m. La evaluación de las reservas permitió determinar los contenidos siguientes: Cu (0.57%), Pb (1.89%), Zn (8.77%), S (8.59%) y Ag (29 g/t).

- **Segundo cuerpo mineral.** Está asociado a las pizarras negras carbono-arcillosas. Se caracteriza por la presencia de mineralización pirito-polimetálica diseminada en forma de venillas. Presenta dimensiones muy limitadas con un espesor promedio de 1.06 m. Han sido reportados los contenidos siguientes: Cu (2.72%), Pb (0.51%), Zn (3.05%), S (9.03%) y Ag (29 g/t).

- **Tercer cuerpo mineral.** Se ubica en las cercanías del contacto de una intercalación de pizarras y areniscas. La mineralización pirito-polimetálica aparece diseminada en forma de venillas. Su extensión por el rumbo es de 120 m y el espesor promedio de 0.59 m. La composición química queda caracterizada por los contenidos siguientes: Cu (0.42%), Pb (1.10%), Zn (6.06%) y S (5.60%).

- **Cuarto cuerpo mineral.** Se localiza en el contacto de una intercalación de pizarras negras carbono-arcillosas y areniscas de grano fino. Se caracteriza por la existencia de un sistema de venillas constituido por mineralización pirito-calcopirítico-polimetálica, ubicada 65 m por debajo del cuerpo mineral principal (¿zona de stockwork?). Su composición química queda reflejada por los contenidos siguientes: Cu (2.76%), Pb (0.69%), Zn (8.13%), Ag (133.3 g/t).

Los resultados de los pozos de perforación, de la exploración de los cuerpos minerales y del muestreo de la Galería N°1 (Novitski, 1963) (Tablas 2.5, 2.6 y 2.7) permiten distinguir un predominio notable del Zn sobre los restantes metales básicos y concentraciones de Ag acordes con las reportadas a nivel mundial para este tipo de depósito (Tabla 2.9).

Los diagramas ternarios de Cu-Pb-Zn y Ag-Cu-(Pb+Zn) (Figs. 2.7, 2.8, 2.9) son representativos para este tipo de depósito en el mundo, asemejándolo a los depósitos Meggen, Alemania y Howar Pass, Canadá (Gustafson y Williams, 1981).

Depósito Dora.

El depósito Dora se localiza exclusivamente en la secuencia arenosa sc_2^1 (sc^c) de la Formación San Cayetano, coincidente con las zonas de fallas que delimitan la dislocación tectónica principal (Novitski, 1963).

Este depósito está constituido por vetas cuarzo-sulfurosas (calcopirita, pirita) y en las zonas minerales se

destaca el carácter brechoso de la mineralización. Aunque la mineralización cuprífera se encuentra alojada en areniscas, las vetas cuarzo-sulfurosas atraviesan los estratos de estas rocas.

También destaca la existencia de un sombrero de hierro donde existen restos de cristales semioxidados de galena y un contenido elevado de plomo, zinc y plata, lo cual no es característico para este tipo de depósito. Además, esta zona yace inmediatamente debajo de la secuencia arcillosa, en el contacto de esta última con la secuencia arenosa encajante de la mineralización del depósito Dora. Estos elementos constituyen una prueba de la relación genética que existe entre la mineralización cuprífera y la mineralización de plomo-zinc.

- **Estudios mineragráficos.**

Su estudio mineragráfico resultó muy limitado al disponer solamente de 2 secciones pulidas procedentes de pozos de perforación.

a) Composición mineralógica.

Minerales principales: pirita, calcopirita, pirrotina.

Minerales accesorios: titanatos.

b) Texturas.

La pirita se desarrolla en forma de agregados xenomórficos, pequeños cristales o granos irregulares diseminados en el no metálico. Aparecen además glóbulos framboidales diseminados.

La calcopirita existe en forma de segregaciones xenomórficas y pequeños cristales diseminados; a veces se localiza en la periferia y grietas de la pirita.

La pirrotina se observa como raros granos en el no metálico y también asociada a la pirita.

c) Estructuras.

- Masiva
- Vetítico-diseminada.

- **Composición química.**

La composición química puede ser valorada a partir de la información procedente de los trabajos de Novitski (1963) referido a los pozos de perforación (Tabla 2.8), con un predominio de las concentraciones de Cu (4.02%) y Zn (0.55%).

El diagrama ternario de Cu-Pb-Zn (Fig. 2.10) muestra relaciones entre estos metales semejantes a la manifestación Loma Roja pero con una tendencia a ser más cuprífero.

En general, al comparar los diagramas Cu-Pb-Zn y Ag-Cu-(Pb+Zn) para los principales depósitos y manifestaciones minerales de la región (Fig. 2.11) se comprueban las semejanzas en las proporciones de Cu-Pb-Zn del depósito Dora y de la manifestación Loma Roja, aunque con diferencias significativas en la concentraciones relativas de plata, favorables a este último; mayores diferencias se presentan entre los depósitos Loma Hierro y Amistad, sobre todo si se comparan las concentraciones relativas de plata.

CAPITULO III- PRONOSTICO GEOQUIMICO DE MINERALIZACION SULFUROSA.

Para realizar una evaluación integral de las características geoquímicas del Distrito Metalogénico Dora-Francisco se hizo necesario recopilar, procesar y reinterpretar la información geoquímica derivada de trabajos regionales, auxiliándonos para ello de medios automatizados que incluyen sistemas expertos, sistemas estadísticos y sistemas de información geográfica. Esta información incluyó:

- Resultados de análisis espectral para las muestras litogeoquímicas recolectadas durante el levantamiento geológico a escala 1:50 000 para la hoja topográfica Dimas (Burov et al., 1985).
- Resultados del análisis espectrométrico de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) para muestras de sedimentos de fondo en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco, resultantes de investigaciones experimentales de Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A. (Vázquez et al., 1998).

En general, se pretende realizar un pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa a escala regional a partir del estudio de la distribución espacial de las anomalías geoquímicas en relación con los tipos de mineralización que representan, confirmar la validez de la metodología propuesta para el procesamiento de los datos geólogo-geoquímicos regionales y, sobre esta base, proyectar trabajos de detalle en sectores categorizados como prospectivos.

3.1- Modelo Geoquímico Conceptual.

En principio, toda investigación dirigida a la prospección geoquímica de depósitos minerales debe estar sustentada en una base teórica que exprese los conceptos, regularidades y leyes vinculados a la distribución de los elementos indicadores de la mineralización en las anomalías geoquímicas.

Esta base teórica ha sido definida como **Modelo Geoquímico Conceptual**, con un significado tal que permita valorar la influencia de varios parámetros geoquímicos en el pronóstico de la mineralización sulfurosa de origen hidrotermal (SEDEX) alojada en rocas sedimentarias clásticas.

Aunque realmente los elementos que pueden brindar información sobre este tipo de depósitos es muy amplia, la disponibilidad solamente de resultados de análisis espectral de Cu, Mo, Co, Pb, Zn, Ba y Ag en las rocas de la región determina que nos ciñamos a estos al desarrollar este tópico.

Por consiguiente, el **Modelo Geoquímico Conceptual** que hemos concebido queda estructurado de la manera siguiente:

a. Composición química. La mineralización sulfurosa está relacionada con anomalías geoquímicas de Cu, Mo, Co, Pb, Zn, Ag y Ba, estableciéndose algunas distinciones entre la mineralización cuprífera y la mineralización polimetálica en cuanto a la manifestación de anomalías geoquímicas de uno u otro elemento. De acuerdo con esto se debe establecer una clasificación de los elementos para cada tipo de mineralización en: elementos principales y elementos acompañantes.

	Mineralización cuprífera	Mineralización polimetálica
Elementos principales	Cu (calcopirita)	Pb (galena) Zn (esfalerita) Ba (barita)
Elementos acompañantes	Mo (molibdenita) Co (cobaltina) (impureza isomórfica)	Ag (impureza isomórfica) (acantita, rickardita, estefanita)

Las anomalías de Cu, Co y Mo están vinculadas a depósitos minerales formados en los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes, lo cual permite asociarlas a las zonas de stockwork cuarzo-sulfurosas. Por otra parte, las anomalías de Pb, Zn, Ba y Ag son características de los depósitos minerales estratiformes resultantes de la exhalación de las soluciones mineralizantes en el fondo del mar y la deposición mineral en el fondo de una cuenca de sedimentación.

b. Intensidad. La definición de los niveles anómalos para cada elemento indicador de la mineralización es premisa fundamental para la interpretación del significado cuantitativo de las anomalías geoquímicas.

c. Asociaciones paragenéticas de elementos. La coincidencia espacial de dos o más anomalías geoquímicas resulta un indicio favorable que complementa la información resultante de la intensidad de cada anomalía geoquímica monoelemental. Este parámetro contribuye, por tanto, a la evaluación más efectiva de la perspectiva metalífera de una región en base a la conjunción de anomalías geoquímicas de varios elementos que presentan un vínculo genético bien definido. En el caso específico del Distrito Metalogénico Dora-Francisco, las asociaciones paragenéticas fundamentales por cada tipo de mineralización son:

Mineralización	Asociación paragenética
Cuprífera	Cu-Mo-Co
Polimetálica	Pb-Zn-Ag-Ba

d. Distribución espacial. La extensión areal, continuidad y estructura de las zonas anómalas contribuyen a resaltar la potencialidad de la zona estudiada, aspecto este a tener muy en cuenta durante la interpretación. Esto da lugar a valorar la posible zonalidad geoquímica de las aureolas de dispersión primarias y su relación espacial con los objetos que le dieron origen; la posición que ocupan estos elementos dentro de la serie de zonalidad característica para depósitos hidrotermales indica el siguiente orden de deposición:

Mo-Cu-Co-Pb-Ag-Zn-Ba

Esto se encuentra en plena correspondencia con los modelos metalogénicos actuales (Simón, 1983) que relacionan la formación de los depósitos minerales del Jurásico en Cuba Occidental con la creación de células convectivas en un reservorio de rocas sedimentarias y la precipitación de los componentes de esta solución hidrotermal como resultado de los cambios físico-químicos que experimenta esta en su evolución.

3.2- Elaboración de los Sistemas Expertos para el pronóstico geoquímico.

Varios intentos se han hecho en diferentes regiones metalogénicas de Cuba Occidental para establecer patrones que ayuden a comprender los factores que controlan la mineralización y así poder estimar la perspectiva metalífera, haciendo uso de métodos cuantitativos de pronóstico. Pardo (1989) y Pardo y Díaz (1989) hacen uso de estas técnicas combinando datos geológicos, geofísicos y geoquímicos en el macizo metamórfico de la Isla de la Juventud, utilizando los métodos de reconocimiento de patrones, de atipicidad, y de entropía. Fernández de Lara (1993) propone un sistema inteligente (RELIS) para la generación de sistemas expertos con el fin de realizar el pronóstico automatizado de diferentes tipos de mineralización utilizando una base de conocimientos preconcebida por un equipo especializado (geólogos, geofísicos, geoquímicos); su aplicación inmediata se realizó precisamente en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco.

Para crear los patrones geoquímicos para mineralización cuprífera y polimetálica en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco hemos preferido la utilización de sistemas expertos generados por **RELIS** por su efectividad demostrada y las posibilidades actuales que brinda en su combinación con otros sistemas automatizados (IDRISI FOR WINDOWS y SURFER FOR WINDOWS) y la aplicación de análisis de componentes principales a partir del procesamiento de imágenes.

3.2.1- Presupuestos para los Sistemas de Conocimientos.

Sobre la base del Modelo Geoquímico Conceptual y de la información geoquímica disponible fueron definidas varias series de presupuestos que sirven de fundamento a la generación de los sistemas de conocimientos referentes a cada tipo de mineralización.

Mineralización cuprífera.

- I. La certidumbre de existencia de este tipo de mineralización está asociada a la intensidad de las anomalías geoquímicas de Cu y Mo, según sus umbrales de contenidos anómalos.
- II. Las anomalías de Co no son indicadoras de este tipo de mineralización, pero pueden ser consideradas cuando están acompañadas de anomalías de Cu y Mo, según sus umbrales de contenidos anómalos.
- III. A igualdad en las intensidades de diferentes anomalías geoquímicas monoelementales, la certidumbre de existencia de este tipo de mineralización es superior si el atributo geoquímico involucrado es el elemento principal (Cu).
- IV. La aparición de anomalías de Pb, Zn, Ag y Ba puede constituir un indicio adicional de existencia de este tipo de mineralización, pero le confiere una certidumbre inferior.
- V. El grado de complejidad de la anomalía geoquímica le confiere una mayor certidumbre para la existencia de este tipo de mineralización asociada a ella.

Mineralización polimetálica.

- I. La certidumbre de existencia de este tipo de mineralización está asociada a la intensidad de las anomalías geoquímicas de Pb, Zn, Ag y Ba, según sus umbrales de contenidos anómalos.
- II. A igualdad en las intensidades de diferentes anomalías geoquímicas monoelementales, la certidumbre de existencia de este tipo de mineralización es superior si el atributo geoquímico involucrado es un elemento principal.
- III. La aparición de anomalías de Cu y Mo puede constituir un indicio adicional de existencia de este tipo de mineralización, pero con una certidumbre inferior.
- IV. El grado de complejidad de la anomalía geoquímica le confiere una mayor certidumbre para la existencia de este tipo de mineralización asociada a ella.

3.2.2- Creación de Sistemas Expertos.

Las características de la información a procesar y el objetivo de lograr un patrón para el pronóstico geoquímico de estos tipos de mineralización para el Distrito Metalogénico Dora-Francisco y con posibilidades reales de ser extendido a otras regiones de Cuba Occidental con fines prospectivos, determinan la selección de un sistema experto que permita clasificar la región atendiendo al grado de

certidumbre para la existencia de un tipo de mineralización u otra.

El Sistema **RELIS** (Fernández de Lara, 1993) se ajusta a estos objetivos, permitiendo la creación de **Sistemas Expertos** que facilitan la elaboración conjunta de diferentes atributos geoquímicos para cada UIB (Unidad de Información Básica). Cada patrón de pronóstico geoquímico debe basarse en una **Base de Conocimientos** derivada de los presupuestos indicados con anterioridad y que permite transmitir el conocimiento del especialista en forma de un conjunto de reglas de producción.

Estas reglas de producción poseen la estructura siguiente:

$$A \Rightarrow S(W_1, W_2)$$

donde:

A (Antecedente) Contiene las condiciones correspondientes a una situación dada y utiliza operadores lógicos para conectar una o varias proposiciones.

S (Sucedente): Contiene la conclusión en caso de que las condiciones dadas en el antecedente se cumplan.

W_1 : Grado de certidumbre si la condición dada en el antecedente se cumple con absoluta seguridad.

W_2 : Grado de certidumbre si la condición dada en el antecedente se incumple con absoluta seguridad.

Los valores de W_1 y W_2 para el sistema RELIS varían entre -100 y 100.

Cada atributo geoquímico debe tener asignada una categoría indicativa de la intensidad de las anomalías geoquímicas que ellos representan:

Símbolo	Categoría	Significado
X00	1	Fondo geoquímico ($<Ca_1$)
X11	2	Nivel anómalo débil (Ca_1 - Ca_2)
X22	3	Nivel anómalo medio (Ca_2 - Ca_3)
X33	4	Nivel anómalo intenso ($>Ca_3$)

Las reglas de producción elaboradas son de dos tipos, de acuerdo con el carácter de sus implicaciones:

- Las implicaciones están relacionadas con la existencia o no de asociaciones entre anomalías geoquímicas de dos o más elementos. Esto determina la utilización de operadores lógicos y conectivos para lograr los vínculos o asociaciones previstas: (-) negación, (&) conjunción..

Ejemplos:

a) Mineralización cuprífera.

-Cu00 & Pb00 - Zn00 & Ag00 & Ba00 - Mo00 & Co00

$W_1 = 35$ $W_2 = 0$

Significado: La presencia de valores anómalos de Cu, Zn y Mo confiere una certidumbre de 35% para la localización de mineralización cuprífera.

b) Mineralización polimetálica.

Cu00 - Pb00 - Zn00 - Ag00 & Ba00 & Mo00 & Co00

$W_1 = 45$ $W_2 = 0$

Significado: La presencia de valores anómalos de Pb, Zn y Ag confiere una certidumbre de 45% para la localización de mineralización polimetálica.

- Las implicaciones sólo sirven para medir la contribución de la intensidad de las anomalías geoquímicas.

Ejemplos:

c) Mineralización cuprífera.

Cu22

$W_1 = 20$ $W_2 = 0$

Significado: La presencia de concentraciones de Cu correspondientes al nivel anómalo medio confiere una certidumbre de 20% para la localización de mineralización cuprífera.

d) Mineralización polimetálica.

Pb33

$$W_1 = 35$$

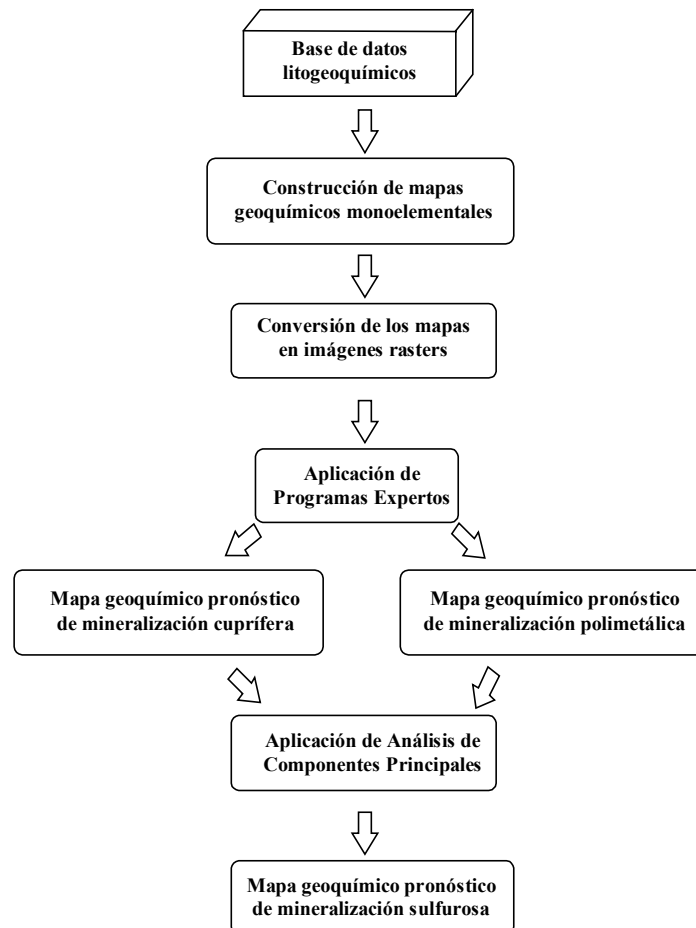
$$W_2 = 0$$

Significado: La presencia de concentraciones de Pb correspondientes al nivel anómalo intenso confiere una certidumbre de 35% para la localización de mineralización polimetálica.

El Sistema RELIS permite editar las **Bases de Conocimientos**, las que son utilizadas activamente por este sistema inteligente para obtener los **Sistemas Expertos** correspondientes. El conjunto de reglas de producción que integran estas **Bases de Conocimientos** constituyen la experiencia simplificada del autor de este trabajo, en relación con el pronóstico geoquímico de mineralización cuprífera y polimetálica.

3.3- Metodología para el pronóstico geoquímico.

Para lograr la mayor efectividad en el procesamiento de los datos litogeoquímicos con vistas al pronóstico prospectivo de mineralización sulfurosa sugerimos una metodología cuyo fundamento científico-teórico se expuso en los epígrafes anteriores. Los pasos a dar aparecen resumidos en el cuadro sinóptico que se muestra a continuación:



La aplicación de esta metodología al pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa se expresa seguidamente, como parte de las investigaciones realizadas en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco.

3.4- Mapas patrones para el pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa.

El objetivo principal de este procedimiento se resume en la elaboración de un patrón geoquímico regional que posibilite orientar los trabajos de prospección en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco, atendiendo a la composición química, distribución espacial, intensidades y asociaciones paragenéticas de las principales anomalías litogeoquímicas.

El área de esta investigación está enmarcada dentro de los límites indicados por las coordenadas Lambert (sistema Cuba Norte) siguientes:

	X	Y
I	178 000	285 000

II	191 100	285 000
III	191 100	299 000
IV	178 000	299 000

El primer paso consistió en determinar la distribución espacial del muestreo a partir de la construcción del mapa de ubicación de las muestras litogeoquímicas (Fig. 3.1).

◆ **Base de datos.**

La base de datos geoquímicos incluye los resultados de análisis espectral semicuantitativo de 959 muestras litogeoquímicas para los elementos indicadores de la mineralización cuprífera (Cu, Co, Mo) y polimetálica (Pb, Zn, Ba, Ag) en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco y sus flancos (Burov et al., 1985).

Esta información está archivada en un fichero texto (formato ASCII) con estructura secuencial. que sirve de sostén al procesamiento automatizado,

◆ **Construcción de los mapas geoquímicos monoelementales.**

Un requisito indispensable para la construcción de los mapas geoquímicos monoelementales lo constituye la determinación del fondo geoquímico y los umbrales de contenidos anómalos para los principales elementos indicadores de la mineralización.

En aquellos casos en que la información geoquímica se derive del análisis espectral semicuantitativo es recomendable utilizar el método gráfico (papel probabilístico) para la determinación de estos parámetros geoquímicos, lo cual permite augurar resultados acordes al grado de exactitud y precisión de este método analítico.

Tabla 3.1- Fondo geoquímico y umbrales de contenidos anómalos para los principales elementos indicadores de la mineralización (en rocas).

Elemento	Cf (ppm)	Ca₁ (ppm)	Ca₂ (ppm)	Ca₃ (ppm)
Cu	25	80	260	1000
Co	4	15	50	150
Mo	1.5	4	20	100
Pb	20	80	300	1000
Zn	20	100	350	1000
Ba	250	600	2000	6000

Ag	0.15	0.6	3	15
----	------	-----	---	----

A continuación es utilizado el sistema automatizado SURFER FOR WINDOWS (versión 6.04) para la representación gráfica de las anomalías litogeoquímicas mediante mapas de contornos.

Ello conduce primeramente a la preparación de los ficheros **.grd** para cada elemento, quedando definidos así el total de UIB que serán procesadas y el método de interpolación a utilizar.

En nuestro caso el total de UIB a considerar en el procesamiento fue de 3021, con dimensiones de 250X250 m cada una. El método de interpolación seleccionado es el Krigging con un radio de búsqueda circular de 750 m, lo cual permite considerar un entorno espacial adecuado para la escala de estos patrones (1:50 000) en correspondencia con la densidad del muestreo (5-6 muestras por kilómetro cuadrado).

El contorneo de las anomalías geoquímicas para cada elemento se realiza en base a los umbrales de contenidos anómalos definidos con anterioridad, obteniéndose como resultado los mapas geoquímicos monoelementales, archivados como ficheros **.srf** (Figs. 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8).

◆ **Procesamiento de imágenes.**

Los Sistemas de Información Geográfica (GIS) constituyen herramientas de amplia aplicación para el procesamiento de imágenes provenientes de diferentes investigaciones geológicas que incluyan atributos o variables de las más diversas procedencias relacionadas con un objetivo común. La inclusión de atributos geoquímicos en el procesamiento de imágenes se ha ido extendiendo y un ejemplo de ello lo constituye el trabajo de Beni Licht y Tarvainon (1996) al aplicar este método a la representación gráfica de Cu, Zn, Ni y As en sedimentos de fondo utilizando una red regular de 700x700 m y un radio de 5 km.

La necesidad de procesar la información geoquímica procedente de varios mapas geoquímicos monoelementales para el pronóstico de cada tipo de mineralización impone la utilización de un GIS, recomendándose en el presente trabajo el sistema IDRISI FOR WINDOWS. De tal forma, el procesamiento de imágenes preconcebido puede materializarse si son convertidos preliminarmente los ficheros **.grd** a ficheros **.img**.

De acuerdo con los requerimientos para la aplicación de los Sistemas Expertos generados por el sistema RELIS se requiere la normalización de los contenidos de cada elemento en las diferentes UIB, establecido mediante la asignación de categorías de acuerdo a la intensidad de la anomalía que representan.

Este procedimiento se aplica directamente en los ficheros **.img** obtenidos con anterioridad, aprovechando para ello las posibilidades de clasificación del sistema IDRISI FOR WINDOWS.

◆ **Aplicación de los Sistemas Expertos.**

La aplicación de los Sistemas Expertos **CUPR2** y **POLI2** utiliza como base los ficheros **.img** generados anteriormente. Cada procesamiento da como resultado un nuevo fichero **.img** que almacena los grados de certidumbre de las diferentes UIB para el pronóstico de cada tipo de mineralización.

El resultado final de este procesamiento consiste en una representación gráfica de los grados de certidumbre por intervalos que posibilitan el agrupamiento de las UIB en tres categorías. La edición de los mapas patrones para el pronóstico geoquímico de mineralización cuprífera y polimetálica (Figs. 3.9 y 3.10) se realiza en forma de imágenes de SURFER FOR WINDOWS (versión 6.04).

◆ **Aplicación de Análisis de Componente Principales.**

Con vistas a generalizar los resultados del procesamiento anterior y como vía para la ejecución de un pronóstico geoquímico prospectivo de mineralización sulfurosa se propone la aplicación de **Análisis de Componentes Principales**, mediante el cual se pueden integrar los grados de certidumbre asociados a la mineralización cuprífera y polimetálica (Figs. 3.9 y 3.10). De esta forma se logra una mayor representatividad para el pronóstico prospectivo de mineralización sulfurosa en conjunto, ya que resulta muy difícil distinguir ambos tipos de mineralización a partir de investigaciones litogeogeoquímicas regionales. La asignación de categorías prospectivas basadas en las investigaciones litogeogeoquímicas queda definida como sigue:

Categoría prospectiva	Significado	Grado de Certidumbre
I	Intensamente prospectiva	>80%
II	Muy prospectiva	60-80%
III	Medianamente prospectiva	40-60%
IV	Débilmente prospectiva	20-40%

Este análisis estadístico fue ejecutado en IDRISI FOR WINDOWS a partir del procesamiento de los ficheros **.img** que almacenan los grados de certidumbre para mineralización cuprífera y polimetálica.

La edición final del mapa patrón para el pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa fue realizada

en SURFER FOR WINDOWS (versión 6.04), representando en forma de imágenes los grados de certidumbre de cada UIB y estableciendo las categorías prospectivas según los intervalos definidos anteriormente (Fig. 3.11).

◆ Interpretación integral de los resultados y pronóstico geoquímico prospectivo.

En este análisis nos limitaremos a evaluar el área encerrada en los diferentes mapas mediante un polígono de trazo rojo, con una superficie de 78.5 km² y un total de 1264 UIB. Esto permite centrar la atención en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco, objeto de nuestra investigación.

Dada la extraordinaria fracturación que caracteriza al Distrito Metalogénico Dora-Francisco resulta imposible detectar rasgos de zonalidad geoquímica para las aureolas de dispersión primarias, basándose en investigaciones geoquímicas preliminares a esta escala (1:50 000). Esta limitación determina que apenas pueda realizarse una caracterización de las anomalías litogeoquímicas de los principales elementos indicadores de la mineralización sulfurosa e interpretar los mapas patrones para el pronóstico geoquímico con fines prospectivos.

Un análisis preliminar de la distribución espacial de las anomalías litogeoquímicas y su asociación con determinadas secuencias litológicas de la Formación San Cayetano corrobora la existencia de una franja metalífera perspectiva para mineralización sulfurosa, la cual se extiende en dirección suroeste-noreste con una alternancia de las secuencias sc_1^2 (sc^d) y sc_2^1 (sc^e) con contactos tectónicos bien definidos entre sí y donde se localizan los principales depósitos y manifestaciones minerales.

En la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro existe un desarrollo notable de las anomalías litogeoquímicas de Cu, Pb, Zn, Ag y Ba, diferenciándose claramente por sus dimensiones, intensidades y morfología de acuerdo a la secuencia litológica a la que están asociadas. Así, las anomalías de Ag son exclusivas de la secuencia sc_1^2 (sc^d), abarcando el área ubicada por el depósito Loma Hierro; las anomalías de Cu resultan predominantes en la secuencia sc_2^1 (sc^e), extendiéndose desde el depósito Francisco hasta la manifestación Loma Roja; y las anomalías de Pb, Zn y Ba están presentes en ambas pero se manifiestan con mayores intensidades en la secuencia sc_1^2 (sc^d), correspondiéndose espacialmente con el depósito Loma Hierro.

Para la estructura metalífera Cándida son representativas las anomalías de Cu, Mo, Co, Zn, Ba y Pb distinguiéndose por sus dimensiones e intensidades, pero desarrollándose sólo en la secuencia sc_2^1 (sc^e). Precisamente, las anomalías de Cu, Mo y Co presentan una extensión areal e intensidades muy superiores al resto, con una morfología bien definida; en particular, las anomalías de Mo son exclusivas de esta región, pudiendo constituir un índice de la profundidad de la posición del corte de erosión respecto a los

cuerpos minerales cupríferos en esta región.

La existencia de un contraste excepcional de las anomalías litogeoquímicas en la región de la estructura metalífera Cándida y del depósito Loma Hierro es indicativa de una posición del corte de erosión más cercana (en algunos casos coincidente) con los cuerpos minerales que las generan, expresada a través de zonas de oxidación y sombreros de hierro muy desarrollados.

Dentro de la estructura metalífera Dora-Amistad las anomalías litogeoquímicas son menos significativas en cuanto a intensidad y dimensiones, desarrollándose predominantemente en la secuencia sc_2^1 (sc^c). Esto parece estar relacionado con un corte de erosión menos profundo que en las estructuras metalíferas Francisco-Loma Hierro y Cándida.

Los datos litogeoquímicos utilizados en el procesamiento son suficientemente confiables para el grado de detalle considerado, lo cual le confiere una importancia excepcional para el pronóstico geoquímico de estos tipos de mineralización en otras regiones poco estudiadas del noroeste de Pinar del Río.

El mapa patrón para el pronóstico de mineralización cuprífera (Fig. 3.9) indica las características excepcionales de las estructuras metalíferas Cándida y Francisco-Loma Hierro (manifestación Loma Roja) para la localización de este tipo de mineralización o de sus especies minerales secundarias. La distribución de las UIB según los grados de certidumbre expresados para caracterizar la potencialidad de este tipo de mineralización en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco se define a continuación:

Grados de certidumbre	UIB	Secuencia litológica
>85%	19	sc_2^1 (sc^c)
	5	sc_1^2 (sc^d)
70-85%	36	sc_2^1 (sc^c)
	4	sc_1^2 (sc^d)
	6	sc_2^2 (sc^b)
50-70%	13	sc_1^2 (sc^d)
	3	sc_2^1 (sc^c)
25-50%	29	sc_2^1 (sc^c)
	22	sc_1^2 (sc^d)
	20	sc_2^2 (sc^b)

	4	$sc_1^1 (sc^c)$
Total	68	$sc_2^1 (sc^c)$
	44	$sc_1^2 (sc^d)$
	26	$sc_2^2 (sc^b)$
	4	$sc_1^1 (sc^c)$

Esta tabla refleja fielmente la tendencia de la mineralización cuprífera a asociarse a la secuencia $sc_2^1 (sc^c)$, aunque ocasionalmente ofrece inexactitudes al respecto (en el intervalo de 50-70% de certidumbre) con una aparición mayoritaria en la secuencia $sc_1^2 (sc^d)$. Debe prestarse atención también a la secuencia $sc_2^2 (sc^b)$ que se manifiesta con varias UIB (25-50% de certidumbre). Sin embargo, los totales atestiguan una fuerte asociación entre las UIB categorizadas como prospectivas y el paquete arenoso de la Formación San Cayetano (parte inferior-media del corte estratigráfico).

El mapa patrón para el pronóstico de mineralización polimetálica (Fig. 3.10) confirma la potencialidad de la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro (depósito Loma Hierro) para la existencia de este tipo de mineralización o de sus especies minerales secundarias. Un resumen de la distribución de las UIB según los grados de certidumbre asignados se presenta a continuación:

Grados de certidumbre	UIB	Secuencia litológica
>85%	14	$sc_1^2 (sc^d)$
	8	$sc_2^1 (sc^c)$
70-85%	25	$sc_1^2 (sc^d)$
	26	$sc_2^1 (sc^c)$
	13	$sc_2^2 (sc^b)$
50-70%	25	$sc_1^2 (sc^d)$
	49	$sc_2^1 (sc^c)$
	11	$sc_2^2 (sc^b)$
25-50%	32	$sc_1^2 (sc^d)$
	34	$sc_2^1 (sc^c)$
	53	$sc_2^2 (sc^b)$
	2	$sc_3 (sc^a)$
Total	127	$sc_2^1 (sc^c)$
	95	$sc_1^2 (sc^d)$
	77	$sc_2^2 (sc^b)$
	2	$sc_3 (sc^a)$

En este caso se torna más compleja la interpretación pues los resultados son opuestos a lo esperado. Esto quiere decir que se han introducido imprecisiones que imposibilitan asociar la mineralización polimetálica a un paquete de rocas específico, sobre la base de este procesamiento. Esto podría estar motivado por una distribución más amplia de las anomalías de Pb, Zn y Ba en todo el Distrito Metalogénico Dora-Francisco, vinculada tanto a la mineralización cuprífera como a la polimetálica.

Esta situación indica la necesidad de realizar un pronóstico geoquímico para mineralización sulfurosa en general, sin distinciones entre mineralización cuprífera y polimetálica.

Esto se puede lograr mediante el análisis del mapa patrón para el pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa (Fig. 3.11), el cual sugiere la existencia de varias zonas dentro de las diferentes estructuras metalíferas con diferente carácter prospectivo.

La distribución espacial de las UIB en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco según sus categorías prospectivas se expresaría como sigue:

Categoría	UIB	Area (km²)	%
I	14	0.88	1.1
II	59	3.69	4.7
III	101	6.31	8.0
IV	134	8.38	10.6
Total	308	19.26	24.4

De esta manera se ratifica la potencialidad metalífera de la región y, especialmente, la repercusión que tiene la existencia de las secuencias sc_2^1 (sc^c) y sc_1^2 (sc^d) y las estructuras metalíferas Francisco-Loma Hierro y Cándida en la localización de mineralización sulfurosa.

3.5- Comprobaciones experimentales de la potencialidad metalífera del Distrito Metalogénico Dora-Francisco a escala regional.

Con fines experimentales para determinar la efectividad del método de los sedimentos de fondo dentro del Distrito Metalogénico Dora-Francisco, la Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A (1997). propuso un programa de muestreo de sedimentos limo-arcillosos fluviales en un área de 78.5 km², delimitada según las coordenadas Lambert (sistema Cuba Norte):

X

Y

I	180 150	285 000
II	183 150	285 000
III	185 650	287 600
IV	191 100	295 600
V	188 300	298 250
VI	178 000	288 650
VII	178 000	287 200

Los resultados obtenidos de este muestreo complementan las observaciones acerca de la distribución de los elementos indicadores de la mineralización cuprífera y polimetálica en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco y, consiguientemente, permiten confirmar la validez de los mapas patrones para el pronóstico geoquímico presentados anteriormente.

En total fueron recolectadas 203 muestras de sedimentos de fondo, para una densidad de muestreo de 3 muestras/km², representadas gráficamente en el mapa de ubicación (Fig. 3.12).

El carácter compósito de estas muestras permite evaluar las cuencas fluviales como posibles fuentes de suministro de los elementos indicadores de la mineralización a partir de la erosión de zonas mineralizadas (aureolas de dispersión, zonas de oxidación, sombreros de hierro, mineralización primaria).

3.5.1- Recolección, preparación y análisis de las muestras de sedimentos de fondo.

El muestreo de sedimentos de fondo se realizó siguiendo un programa elaborado que incluyó el estudio de los lugares más apropiados para la realización de esta actividad de acuerdo con la red fluvial existente y condiciones geomorfológicas.

Las muestras fueron recolectadas en los cauces de la red fluvial, consistiendo en 200-300 g de sedimentos limo-arcillosos procedentes de zonas de acumulación.

La preparación de las muestras fue realizada por el LACEMI en Ciudad de La Habana y consistió en el secado, disgregación manual y tamizado del material recolectado hasta obtener 100 g - 175 µm (- 80 mallas).

El análisis de las muestras se ejecutó por Chemex Labs en Vancouver, Canadá, mediante espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) para 32 elementos y análisis de Au por ensayo al fuego y absorción atómica (FA-AA).

3.5.2- Metodología para el procesamiento de los datos geoquímicos.

El procesamiento de los resultados del muestreo de sedimentos de fondo estuvo dirigido a esclarecer el papel de los elementos indicadores de la mineralización en los flujos de dispersión, determinando el carácter complejo de sus asociaciones.

◆ Base de datos.

La base de datos geoquímicos incluye los resultados analíticos para los elementos indicadores de la mineralización (Cu, As, Bi, Pb, Zn, Ba, Ag, Sb) en los sedimentos de fondo de la región (Vázquez et al., 1998).

Esta información está archivada en un fichero texto (formato ASCII) disponible para el procesamiento automatizado.

◆ Confección de mapas geoquímicos monoelementales.

En primer término fueron determinados el fondo geoquímico y los umbrales de contenidos anómalos de los diferentes elementos indicadores de la mineralización mediante la aplicación de un procedimiento gráfico basado en la construcción de histogramas y gráficos de probabilidad normal para Cu, As, Pb, Zn, Ba y Ag (Figs. 3.13a, 3.13b, 3.13c, 3.13d, 3.13e, 3.13f). Atendiendo al ajuste de los datos empíricos a un modelo de distribución probabilístico lognormal, en el gráfico correspondiente se determinaron estos parámetros geoquímicos para las equivalencias siguientes:

Parámetro geoquímico	Valores esperados en el gráfico probabilístico
Contenido de fondo (Cf)	0
1er Umbral de Contenidos Anómalos (Ca ₁)	1
2do Umbral de Contenidos Anómalos (Ca ₂)	2
3er Umbral de Contenidos Anómalos (Ca ₃)	3

Para los elementos Bi y Sb, por resultar la mayor parte de sus valores inferiores al límite de detección del método analítico empleado no pudieron ser determinados estos parámetros estadísticamente, siendo estimados empíricamente.

De todo este análisis resultaron los valores que se indican a continuación:

Tabla 3.2- Fondo geoquímico y umbrales de contenidos anómalos para los principales elementos indicadores de la mineralización (sedimentos de fondo)

Elemento	Cf (ppm)	Ca₁ (ppm)	Ca₂ (ppm)	Ca₃ (ppm)
Cu	16	26	46	84
As	4	15	44	120
Bi	1	2	4	8
Pb	23	42	84	160
Zn	54	100	160	256
Ba	50	68	86	106
Ag	0.13	0.5	2	8
Sb	1	2	4	6

Atendiendo a las características del método de los sedimentos de fondo y al enrarecimiento del muestreo, los mapas geoquímicos monoelementales elaborados se representan mediante símbolos y no en forma de isolíneas de contenidos anómalos (Figs. 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21).

◆ **Análisis de clusters.**

Con el objetivo de definir los enlaces existentes entre estos elementos en los sedimentos de fondo se procedió a la aplicación del análisis de clusters por distancias euclidianas, resultando así un dendrograma donde se representan las diferentes agrupaciones, la intensidad de estos vínculos y su orden jerárquico (Fig. 3.22).

En este gráfico se pueden apreciar dos ramas principales que definen las agrupaciones siguientes, según su jerarquía: (Bi-As)-(Cu-Zn) y (Pb-Ba)-Sb.

Esto permite valorar las asociaciones inherentes a estos elementos, como paso previo para la construcción de mapas geoquímicos complejos en los que se integre la información de dos o más elementos.

◆ **Confección de mapas geoquímicos complejos.**

Para la construcción de los mapas geoquímicos complejos se prefirió la aplicación del método de los parámetros complejos (Vajromieev en: Díaz y Casarreal, 1991), para lo cual fue necesario seguir los pasos que se indican a continuación:

- 1- Logaritmicación de las concentraciones de los elementos, en correspondencia con el ajuste de los datos empíricos a un modelo de distribución lognormal.
- 2- Normalización de cada una de las variables logaritmizadas.
- 3- Obtención de los parámetros complejos mediante sumatorias de las variables normalizadas.

Para definir los umbrales de contenidos anómalos para los parámetros complejos se siguió el procedimiento gráfico sobre la base de la construcción de los histogramas y gráficos de probabilidad normal (Figs. 3.23a, 3.23b, 3.23c), ya utilizado con anterioridad para cada uno de los elementos. De aquí fueron obtenidos los resultados que se muestran a continuación:

Tabla 3.3- Fondo geoquímico y umbrales de contenidos anómalos para los parámetros complejos.

Parámetro complejo	Cf	Ca₁	Ca₂	Ca₃
As-Bi-Cu-Zn	0	2.9	5.8	8.7
Pb-Ba-Sb	0	2.6	5.2	7.8
As-Bi-Cu-Zn-Pb-Ba-Sb	0	4.7	9.4	14.1

Finalmente se procedió a construir los mapas geoquímicos de cada parámetro complejo mediante el ploteo de puntos de diferentes tamaños, representativos de los 3 niveles anómalos indicados (Figs. 3.24, 3.25, 3.26).

3.5.3- Interpretación de los resultados.

La conjunción de los mapas geoquímicos de sedimentos de fondo y el mapa topográfico permite valorar la procedencia del flujo de dispersión que, de hecho, representa la prolongación espacial de las aureolas de dispersión (primarias y secundarias).

La región queda dividida claramente sobre la base de la distribución de los elementos indicadores de la mineralización en los sedimentos de fondo, lo cual se expresa en las apreciaciones que exponemos a continuación.

Si superponemos los mapas geoquímicos monoelementales de sedimentos de fondo es posible apreciar las regularidades siguientes:

- La asociación Cu-As (Figs. 3.15 y 3.16) es exclusiva del extremo norte de la estructura metalífera

Francisco-Loma Hierro y de la estructura metalífera Cándida, constituyendo esto una expresión simplificada de la metalogenia y de la posición del corte erosivo respecto a los cuerpos minerales. Sus intensidades máximas están vinculadas directamente con la manifestación Loma Roja y el depósito Cándida, aunque también se manifiestan en los alrededores de las manifestaciones Oro Cándida, San Gervacio y La Mejor, así como en una franja alargada situada en el borde este de la estructura metalífera Cándida.

- En ocasiones se observan algunas muestras con valores anómalos para la asociación Cu-As-Bi (Figs. 3.15, 3.16 y 3.17), pero con una distribución muy limitada. Tales son los casos detectados al noroeste de la manifestación Loma Roja (una muestra) y al este de la manifestación San Gervacio (tres muestras). Este comportamiento parece estar vinculado con la baja capacidad de migración acuosa del Bi, lo cual lo hace muy específico de las zonas de oxidación, retenido por el componente limonítico, y por ello no se manifiesta en los sedimentos de fondo.

- Las anomalías complejas Pb-Zn-Ba-Ag (Figs. 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21) están asociadas preferentemente a la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro. Su expresión más significativa tienen relación directa con el depósito Loma Hierro, contorneando toda esta región según la dirección del escurrimiento superficial. Sin embargo, se pueden apreciar algunas diferencias en relación con la distribución de estos elementos: las anomalías de Pb, Zn y Ag se extienden preferentemente hacia el norte y noreste, mientras las anomalías de Ba alcanzan sus mayores intensidades al sur y sureste. Es característica la reaparición de esta asociación en la cuenca fluvial situada al noreste de la manifestación Loma Roja.

- Se aprecia un desarrollo espacial considerable de la asociación Pb-Zn-Ba-Sb (Figs. 3.18, 3.19, 3.20 y 3.22) en la estructura metalífera Cándida, en especial en las cercanías del depósito homónimo y al noreste de la manifestación San Gervacio.

- En la estructura metalífera Dora-Amistad existe un desarrollo menor de estos flujos de dispersión, caracterizándose por la asociación Cu-Pb-Zn (Figs. 3.15, 3.18 y 3.19) en las proximidades de los depósitos Dora y Amistad y siguiendo el curso del río Mantua. El relieve menos pronunciado y la posición del corte de erosión respecto a los cuerpos minerales contribuyen a estas características.

En caso de analizar los mapas geoquímicos complejos de sedimentos de fondo, las reflexiones, aunque más simples, convergen en lo esencial con lo expresado anteriormente:

- Las anomalías geoquímicas complejas de As-Bi-Cu-Zn (Fig. 3.24) confirman el desarrollo preferencial de los flujos de dispersión de estos elementos en los alrededores de la manifestación Loma Roja y del depósito Cándida, aunque existen algunas evidencias de menor intensidad y/o distribución en las cercanías

de la manifestación San Gervacio y colindantes con los depósitos Dora y Amistad.

- Las anomalías geoquímicas complejas de Pb-Ba-Sb (Fig. 3.25) bordean fundamentalmente el depósito Loma Hierro, aunque también pueden aparecer al norte y noroeste de la manifestación Loma Roja. En relación con el depósito Cándida estas anomalías se reflejan pero con una distribución e intensidades muy limitadas.

- Por último, el análisis de las anomalías complejas de As-Bi-Cu-Zn-Pb-Ba-Sb (Fig. 3.26) conduce a apreciar una distribución diferenciada de los flujos de dispersión entre las tres estructuras metalíferas. La mayor distribución corresponde a la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro, le sigue la estructura metalífera Cándida (depósito Cándida y manifestación San Gervacio) y se revelan muy insuficientemente en la estructura Dora-Amistad. Estas observaciones son un fiel reflejo de la profundidad del corte de erosión en cada una de las estructuras, factor este que está particularmente acentuado en la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.

3.6- Valoración integral de los resultados del procesamiento de los datos geoquímicos regionales y proyección de investigaciones prospectivas.

Gustavsson et al. (1997) utiliza un procedimiento de superposición de mapas de superficie coloreados (imágenes) para detritos glaciares y mapas de puntos para sedimentos de fondo en la región este de Finlandia con el fin de analizar la distribución espacial del Mg. Esta idea para la visualización de mapas geoquímicos la hemos retomado para analizar integralmente las anomalías geoquímicas existentes en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco.

El solapamiento del mapa patrón para el pronóstico geoquímico, los mapas geoquímicos monoelementales de sedimentos de fondo y el mapa topográfico permiten consolidar las ideas que se poseen acerca de la especialización geoquímica del Distrito Metalogénico Dora-Francisco (Lara et al., 1989) y, sobre esta base, ofrecer criterios válidos para la prospección de mineralización cuprífera y polimetálica en otras regiones con características geológicas similares utilizando información geoquímica regional.

De manera global, es característica la alternancia de zonas anómalas cupríferas y polimetálicas, la cual se puede resumir como sigue respecto a los depósitos y manifestaciones minerales que los generan:

	Anomalías geoquímicas	
	Rocas	Sedimentos de fondo
Depósito Dora	Cu-Mo-Co	Cu

Depósito Amistad	Pb-Zn	Pb-Zn
Manifestación La Estrella	Cu-Mo-Co	Cu-As-Zn-Pb
Manifestación San Gervacio	Cu-Mo-Co	Cu-As-Zn-Pb
Depósito Cándida	Cu-Mo-Co-Pb-Zn-Ag	Cu-As-Pb-Zn-Sb
Depósito Cándida (Norte)	Pb-Zn	Pb-Zn
Depósito Loma Hierro	Pb-Zn-Ba-Ag	Pb-Zn-Ba-Ag
Depósito Francisco	Cu-Mo-Co-Pb-Zn	Cu-As-Pb-Zn
Manifestación Loma Roja	Cu	Cu-As-Pb
Manifestación Loma Roja (Noreste)	Pb-Zn-Ba	Pb-Zn-Ag

Existen varios sectores con interés prospectivo dentro del Distrito Metalogénico Dora-Francisco que deben ser categorizados a partir de la experiencia que en el orden de pronóstico metalífero se ha acumulado. La proyección de investigaciones prospectivas para mineralización sulfurosa se definen en el mapa preparado al efecto (Fig. 3.27), mediante la integración del mapa patrón para el pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa y el mapa geoquímico de sedimentos de fondo para la combinación As-Bi-Cu-Zn-Pb-Ba-Sb (parámetros complejos); esto redunda en una certeza superior al conferirle ordenes de prioridad a los sectores seleccionados para la prospección. La estructura, continuidad y categorías prospectivas de las UIB, conjugadas con los resultados representados en el mapa geoquímico complejo de sedimentos de fondo, permiten orientar la ejecución de trabajos de prospección futuros en varios sectores de estas estructuras metalíferas. Las características fundamentales de los sectores seleccionados se presentan a continuación:

Estructura metalífera	Sector	Prioridad	Area (km²)
Francisco-Loma Hierro	F-1	II	2.04
	F-2	III	2.00
	F-3	III	1.20
Cándida	C-1	I	2.72
	C-2	II	1.62
	C-3	III	0.82
	C-4	III	1.40
Dora-Amistad	D-1	II	2.88
	D-2	III	2.47
Total			18.15

El área propuesta para prospectar representa el 23.1% de toda la región investigada, lo cual resulta adecuado dada su potencialidad metalífera.

En el mapa también se representan los sectores actuales de prospección, cuyos resultados se ofrecen en el capítulo siguiente.

CAPITULO IV- INVESTIGACIONES GEOQUIMICAS EN SECTORES PROSPECTIVOS

Con vistas a confirmar la efectividad de las investigaciones geoquímicas para la localización de diferentes tipos de mineralización en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco fueron seleccionados 2 sectores de prospección: **estructura metalífera Francisco-Loma Hierro** y **manifestación Oro Cándida** (trazado de líneas indicado en la Fig. 3.37).

El procesamiento estadístico y gráfico de los datos geoquímicos resultantes constituyó la base para el análisis e interpretación del papel de la distribución de los diferentes elementos en relación con los tipos de mineralización. Adicionalmente, esto permitió delimitar y establecer la potencialidad geoquímico-metalogénica de diferentes zonas anómalas.

En general, el tratamiento gráfico y estadístico de esta información se realizó utilizando diferentes sistemas automatizados: MICROSOFT EXCEL (versión 7.0), STATISTICA FOR WINDOWS (versión 4.0), SURFER FOR WINDOWS (versión 6.04), IDRISI FOR WINDOWS.

4.1- Recolección, preparación y análisis de las muestras.

Estas actividades comprenden dos etapas: proyección y ejecución, las cuales están en correspondencia con las características naturales de la región y las particularidades del objeto geológico que se pretende revelar mediante las anomalías geoquímicas. En resumen, pudieran definirse los siguientes pasos:

◆ Delimitación del área de investigación y proyección de los trabajos geoquímicos.

La potencialidad de la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro quedó claramente definida durante los trabajos regionales y la mineralización sulfurosa está evaluada parcialmente mediante pozos de perforación. Esto permite consolidar la perspectiva de esta región y proyectar trabajos geoquímicos encaminados a comprobar su correspondencia con la mineralización oculta y a orientar la perforación. Además, de esta manera se garantiza el estudio de la distribución espacial de los elementos indicadores de la mineralización acorde con el grado de detalle que se precise, para lo cual resulta necesario proyectar y ejecutar un trazado de líneas topográfico que sirva de base al muestreo.

◆ Selección del objeto a muestrear.

Aquellas zonas donde los procesos de meteorización han contribuido al desarrollo de depósitos autóctonos (eluvial-deluviales) con una participación activa de los agentes físicos, químicos y bioquímicos, resultan

favorables para el muestreo de suelos; tal es el caso de la región ocupada por la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro, donde existen suelos con una amplia distribución espacial y con un perfil completo. Por otra parte, en las regiones donde predominan los procesos erosivo-denudativos es más recomendable la utilización del muestreo litogeoquímico dada la exposición constante de la roca fresca a la superficie; esta circunstancia fue aprovechada en el área que ocupa la manifestación Oro Candida para proyectar las investigaciones geoquímicas de prospección.

◆ **Muestreo.**

Para realizar el muestreo de suelos en la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro se tuvieron en cuenta las peculiaridades de su perfil y la posición del horizonte representativo dentro de este. Investigaciones anteriores (Lara et al., 1989) han permitido definir que los elementos indicadores de la mineralización tienden a concentrarse en el horizonte iluvial (25-30 cm de profundidad), por lo que asumimos dicha información para la ejecución de esta actividad. Esta actividad se desarrolló utilizando una red de 100x20 m y 50x20 m (en zonas de detalle) siguiendo el trazado de líneas topográfico (Azimut 325°). Para ello se cavaron de forma manual pequeños agujeros para acceder al horizonte iluvial (25-30 cm de profundidad) en cada una de las estacas seleccionadas, tomándose 200-300 g de material arcilloso. Cada muestra fue identificada, envasada y definida su ubicación en el mapa topográfico (1:10000). En total fueron recolectadas 1936 muestras.

El muestreo litogeoquímico en la manifestación Oro Cándida se basó en la recolección de fragmentos de rocas que caractericen cada afloramiento, según la ejecución de itinerarios por perfiles topográficos, caminos, arroyos, etc. En total fueron coleccionadas 400 muestras mediante el método de fragmentos, incluyendo en estas: rocas no alteradas, rocas alteradas por procesos hidrotermales, rocas alteradas por procesos hipergénicos (oxidación, hidrólisis, caolinitización), además de algunas que contemplan vetillas de mineralización primaria (sulfuros) y de mineralización oxidada (limonitas y hematitas) en asociación con vetas de cuarzo en las zonas de stockwork.

◆ **Mapeo.**

Los suelos de la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro presentan un desarrollo adecuado de su perfil, pudiendo distinguirse fácilmente los horizontes húmico (A) e iluvial (B).

El mapeo de los suelos se realizó simultáneamente al muestreo, estando dirigido a realizar una caracterización más detallada y establecer límites más precisos de las zonas de oxidación en la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro. Este consistió en la descripción de las características fundamentales

del horizonte iluvial (horizonte representativo de muestreo) teniendo en cuenta: coloración, composición y posición geomorfológica.

A partir de esta información cualitativa se realizó una clasificación que comprende 4 categorías atendiendo al grado de oxidación apreciado en los suelos:

Categoría	Valor	Significado
I	5	Oxidación intensa. Suelos de color rojo intenso - rojo parduzco.
II	4	Oxidación media. Suelos de color pardo rojizo.
III	3	Oxidación débil. Suelos de color pardo amarillento-anaranjado.
IV	2	Ausencia de oxidación. Suelos de color pardo claro - amarillento.

Acompañando al muestreo litogeoquímico en la manifestación Oro Candida se llevó a cabo un mapeo detallado de las zonas de oxidación, dada la relación que estas tienen con la mineralización sulfurosa primaria. Se prestó atención especial a la existencia de limonitas y hematitas, zonas de stockwork con vetillas de cuarzo y de mineralización oxidada y suelos rojos, siendo descrita sistemáticamente cada muestra y asignándole una de las categorías siguientes:

Categoría	Significado
I	Rocas intensamente oxidadas (vetillas de mineralización oxidada ampliamente distribuidas, hematización significativa, stockwork cuarzo oxidado).
II	Rocas con oxidación intermedia (stockwork cuarzo ligeramente oxidado, mineralización vetítico-diseminada y diseminada oxidada, hematización).
III	Rocas con oxidación débil (vetillas aisladas de mineralización oxidada, ligera hematización o limonitización).
IV	Rocas no oxidadas.

◆ **Preparación y análisis de las muestras.**

La preparación de las muestras fue realizada por el LACEMI en Ciudad de La Habana. Para las muestras de suelo de la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro consistió en el secado, disgregación manual y tamizado del material recolectado hasta obtener 100 g - 175 μm (- 80 mallas). En el caso de las muestras litogeoquímicas de la manifestación Oro Cándida les fue aplicado un procedimiento de secado, trituración y pulverización.

El método analítico empleado fue espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente

(ICP-AES), requiriéndose previamente la digestión de la muestra en agua regia. Mediante este es posible obtener las concentraciones de varios elementos calcófilos y litófilos con una sensibilidad, precisión y exactitud adecuadas para los trabajos de prospección. El conjunto de elementos analizados y los intervalos de concentraciones (límite de detección-límite superior) para cada uno de ellos aplicando este método se relacionan a continuación: Ag(0.2-100 ppm), Al(0.01-15%), As(2-10000 ppm), Ba(10-10000ppm), Be(0.5-100 ppm), Bi(2-10000 ppm), Ca(0.01-15%), Cd(0.5-500 ppm), Co(1-10000 ppm), Cr(1-10000 ppm), Cu(1-10000 ppm), Fe(0.01-15%), Ga(10-10000 ppm), Hg(1-10000 ppm), K(0.01-10%), La(10-10000 ppm), Mg(0.01-15%), Mn(5-10000 ppm), Mo(1-10000 ppm), Na(0.01-10%), Ni(1-10000 ppm), P(10-10000 ppm), Pb(2-10000 ppm), Sb(2-10000 ppm), Sc(1-10000 ppm), Sr(1-10000 ppm), Ti(0.01-10%), Tl(10-10000 ppm), U(10-10000 ppm), V(1-10000 ppm), W(10-10000 ppm) y Zn(2-10000 ppm).

Además, fueron realizados análisis de Au (5-10000 ppb) mediante los métodos de ensayo al fuego y espectrometría de absorción atómica (FA-AAS).

4.2- Metodología para el procesamiento de los datos.

Esta metodología incluye el procesamiento estadístico y gráfico de la información geoquímica con el objetivo de determinar las regularidades en la distribución de los diferentes elementos en el objeto de estudio (suelos, rocas). Todo ello se resume en el cuadro sinóptico que se presenta seguidamente:

◆ **Base de datos.**

Un requisito primordial para el procesamiento de los datos geoquímicos lo constituye la creación de una base de datos que contenga toda la información disponible. En ella se incluyen: identificación de las muestras, ubicación espacial (coordenadas Lambert), resultados analíticos de todos los elementos con utilidad práctica para el procesamiento estadístico y gráfico posterior (Au, Ag, Al, As, Ba, Bi, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Sr, V, Zn) y cualquier información cualitativa que se integre a la metodología empleada (categorías de suelos oxidados para la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro y categorías asignadas a las rocas de la manifestación Oro Cándida).

◆ **Distribución espacial de los objetos geológicos investigados.**

Este paso está encaminado a evaluar la extensión superficial de las zonas que manifiestan indicios de mineralización y que, de hecho, pueden servir de base a las investigaciones geoquímicas.

El resultado final de este procesamiento se expresa gráficamente en forma de mapas de distribución espacial de zonas mineralizadas (suelos oxidados, zonas de oxidación, etc.).

◆ **Procesamiento matemático-estadístico de los datos geoquímicos.**

La aplicación de los métodos matemático-estadísticos al procesamiento de los datos geoquímicos está dirigida a esclarecer el comportamiento geoquímico de cada elemento en el objeto de estudio (rocas, suelos, etc) y descubrir las regularidades inherentes a su participación compleja en las aureolas de dispersión (primarias y secundarias). Estos principios se sustentan en las posibilidades que ofrece la estadística elemental y la estadística multivariada, mediante el auxilio de medios automatizados. Además se tuvo en cuenta la experiencia internacional acerca de la incorporación de estos métodos al procesamiento de datos geoquímicos, los tipos de representación gráfica más utilizados y la forma de interpretar los resultados.

1- Procesamiento estadístico elemental.

El procesamiento matemático-estadístico elemental está orientado en dos direcciones fundamentales:

- Determinación de parámetros estadísticos fundamentales para zonas no anómalas.

Qiuming et al. (1996) utilizan histogramas de distribución y gráficos de probabilidad normal para separar el fondo y las anomalías geoquímicas de Cu, As y Au en sedimentos de fondo

En este principio nos hemos basado para realizar el procesamiento estadístico gráfico, en el objetivo de realizar una caracterización geoquímica de los objetos geológicos investigados (suelos, rocas, etc.) fuera de la influencia de las zonas mineralizadas. Para ello se determinaron adicionalmente los parámetros estadísticos básicos (media y desviación estandar) y el modelo de distribución al que se ajustan los datos empíricos resultantes del análisis de las muestras geoquímicas. Esto creó las bases para la diferenciación de las zonas anómalas, de acuerdo a su contraste con el fondo geoquímico de cada elemento.

- Distribución de los elementos en los objetos geológicos según las categorías asignadas.

A partir de la clasificación realizada a los objetos geológicos muestreados y al mapeo geológico se pretende evaluar la asociación paragenética de elementos en las zonas mineralizadas (zonas de oxidación, zonas alteradas hidrotermalmente, etc.) y no mineralizadas. Esto posibilita detectar los principales elementos indicadores de la mineralización y utilizarlos con fines prospectivos en la construcción de mapas geoquímicos monoelementales.

◆ Mapas geoquímicos monoelementales.

Se impone preliminarmente la determinación del fondo geoquímico y los umbrales de contenidos anómalos para cada elemento indicador de la mineralización en el objeto geológico muestreado.

Para estimar la continuidad de los resultados de las concentraciones de cada elemento indicador de la mineralización en el espacio fue diseñada una red regular y sobre esta base se aplicó el método de interpolación KRIGING, utilizando para ello el sistema SURFER FOR WINDOWS (versión 6.04).

La edición de los mapas geoquímicos monoelementales se realizó según la representación gráfica realizada por Arias (1996), consistente en el sombreado de los mapas a partir de niveles anómalos establecidos por un tratamiento estadístico clásico.

Teniendo en cuenta esto fueron contorneadas las anomalías geoquímicas como zonas coloreadas (rellenas) diferenciadas para cada nivel anómalo (débil, medio e intenso). Es recomendable utilizar colores fijos para cada elemento, indicando la intensidad con diferentes tonos o matices. Todo ello facilita el reconocimiento visual de las anomalías geoquímicas de cada elemento, lo cual resulta cómodo para cualquier especialista que consulte esta información.

2- Procesamiento estadístico multivariado.

Para ello se procedió a la aplicación de una metodología que incluye:

- Determinación de coeficientes de correlación y análisis de clusters.
- Análisis de factores.
- Análisis de regresión múltiple.

Este procesamiento se llevó a cabo de manera automatizada utilizando el sistema STATISTICA FOR WINDOWS (versión 4.0).

a) Análisis de clusters.

Tianxing et al. (1995) utilizan el análisis de clusters para establecer las relaciones entre Cu, Pb, Zn, Ag, Mn, Cr, Mo, As con la montmorillonita, limonita y caolinita en los suelos rojos. Por otra parte, Hongjin et al. (1995) incluye este mismo procedimiento por distancias euclidianas con el objetivo de distinguir las anomalías geoquímicas del fondo, para la clasificación de las anomalías geoquímicas regionales y para el estudio de las características de los depósitos. Estas aplicaciones sirvieron de base para el procesamiento de los datos geoquímicos en sus diferentes categorías.

Teniendo en cuenta estos antecedentes nos propusimos establecer la intensidad del enlace entre dos o más elementos, para lo cual se recomienda determinar los coeficientes de correlación o normalizar las variables previo a la aplicación del análisis de clusters. El resultado final de este procesamiento se presenta en forma de dendrogramas, donde se expresan los vínculos y órdenes de jerarquía entre los elementos analizados. Este procedimiento permite esclarecer aquellos nexos ocultos entre varios elementos, creándose así diferentes agrupaciones o subconjuntos de elementos que cumplen una función específica en el objeto geológico investigado.

b) Análisis de factores.

Una premisa para proceder a la utilización del análisis de factores lo constituye la aplicación realizada por Melchior et al. (1996) como parte de un estudio geoquímico y microbiológico de los suelos que incluyó Au, Fe, Ni, Cr, Zn, Ba, V, As, Cu, Mn, Y, Sb, Pb, logrando la separación de los elementos según el papel que estos juegan en este sistema geoquímico.

De esta manera se pretende definir el papel que juegan los diferentes factores como controladores de las concentraciones de diferentes elementos y, conocido el posible comportamiento geoquímico de estos, concretar las funciones que realizan en conjunto en este sistema multivariado.

c) Análisis de regresión múltiple.

Teniendo en cuenta los vínculos que se establecen entre dos o más elementos en las zonas aureólicas resulta conveniente poder estimar las concentraciones de uno de ellos (variable dependiente) en función de las concentraciones de dos o más (variables independientes).

Esto pudiera conducir a la racionalización en la aplicación de métodos analíticos, lo cual es muy ventajoso económicamente. Tal es el caso del Au, el cual puede ser estimado a partir de elementos como el As y Bi (muy asociados entre sí) y, por consiguiente, no requeriría de nuevos análisis para su determinación en otras muestras del mismo objeto geológico.

También ello puede servir como una confirmación de las asociaciones paragenéticas de elementos más confiables.

En todos los casos se aplica la prueba t de Student para comprobar cada uno de los coeficientes y el intercepto en el eje de las ordenadas con un nivel de significación del 95%.

Algunas particularidades metodológicas y los resultados obtenidos para cada uno de los sectores de estudio proyectados se presentan a continuación.

◆ Mapas geoquímicos complejos.

Bellehumeur et al. (1994) hace uso del Análisis de Componentes Principales para explorar la estructura de correlación de los datos geoquímicos en la fracción pesada y en la fracción fina de sedimentos de fondo, obteniendo así un mapa complejo representativo de esta.

Teniendo en cuenta esto y aprovechando las facilidades que ofrece el sistema IDRISI FOR WINDOWS para la aplicación del Análisis de Componentes Principales, seleccionamos este método como una opción factible para la construcción de mapas geoquímicos complejos a partir de la información contenida en los mapas geoquímicos monoelementales.

La aplicación del Análisis de Componentes Principales mediante el procesamiento de imágenes de los

mapas geoquímicos monoelementales implica la conversión de los ficheros **.grd** de SURFER FOR WINDOWS (versión 6.04) a ficheros **.img** de IDRISI FOR WINDOWS.

Como vía para normalizar los datos a procesar se propone la aplicación del comando STRETCH de IDRISI FOR WINDOWS a cada uno de los ficheros imágenes lográndose así que las concentraciones de todos los elementos alcancen el rango completo de valores permisibles (0-255) y que su influencia se regularice, como requisitos primordiales para el procesamiento de imágenes mediante PCA (Análisis de Componentes Principales).

Fueron seleccionadas diferentes variantes para el Análisis de Componentes Principales, teniendo en cuenta combinaciones de elementos y componentes principales a obtener. El resultado inmediato de este procesamiento se verifica en forma de tablas donde se expresan varios parámetros estadísticos multivariados: matriz de correlación, matriz de varianza/covarianza, valores propios (eigenvalues) y carga (loading).

La selección de las componentes principales más apropiadas para la construcción de los mapas geoquímicos complejos está determinada por la cantidad de información útil que ofrecen. Como las características del sistema multivariado están contenidas fundamentalmente en la dos o tres primeras Componentes Principales, estas resultan las más favorables.

Las facilidades que ofrece el sistema SURFER FOR WINDOWS (versión 6.04) para la construcción de mapas de superficie induce a la transformación de los ficheros **.img** de IDRISI FOR WINDOWS (para las componentes principales seleccionadas) a ficheros **.grd**, obteniéndose de esta manera los mapas geoquímicos complejos para cada combinación de elementos predefinida.

4.3- Resultados de las investigaciones geoquímicas en suelos. Estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.

El sector de estudio está limitado por las coordenadas Lambert (sistema Cuba Norte) siguientes:

	X	Y
I	186 000	292 800
II	186 000	295 500
III	188 500	292 800
IV	188 500	295 500

Como derivación inmediata de la base de datos fue obtenido el mapa de ubicación de las muestras de suelo

(Fig. 4.1), el cual sirve de fundamento para la construcción del mapa de suelos oxidados y de los mapas geoquímicos correspondientes.

4.3.1- Distribución espacial de los suelos oxidados.

La distribución de las muestras en las diferentes categorías de suelos para el depósito Loma Hierro y sector Mina Francisco - Loma Roja queda descrita a continuación:

Categorías	Depósito Loma Hierro		Sector Mina Francisco - Loma Roja	
	Muestras	%	Muestras	%
I	161	12.8	73	10.8
II	136	11.6	93	13.8
III	232	19.2	163	24.2
IV	710	56.4	338	51.3
Total	1259		679	

La representación esquemática de estos resultados (Figs. 4.2a y 4.2b) permite valorar con mayor claridad las diferencias en la distribución de los suelos oxidados entre ambos sectores, pudiendo considerarse preliminarmente una extensión areal de los suelos de categorías I y II proporcionalmente semejantes entre el depósito Loma Hierro y el sector Mina Francisco-Loma Roja, pero favorable al primero en magnitud absoluta (aproximadamente un 30% superior) si se comparan las superficies de ambas zonas.

Sobre la base de los valores numéricos asignados a las diferentes categorías de suelos se procedió a la construcción del mapa de suelos oxidados de la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.

Para el procesamiento de esta información se utilizó el método de interpolación KRIGING auxiliándonos para ello del sistema SURFER FOR WINDOWS (versión 6.04).

El mapa de suelos oxidados (Fig. 4.3) permite apreciar la distribución areal de las diferentes categorías de suelos, sirviendo esto como índice para la revelación de las zonas mineralizadas debido a su carácter aureólico y a su relación espacial con los cuerpos minerales primarios.

La morfología y extensión de estas zonas de suelos oxidados son diferentes para el depósito Loma Hierro respecto al sector Mina Francisco-Loma Roja, expresándose así algunas características de los cuerpos minerales que les dan origen:

- En los suelos del depósito Loma Hierro es característica la forma isométrica, lo cual está en correspondencia con la yacencia estratiforme de los cuerpos minerales. Además, presentan una extensión

areal considerable y contornean los afloramientos de mineralización oxidada sobrepasándolos en 3-4 veces, constituyéndose así en un índice directo para su localización espacial en superficie y denotando la intensidad de los procesos hipergénicos en la zona mineralizada.

- En el sector Mina Francisco-Loma Roja los suelos se extienden con formas alargadas y estrechas coincidentes con las partes positivas del relieve, correspondiéndose con zonas de stockwork alteradas por los procesos exógenos. La intensidad de oxidación de estos depósitos es representativa de la posición del corte de erosión respecto a los cuerpos minerales que lo originan.

En general, se puede confirmar una mayor exposición de la zona mineralizada del depósito Loma Hierro a los agentes hipergénicos, determinado por las características morfológicas de sus cuerpos minerales, por su yacencia subhorizontal concordante con la estratificación y por la posición actual próxima o coincidente con el corte de erosión.

4.3.2- Procesamiento estadístico elemental de los datos geoquímicos.

Con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados analíticos del muestreo de suelos, la intensidad de la oxidación observada en ellos y su correspondencia con las características principales de la zona mineral infrayacente, resultó necesario la preparación de toda la información básica y su procesamiento estadístico haciendo uso de los sistemas MICROSOFT EXCEL (versión 7.0) y STATISTICA FOR WINDOWS (versión 4.0).

El procesamiento estadístico elemental se ejecutó atendiendo a la agrupación de las muestras en: zonas no anómalas y categorías de suelos oxidados, con el fin de determinar el papel que juega cada elemento según las diferencias apreciadas en la clasificación de los suelos.

a) Determinación de los parámetros estadísticos fundamentales para zonas no anómalas.

Para el procesamiento de las muestras de suelos se retoma este procedimiento, pero utilizando solamente muestras recolectadas en zonas no anómalas distribuidas entre el depósito Loma Hierro (n= 387) y el sector Mina Francisco-Loma Roja (n= 225).

Sobre esta base y utilizando el sistema STATISTICA FOR WINDOWS (versión 4.0) fueron construidos los histogramas de distribución y gráficos de probabilidad normal (logaritmizados) de los elementos señalados en los suelos del depósito Loma Hierro (figs. 4.4a, 4.4b, 4.4c, 4.4d, 4.4e, 4.4f, 4.4g, 4.4h, 4.4i, 4.4j, 4.4k, 4.4l, 4.4m, 4.4n, 4.4o, 4.4p, 4.4q, 4.4r) y del sector Mina Francisco-Loma Roja (Figs. 4.5a,

4.5b, 4.5c, 4.5d, 4.5e, 4.5f, 4.5g, 4.5h, 4.5i, 4.5j, 4.5k, 4.5l, 4.5m, 4.5n, 4.5o, 4.5p, 4.5q, 4.5r). Esto sirvió de fundamento para comprobar que los datos empíricos correspondientes a cada uno de estos elementos se ajustan a modelos de distribución lognormal. Las variaciones no significativas de las concentraciones de Bi y Sb debido a los límites de detección del método analítico empleado impidieron la aplicación de este procedimiento estadístico.

El procesamiento analítico incluyó la estimación de la media (μ) y desviación estandar (σ) (normal y logaritimizada) para las concentraciones de los diferentes elementos indicados (Tablas 4.1 y 4.2). Para determinar la media de la Ag logaritimizada se propuso multiplicar sus concentraciones por 1000, de forma tal que los logaritmos resultaran números sencillos para el procesamiento.

b) Distribución de los elementos en los suelos.

Esta tarea estuvo encaminada a evaluar preliminarmente la procedencia u origen de los elementos, caracterizar las transformaciones ocurridas durante los procesos de mineralogénesis y valorar el papel que estos juegan en los suelos oxidados en relación con la mineralización, sobre la base del establecimiento de diferencias y semejanzas en la distribución de los elementos entre los suelos del depósito Loma Hierro y sector Mina Francisco-Loma Roja (Tabla 4.3) y entre los suelos según su categoría (Tablas 4.4 y 4.5).

El análisis de los parámetros estadísticos determinados (media y desviación estandar) para este conjunto de elementos permite hacer algunas reflexiones de interés:

- El Ba y Mn son elementos litófilos muy vinculados a los procesos de mineralogénesis que originaron el depósito Loma Hierro, lo cual resulta evidente debido a su tendencia a concentrarse en los suelos de categoría II de este sector. Las concentraciones inferiores de estos metales en los suelos del sector Mina Francisco-Loma Roja y su tendencia dentro de estos a preferir los de categoría IV permiten considerar que no existe vínculo alguno entre ellos y los procesos de mineralogénesis que ocurrieron en esta región.
- El Al, Cr, Sc y V^{3+} constituyen un conjunto de elementos muy asociados paragenéticamente en la roca madre, en las zonas de alteración hidrotermal y en los productos hidrolizados resultantes de la descomposición de los minerales que los contienen bajo la acción de los agentes hipergénicos. Una prueba de esto lo constituye su concentración preferencial en los suelos de categoría I de ambos sectores, pero con un predominio bien definido para el depósito Loma Hierro. En general, esto pudiera explicarse por la existencia de una intensa caolinitización circunscripta a los alrededores de las zonas minerales, teniendo su máxima expresión en los suelos intensamente oxidados del depósito Loma Hierro.
- En el caso del Fe está claro su papel en la coloración de los suelos debido a la formación de óxidos e

hidróxidos durante la meteorización química de los sulfuros de hierro (pirita, pirrotina, calcopirita, etc.) existentes en estos depósitos. Esto explica que los suelos de color rojo intenso (categoría I) sean los que presenten las mayores concentraciones de este metal, convirtiéndose así en un elemento indicador por excelencia de las zonas de oxidación de los depósitos sulfurosos. Por ello, queda clara su asociación a los suelos de categoría I de ambos sectores, pero con concentraciones superiores en el área del depósito Loma Hierro debido a la mayor exposición de las menas sulfurosas primarias a las condiciones hipergénicas.

- El K y Mg no muestran diferencias significativas en su distribución espacial, pero manifiestan alguna preferencia por los suelos de categoría IV, lo cual pudiera ser un índice de su exclusión de las zonas mineralizadas.

- El Ni y Co están vinculados con el Mg, mientras que parece existir también asociación paragenética entre el Sr y el K. Ambas situaciones pueden ser explicadas por la ocurrencia de sustituciones isomórficas entre los iones de estos elementos.

- El V^{5+} y P parecen jugar un papel definido durante la formación de minerales secundarios de Pb durante la meteorización, atendiendo a su concentración superior en los suelos de categoría I de ambos sectores.

- El Cu, As, Bi, Pb, Zn, Sb y Ag son elementos calcófilos y, por consiguiente, muy propensos a encontrarse asociados a la mineralización sulfurosa. Ello se confirma al concentrarse en los suelos de categoría I de ambos sectores, pero con algunas diferencias en su distribución que son aclaradas a continuación. De todos estos elementos, el Cu es el que presenta concentraciones similares en uno y otro sector, aspecto este que puede estar determinado por la lixiviación superior de este metal en las zonas de oxidación. El As es más típico para los suelos del sector Mina Francisco-Loma Roja, relacionándose así con el tipo de mineralización que se desarrolla allí. El comportamiento del Bi lo hace exclusivo de la zona más intensamente oxidada del sector Mina Francisco-Loma Roja. El Pb y Zn son preferentes en los suelos del depósito Loma Hierro. En tanto, la Ag y Sb caracterizan con determinado grado de exclusividad los suelos más oxidados de este propio depósito. Esto los identifica con los procesos que contribuyeron a la descomposición química de la mineralización sulfurosa primaria y a su retención por el componente arcilloso del suelo según su grado de oxidación, confirmándose así como elementos indicadores de la mineralización para la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro, pudiendo establecerse las distinciones siguientes: Cu, As y Bi (mineralización cuprífera del sector Mina Francisco-Loma Roja); Pb, Zn, Sb y Ag (mineralización polimetálica del depósito Loma Hierro).

4.3.3- Mapas geoquímicos monoelementales.

Para la construcción de los mapas geoquímicos monoelementales se requiere determinar previamente el

fondo geoquímico (Cf) y los umbrales de contenidos anómalos (Ca_1 , Ca_2 , Ca_3) de los principales elementos indicadores de la mineralización (Cu, As, Bi, Pb, Zn, Ba, Ag, Sb) en los suelos de la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.

La determinación del fondo geoquímico y los umbrales de contenidos anómalos de Cu, As, Pb, Zn y Ba se fundamentó en los parámetros estadísticos estimados para los valores logaritmizados (Tabla 4.2), aplicando las expresiones siguientes:

$$Cf = \text{antilog}(\mu_{\log})$$

$$\varepsilon = \text{antilog}(\sigma_{\log})$$

$$Ca_1 = Cf \cdot \varepsilon^3$$

$$Ca_2 = Cf \cdot \varepsilon^4$$

$$Ca_3 = Cf \cdot \varepsilon^5$$

La determinación de estos parámetros para Ag, Bi y Sb se realizó según la distribución de sus concentraciones, debido a que los resultados analíticos tuvieron afectaciones a causa de los límites de detección del método utilizado.

Tabla 4.6- Fondo geoquímico y umbrales de contenidos anómalos para los principales elementos indicadores de la mineralización.

Elemento	Cf (ppm)	Ca₁ (ppm)	Ca₂ (ppm)	Ca₃ (ppm)
Cu	18	100	180	300
As	4	70	200	500
Bi	1.5	6	15	40
Pb	30	290	600	1260
Zn	45	265	470	850
Ba	50	68	86	106
Ag	0.15	1.5	4	10
Sb	1.5	6	15	40

De hecho, estos umbrales de contenidos anómalos están dirigidos a resaltar las zonas anómalas más intensas y no a realizar una delimitación exacta de las aureolas de dispersión secundarias, por lo cual se tiende a reducir el límite exterior de las anomalía geoquímicas.

El análisis de los mapas geoquímicos obtenidos (Figs. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13) permite

considerar que:

- Las anomalías geoquímicas de Ag, Ba, Sb y Zn son prácticamente exclusivas del depósito Loma Hierro, reflejándose en sus características morfológicas e intensidades los principales parámetros de los cuerpos minerales que las generan.
- Las anomalías geoquímicas de Bi se presentan únicamente en la manifestación Loma Roja con un alargamiento bien definido en dirección sureste-noroeste.
- Existen anomalías de As, Cu y Pb asociadas al sector Mina Francisco-Loma Roja y depósito Loma Hierro, pero su desarrollo espacial e intensidades son desiguales en ambas zonas; las anomalías geoquímicas de Cu y As son preferentes de la manifestación Loma Roja, mientras que las anomalías de Pb resultan de mayor interés en relación con el depósito Loma Hierro.
- Resultan interesantes las anomalías de As y Cu vinculadas con la zonas más erosionadas del depósito Loma Hierro, lo que puede resultar el reflejo de lo que fue este depósito mineral antes de que lo afectaran los eventos tectónicos y su posible vínculo genético con una mineralización cuprífera de stockwork subyacente (actualmente situada al suroeste). De hecho, se presenta una zonación geoquímica vertical expresada en el hecho de que las anomalías de As se reflejan con preferencia en aquellas partes menos afectadas por los procesos erosivos, como una expresión de la mayor capacidad de migración de este elementos durante los procesos hidrotermales.
- Las anomalías de As, Cu y Bi en la manifestación Loma Roja expresan en sus características morfológicas su asociación con cuerpos minerales alargados (stockwork cuarzo-sulfuroso). Sus dimensiones desiguales son indicadoras de la existencia de una migración diferenciada de estos elementos durante los procesos hidrotermales (mayor capacidad de migración para el As), sin considerar la afectación que estos tienen durante los procesos hipergénicos (migración poco favorable para el Bi y As, los cuales quedan retenidos en la zona de oxidación).
- La presencia de anomalías débiles de As y Pb en el extremo noroeste del área investigada pudiera indicar la existencia de una zona mineral semejante pero con yacencia más profunda que la manifestación Loma Roja.
- Las anomalías de Ag, Pb y Ba asociadas a mineralización polimetálica estratiforme no se revelan en los suelos cuando la profundidad de yacencia de la zona mineral supera los 25-30 m. En el caso del Ba también existe una influencia del grado de baritización desigual que acompaña a este tipo de depósito mineral en sus diferentes partes.

- Existe una coincidencia espacial estrecha entre las zonas de suelos oxidados y las anomalías geoquímicas de Cu, As, Bi, Pb, Zn, Ag y Sb, con diferencias ya señaladas al comparar los suelos del depósito Loma Hierro y los del sector Mina Francisco-Loma Roja.

4.3.4- Procesamiento estadístico multivariado.

Primeramente fueron determinados los coeficientes de correlación según las diferentes categorías de suelos en el depósito Loma Hierro y en el sector Mina Francisco-Loma Roja (Tablas 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14).

Las matrices de correlación fueron utilizadas para establecer la intensidad del enlace entre los elementos utilizando dendrogramas resultantes del análisis de clusters por distancias euclidianas (Figs. 4.14a, 4.14b, 4.14c, 4.14d, 4.15a, 4.15b, 4.15c, 4.15d).

Las estructuras de los dendrogramas para las diferentes categorías de suelos del depósito Loma Hierro y del sector Mina Francisco-Loma Roja son completamente diferentes, expresando vínculos muy desiguales para los elementos. Sin embargo, dentro de esta complejidad es posible apreciar algunas regularidades que merecen ser analizadas pues confirman y esclarecen algunas observaciones anteriores:

- La agrupación V-Cr-Al-Sc para los suelos del depósito Loma Hierro expresan un vínculo directo con la hidrólisis de los minerales aluminicos, pudiendo asegurarse “a priori” que el V^{3+} es la forma fundamental de existencia de este metal, reduciéndose su papel de elemento indicador de la mineralización. Es decir, su presencia en los suelos oxidados se debe a la asociación del V^{3+} con los minerales arcillosos (caolinita) y no a su combinación con el Pb como V^{5+}

- Para los suelos de categoría I y II se manifiestan diferentes agrupaciones: Mg-Ni-Co, V-Cr-Al y Pb-P-Sb-Fe-As que aparecen habitualmente en diferentes ramas dentro del dendrograma (Figs. 4.14a y 4.14b), lo cual es característico para los suelos del depósito Loma Hierro; mientras tanto las asociaciones Ni-Mg-K, V-Fe-Cr y Pb-Cu-Sb-As-Bi (Figs. 4.15a y 4.15b) para los suelos del sector Mina Francisco-Loma Hierro. En ambos casos se demuestra que las dos primeras asociaciones responden a la composición química de las rocas originales y la tercera asociación es representativa de las características de la mineralización relacionada con las zonas de oxidación.

b) Análisis de factores.

El análisis de factores se ejecutó por separado para los suelos del depósito Loma Hierro y del sector Mina Francisco-Loma Roja, lo cual permitió realizar una caracterización más detallada de los enlaces existentes entre diferentes elementos en cada zona y poder compararlas entre sí. En total fueron considerados 3 factores y 20 elementos durante este procesamiento (Tabla 4.15), estableciendo las relaciones entre factores para definir sus contrastes (Figs. 4.16, 4.17, 4.18, 4.19).

Una interpretación de estos resultados conduce a estimar que no existen grandes diferencias en las relaciones existentes entre las concentraciones de diferentes elementos en los suelos del depósito Loma Hierro y en el sector Mina Francisco-Loma Roja.

En general, se detecta que el factor 1 controla el comportamiento de los elementos indicadores de la mineralización (directos e indirectos), el factor 2 controla preferentemente a los elementos asociados paragenéticamente en la roca madre y el factor 3 no tiene un significado claro.

Depósito Loma Hierro.

Factor 1. En los suelos del depósito Loma Hierro este factor tiene una expresión compleja de 3 asociaciones paragenéticas de elementos: Fe-Ag-Pb-Sb-Zn (integrantes de la mineralización sulfurada primaria, representada por pirita, acantita, galena, antimonita y esfalerita); As-P (constituyentes de sales oxigenadas de Pb y Fe de origen exógeno, tales como vivianita, plumbogummita); y Al-V como parte de los elementos hidrolizados (constituyentes de minerales arcillosos, fundamentalmente caolinita).

Factor 2. Permite explicar la existencia de dos series isomórficas: Mg-Ni-Co-Mn y K-Sr, ambas vinculadas con la composición química de la roca original.

El contraste entre los factores 1 y 2 permite separar dos conjuntos: elementos indicadores de la mineralización (Fe, Sb, V, As, Pb) y elementos asociados a las rocas originales (Ni, Mg, Co, K, Sr, Mn) (Fig. 4.16).

El contraste entre los factores 1 y 3 supone la decantación del Al, Cr, Sc y V, asociados paragenéticamente en los suelos a consecuencia de la hidrólisis que experimentan los minerales primarios que los contienen (Fig. 4.17).

Una conclusión importante que se deriva de este análisis es que el vanadio participa activamente en dos procesos de formación de minerales de origen hipergénico: se combina con el Pb para formar vanadinita como V^{5+} (muy común en las zonas de oxidación de los depósitos de Pb) y participa en reacciones de

hidrólisis como V^{3+} (acompañando al Al^{3+} , Cr^{3+} y Sc^{3+}), aunque este último parece ser el dominante.

Sector Mina Francisco-Loma Roja.

Factor 1. Permite comprobar que los suelos de esta zona existe un vínculo estrecho entre Fe-V-Cr (componentes hidrolizados) y Cu-As-Pb-Bi (constituyentes de la mineralización primaria sulfurosa, alterados durante los procesos hipergénicos).

Factor 2. En este se comprueba la existencia de 2 series isomórficas: Mg-Ni-Co-Mn y K-Ba.

El contraste entre los factores 1 y 2 permite separar dos conjuntos de elementos: elementos indicadores de la mineralización (As, Cu, Pb, Bi) y elementos hidrolizados (Fe, V, Cr), y elementos integrados a las rocas originales (Ni, Co, Ba, Mg, K, Mn) (Fig. 4.18).

El contraste entre los factores 1 y 3 esclarece la separación entre elementos indicadores de la mineralización (Cu, As, Pb, Bi) y el papel que juegan los elementos hidrolizados (Fe, V, Cr, Sc, Al) por su afinidad hacia la componente arcillosa resultante de la meteorización (Fig. 4.19).

c) Análisis de regresión múltiple.

La selección de las variables para la realización del análisis de regresión múltiple estuvo influenciada por la contribución de los factores determinados durante la aplicación del método de las componentes principales, en especial para aquellos elementos indicadores de algún tipo de mineralización. De esta manera, fueron establecidas las relaciones As-Pb-V, As-P-V y Sb-Pb-Zn (depósito Loma Hierro), As-Cu-Pb (sector Mina Francisco-Loma Roja) y Au-Bi (zona anómala asociada a la manifestación Loma Roja); otras combinaciones no resultaron de interés u ofrecieron resultados que no estaban acordes con el nivel de significación establecido por la prueba t de Student.

Los resultados obtenidos (Tabla 4.16) permiten considerar el cumplimiento de las ecuaciones de regresión siguientes con un nivel de significación del 95%:

$$As = 0.0450 * Pb + 1.7709 * V - 21.4116 \quad (\text{depósito Loma Hierro})$$

$$As = 0.1221 * P + 1.9374 * V - 39.4476 \quad (\text{depósito Loma Hierro})$$

$$Sb = 0.0023 * Pb + 0.0347 * Zn - 0.8500 \quad (\text{depósito Loma Hierro})$$

$$\text{As} = 0.6658 * \text{Cu} + 0.2635 * \text{Pb} - 22.5276 \quad (\text{sector Mina Francisco-Loma Roja})$$

$$\text{Au} = 3.5447 * \text{Bi} + 9.4320 \quad (\text{manifestación Loma Roja})$$

Los diagramas de dispersión para 3 elementos (Figs. 4.20a, 4.20b, 4.20c, 4.20d) y el diagrama de dispersión y ajuste de ecuación de regresión lineal para 2 elementos (Fig. 4.21) permiten visualizar estas relaciones.

Resulta significativo que mediante el análisis de regresión se ha demostrado que el Au está relacionado preferentemente con el Bi y no con el As, como hasta ahora se había pensado. Esto le confiere a las anomalías de Bi un papel importante como índice para la comprobación de la potencialidad aurífera.

4.3.5- Mapas geoquímicos complejos.

De acuerdo con toda la información precedente acerca de los elementos indicadores de la mineralización fueron seleccionadas tres variantes de asociaciones de éstos para la construcción de los mapas geoquímicos complejos mediante el Análisis de Componentes Principales: Cu-As-Bi, Pb-Zn-Ba-Ag-Sb, Cu-As-Bi-Pb-Zn-Ba-Ag-Sb.

Al analizar los resultados de este procesamiento (Tablas 4.17, 4.18, 4.19) se consideró que la Primera y Segunda Componentes Principales resultan suficientes para la interpretación de este sistema multivariado, quedando contenidas en ellas la información más útil. Esto determinó la construcción de los mapas geoquímicos complejos correspondientes (Figs. 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27).

□ **Asociación Cu-As-Bi.**

La Primera Componente es indicativa de la asociación paragenética entre estos elementos con un predominio para el Cu y As. En el caso de la Segunda Componente se puede analizar el efecto conjunto del As y Bi, aunque con un aporte mucho más significativo del primero; no obstante, esta puede resultar de interés por la relación de estos elementos con el Au (Tabla 4.17).

En los mapas geoquímicos complejos es posible apreciar la existencia de una zona con un desarrollo notable de estas anomalías geoquímicas en Loma Roja, aunque con algunas diferencias al compararlos entre sí.

El mapa geoquímico complejo de la Primera Componente (Fig. 4.22) confirma la influencia del Cu en la morfología y desarrollo espacial de esta anomalía, prolongándose en la dirección de las pendientes a

consecuencia de la migración acuosa de este elemento en condiciones hipergénicas. El máximo anómalo observado en el perfil P+450E resulta interesante para la prospección, lo cual debe ser correlacionado con la información geológica y geofísica para proyectar la perforación en esta zona.

Al analizar el mapa geoquímico de la Segunda Componente (Fig 4.23) se destaca en la propia región una tendencia a la intensificación de la zona anómala pero acompañada de una disminución notable de sus dimensiones. Ello se corresponde con el comportamiento geoquímico del As y Bi más estables que el Cu en condiciones hipergénicas; los máximos anómalos confirman la potencialidad aurífera de esta zona, separando 3 pequeños sectores con alineación noroeste-sureste que deben ser objeto de evaluación inmediata.

En ambos mapas geoquímicos se aprecia un mayor contraste de las anomalías complejas en el sector Mina Francisco-Loma Roja, lo que está en concordancia con la mineralización cuprífera que yace en profundidad.

□ **Asociación Pb-Zn-Ba-Ag-Sb.**

La Primera Componente corrobora la asociación paragenética de estos elementos para indicar la mineralización polimetálica con una contribución significativa del Ba, Zn y Sb. La Segunda Componente representa un filtro para el Ba, una influencia poco significativa de la Ag y el efecto moderado del Pb, Zn y Sb. Las restantes componentes no aportan información adicional que pueda ser utilizada (Tabla 4.18).

En los mapas geoquímicos complejos se verifica lo anteriormente expuesto, revelándose diferentes zonas anómalas. Todas ellas están localizadas en el área que ocupa el depósito Loma Hierro, por lo que permite caracterizar a la mineralización polimetálica. El mapa geoquímico complejo de la Primera Componente (Fig. 4.24) expresa la amplia zona anómala vinculada con este tipo de mineralización o con los productos de su descomposición, excluyéndose la revelación de la mineralización que yace a más de 25 m de profundidad. La visión que ofrece el mapa geoquímico complejo de la Segunda Componente (Fig. 4.25) es menos afortunada para la caracterización integral de la mineralización polimetálica pero permite discriminar el Ba y Ag, observándose solamente la acción conjunta del Pb, Zn y Sb, con aportes más o menos semejantes a esta componente.

□ **Asociación Pb-Zn-Ba-Ag-Sb-Cu-As-Bi.**

Se puede verificar una diferenciación clara entre los resultados de la Primera y Segunda Componentes, lo cual está conforme con lo explicado anteriormente. Sin embargo, la Primera Componente tiene una contribución de varios elementos, por lo que no se puede discriminar totalmente la señal de la mineralización polimetálica. Con la Segunda Componente se hace posible separar los índices de

mineralización cuprífera, filtrando al Ba y Ag; ello permite interpretar un aporte considerable del As y Cu y moderado del Bi, Pb y Sb a esta componente (Tabla 4.19).

El mapa geoquímico complejo de la Primera Componente (Fig. 4.26) representa el aporte de Ba, Zn, Sb, Pb, Ag y Cu, fundamentalmente, lo cual hace extraordinariamente complicada su interpretación. Sin embargo, de modo general se puede emplear como un índice válido para la localización de mineralización polimetálica.

Sobre el mapa geoquímico complejo de la Segunda Componente (Fig. 4.27) influyen principalmente el Cu, As y Bi, contorneando las zonas más propicias para descubrir mineralización cuprífera.

4.4- Resultados de las investigaciones litogeoquímicas. Manifestación Oro Cándida.

Las investigaciones geoquímicas en la manifestación Oro Cándida estuvieron dirigidas a verificar la distribución espacial de las anomalías litogeoquímicas y su relación con la mineralización piritó-arsenopirítica-cuprífera con oro acompañante. El área seleccionada con esta finalidad está incluida dentro de los límites indicados seguidamente por las coordenadas Lambert (sistema Cuba Norte):

	X	Y
I	186 000	292 800
II	186 000	295 500
III	188 500	292 800
IV	188 500	295 500

Como base para el procesamiento gráfico posterior de la información geoquímica se elaboró previamente el mapa de ubicación de las muestras litogeoquímicas (Fig. 4.28).

4.4.1- Distribución espacial de las zonas de oxidación.

La distribución espacial de las zonas de oxidación se realizó sobre la base de la representación gráfica de estas en el mapa topográfico, interpolando los resultados derivados del mapeo geológico de las rocas de la región. En este proceder se tuvieron en cuenta las regularidades geomorfológicas, la continuidad lógica de determinadas zonas y su posible interrupción debido a la existencia de algún rasgo tectónico mapeado. La presentación final se realizó mediante la digitalización de los rasgos topográficos y zonas de oxidación en AutoCAD (versión 14)(Fig. 4.29).

4.4.2- Procesamiento estadístico elemental de los datos geoquímicos.

Con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados analíticos del muestreo litogeoquímico y su correspondencia con las características principales de la zona mineral infrayacente, resultó necesario la preparación de toda la información básica y su procesamiento estadístico haciendo uso de los sistemas MICROSOFT EXCEL (versión 5.0) y STATISTICA FOR WINDOWS (versión 4.0).

El procesamiento estadístico preliminar de los principales elementos meníferos y acompañantes de la mineralización (As, Ba, Cu, Co, Pb y Zn), de los elementos mayores constituyentes de las rocas sedimentarias (Al, Fe, K) y de los elementos minoritarios (Co, Cr, Ni, Sc, Sr, V) resultó la premisa necesaria para el análisis estadístico multivariado, el procesamiento gráfico y la interpretación de los resultados.

a) Determinación de los parámetros estadísticos fundamentales para zonas no anómalas.

Con este objetivo se seleccionaron 134 muestras de zonas no anómalas de la manifestación Oro Cándida.

El procesamiento gráfico consistió en la construcción de histogramas de distribución y gráficos de probabilidad normal (logaritmizados o normales) de los elementos en las rocas de la manifestación Oro Cándida (Figs. 4.30a, 4.30b, 4.30c, 4.30d, 4.30e, 4.30f, 4.30g, 4.30h, 4.30i, 4.30j, 4.30k, 4.30l, 4.30m, 4.30n, 4.30o). Las variaciones no significativas de las concentraciones de Au, Ag y Bi impidieron la aplicación de los métodos estadísticos a estos elementos, motivado por límites de detección y precisiones insuficientes del método analítico empleado.

El procesamiento analítico incluyó la estimación de la media (μ) y desviación estandar (σ) (normal y logaritmizada) para las concentraciones de los diferentes elementos indicados (Tablas 4.20 y 4.21).

b) Distribución de los elementos en las rocas.

Un análisis de la distribución de los elementos en las diferentes clases obtenidas a partir de la asignación de categorías constituye una premisa importante para realizar una caracterización litogeoquímica de la región. Esto se basó en la determinación de los parámetros estadísticos fundamentales (media, desviación estandar) para cada categoría de roca (Tabla 4.22).

Resulta evidente que los elementos indicadores de la mineralización sean Cu, As, Bi, Au, Pb, Zn y Ag, dada su tendencia a concentrarse en las rocas de categoría I.

4.4.3- Mapas geoquímicos monoelementales.

En primer término fue necesario estimar el fondo geoquímico (Cf) y los umbrales de contenidos anómalos (Ca₁, Ca₂, Ca₃) para los diferentes elementos indicadores de la mineralización (Cu, As, Bi, Au, Pb, Zn, Ag) en las rocas de la manifestación Oro Cándida.

La determinación del fondo geoquímico y los umbrales de contenidos anómalos de Cu, As, Pb y Zn se fundamentó en los parámetros estadísticos estimados para los valores logaritmizados (Tabla 4.24), aplicando las expresiones siguientes:

$$Cf = \text{antilog}(\mu_{\log})$$

$$\varepsilon = \text{antilog}(\sigma_{\log})$$

$$Ca_1 = Cf \cdot \varepsilon^2 \qquad Ca_2 = Cf \cdot \varepsilon^3 \qquad Ca_3 = Cf \cdot \varepsilon^4$$

La determinación de estos parámetros para Au, Ag y Bi se realizó según la distribución de sus concentraciones, debido a los límites de detección y precisión del método analítico empleado conducían a incertidumbres en el procesamiento estadístico.

Tabla 4.23 - Fondo geoquímico y umbrales de contenidos anómalos para los principales elementos indicadores de la mineralización.

Elemento	Cf (ppm)	Ca ₁ (ppm)	Ca ₂ (ppm)	Ca ₃ (ppm)
Cu	24	160	400	1150
As	11	100	300	900
Bi	1.5	6	15	40
Au (ppb)	5	20	50	120
Pb	14	85	210	520
Zn	62	260	530	1100
Ag	0.2	1.5	4	10

A partir del análisis de los mapas geoquímicos monoelementales obtenidos (Figs. 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37) es posible hacer algunas reflexiones:

- Las anomalías geoquímicas coinciden por lo general con las zonas de oxidación pero son más restringidas en su extensión areal. Generalmente se presentan en forma de franjas alargadas y estrechas extendidas en dirección sureste-noroeste, alcanzando ensanchamientos máximos hacia el extremo noroeste del sector.
- Las anomalías de Pb no presentan coincidencias extraordinarias con anomalías geoquímicas de otros elementos, aunque están muy distribuidas en todo el sector. Estas no deben responder a una mineralización independiente a la descrita para la manifestación Oro Cándida sino a zonas anómalas periféricas y erosionadas.
- Las anomalías de Zn están poco distribuidas presentando unos pocos centros anómalos de interés. Pudiera asegurarse que la información que brindan es muy limitada y, por consiguiente, no deben ser tomadas en cuenta independientemente, sino en su relación con las anomalías de Pb.
- Las anomalías de Cu, As, Au y Bi coinciden espacialmente aunque sus dimensiones difieren. Las más extensas son las de Cu, abarcando aproximadamente el 40% del área investigada; las anomalías de As tienen un carácter algo más restringido pero con una extensión superficial aún considerable; le siguen las anomalías de Au; y por último las anomalías de Bi.
- La coincidencia de anomalías de altas intensidades de Au, As, Bi, Pb y Ag en el extremo noroeste del sector parece indicar una posición del corte de erosión muy próximo o coincidente con los cuerpos minerales. En específico, el Bi, As y Au ocupan una posición en la fila de zonalidad de los depósitos hidrotermales cercana a las zonas de stock-work cuarzo-sulfurosas, constituyéndose así sus anomalías superficiales en indicadores por excelencia de la ubicación de los cuerpos minerales a poca profundidad. Estas características le confieren a esta zona de oxidación un interés bien marcado para la ejecución de trabajos de perforación.

4.4.4- Procesamiento estadístico multivariado.

La metodología seguida para el procesamiento estadístico multivariado es semejante a la utilizada en el epígrafe anterior.

a) Análisis de clusters.

Siguiendo el mismo principio expresado para el procesamiento de las muestras de suelo en la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro, pero mediante la normalización previa de las concentraciones de elementos para las muestras litogeoquímicas recolectadas se puede obtener un dendrograma en el que se

visualizan las agrupaciones principales de elementos (Fig. 4.38).

Mediante el análisis de este dendrograma se ha podido determinar la existencia de varias ramas principales. En una de ellas se agrupan los elementos indicadores de la mineralización (Cu, As, Bi, Au, Pb, Zn, Ag) con una jerarquía que pudiera ser indicada como sigue: (Cu-Ag)-As-Bi-Au y (Pb-Zn). También se aprecian enlaces relativamente fuertes en otra rama, consistente en la agrupación de varios elementos vinculados con la roca primaria (Fe, V, Sc, Mn, Ni, Mg, Al), representados según el siguiente orden jerárquico: (Fe-V-Sc)-(Mg-Ni)-Al-Mn.

Esto confirma nuevamente que mediante esta técnica de clasificación jerárquica es posible establecer la fuente original de los elementos y sus relaciones genéticas.

b) Análisis de factores.

Este procedimiento sirve para ratificar la apreciación expuesta anteriormente, consolidando los criterios acerca del efecto ponderado de cada elemento para los diferentes factores y la tendencia a su agrupación (Tabla 4.24).

Factor 1. Incluye la asociación de los elementos indicadores de la mineralización que, dado el conocimiento de las afinidades geoquímicas entre elementos posibilita la separación en tres grupos: uno integrado por Cu, Bi, As, Au (indicadores de mineralización arsenopirítica-cuprífera con oro acompañante), otro que incluye Pb, Zn, Ag (indicadores de mineralización polimetálica) y un último constituido por Fe, Sc, V (asociados entre sí en los productos oxidados de estos tipos de mineralización).

Factor 2. Permite explicar la asociación de elementos litófilos agrupados en dos clases: una primera clase representada por K, Al, Ba (integrantes de los feldespatos) y otra integrada por Mg, Mn, Ni (asociación de elementos vinculados con alteraciones hidrotermales, tales como la cloritización).

Factor 3. Considera la posibilidad de asociación entre Al y V, representativos de compuestos hidrolizados durante los procesos hipergénicos.

El contraste entre los factores 1 y 2 separa claramente 2 campos: elementos indicadores de la mineralización (Au, Ag, As, Bi, Cu, Fe, V, Sc, Zn) y elementos litófilos (K, Ba, Ni, Mg) (Fig. 4.39).

El contraste entre los factores 1 y 3 permite una diferenciación más estricta de los elementos según el papel fundamental que juegan en las rocas: elementos indicadores de la mineralización (Au, Pb, Zn, Bi, Ag, As, Cu), elementos fácilmente hidrolizables (Fe, V, Al, Sc) y elementos litófilos (K, Ba, Sr, Ni, Mg)

(Fig. 4.40).

c) Análisis de regresión múltiple.

Dadas las incongruencias en el comportamiento correlacionable de los elementos indicadores de la mineralización para todas las muestras de rocas, se prefirió seleccionar un conjunto muestral que cumpliera con la condición esencial de que las concentraciones de Au fueran anómalas (superior a 15 ppb). En total fueron incluidas 60 muestras que correspondieron a zonas donde se manifestaban alteraciones hidrotermales y/o vestigios de oxidación (Tabla 4.25).

Los resultados obtenidos (Tabla 4.26) permiten considerar el cumplimiento de las ecuaciones de regresión siguientes con un nivel de significación del 95%:

$$As = 0.1791 * Au + 42.8917$$

$$As = 1.1634 * Cu + 752.2761$$

$$As = 0.8567 * Cu + 1.1121 * Au + 672.7655$$

Los diagramas de dispersión y ajuste de ecuación de regresión lineal para 2 elementos (Figs. 4.41a, 4.41b) y el diagrama de dispersión para 3 elementos (Fig. 4.41c) permiten visualizar estas relaciones.

4.4.5- Mapas geoquímicos complejos.

Dada la efectividad demostrada por el Análisis de Componentes Principales para la evaluación compleja de las anomalías geoquímicas se prefirió utilizar este procedimiento para la construcción de los mapas geoquímicos complejos en la manifestación Oro Cándida, siguiendo un procedimiento semejante al indicado durante el procesamiento de los datos geoquímicos de suelos en la estructura metalífera Francisco-Loma Hierro.

Fueron obtenidos los resultados de las Componentes Principales para las asociaciones Cu-As-Au-Bi (Tabla 4.26) y Cu-As-Au-Bi-Pb-Zn-Ag (Tabla 4.27).

El análisis de estas tablas conllevó a la construcción de los mapas geoquímicos complejos de la Primera, Segunda y Tercera Componentes para cada asociación, por resultar estas las más informativas y reflejar las características fundamentales de la mineralización.

· **Asociación Cu-As-Bi-Au.**

La interpretación de la Primera Componente indica una relación fuerte entre estos elementos, por lo que el aporte al análisis complejo es integral para estas variables. La Segunda Componente sólo es informativa para el Bi, siendo filtrado totalmente el Cu. La Tercera Componente sólo se favorece del aporte hecho por el As, mientras los restantes elementos son discriminados (Tabla 4.27).

Los mapas geoquímicos complejos de la Primera, Segunda y Tercera Componentes Principales son fiel reflejo de estas apreciaciones:

- El mapa geoquímico complejo de la Primera Componente representa una amplia zona anómala perspectiva para la localización de mineralización arsenopirítica-cuprífera con oro acompañante, coincidiendo sus centros de máxima intensidad con zonas de una erosión intensa (asociadas a afloramientos en ríos y arroyos). Llama la atención que el desarrollo de estas zonas anómalas se manifiesta siguiendo el rumbo de las elevaciones, coincidiendo con sus laderas y con los escarpes pronunciados en los arroyos (Fig. 4.42).
- El mapa geoquímico complejo de la Segunda Componente es más específico en la distribución espacial de la zona anómala, vinculada con el extremo norte del área de estudio y con afloramientos de rocas en las cercanías de los arroyos (Fig. 4.43).
- Para el mapa geoquímico complejo de la Tercera Componente se aprecia que la zona anómala está algo desplazada hacia el noreste en relación con la revelada en el mapa anterior, lo cual puede ser expresión de una distribución zonal del As y Bi en la región (Fig. 4.44).

□ **Asociación Cu-As-Bi-Au-Pb-Zn-Ag.**

La Primera Componente indica un aporte de todos estos elementos a su integración, pero con una influencia superior del Cu, As, Bi y Ag; estas peculiaridades impiden la discriminación de determinado elemento en las anomalías geoquímicas. Para la Segunda Componente se verifica el aporte fundamental del Bi y Pb, siendo filtradas las anomalías de Cu, As y Au; esto podría significar una posición del corte de erosión coincidente con la mineralización que origina estas anomalías. En la Tercera Componente se expresa el vínculo entre Pb y Zn, siendo discriminados el Au, Bi y Ag, expresión esta de la existencia de vestigios de una mineralización polimetálica de carácter estratiforme actualmente erosionada.

- El mapa geoquímico complejo de la Primera Componente es muy parecido al de la asociación Cu-As-Bi-Au, lo cual confirma que esta componente permite separar las anomalías geoquímicas relacionadas con la mineralización arsenopirítica-cuprífera con oro acompañante (Fig. 4.45).
- En el mapa geoquímico complejo de la Segunda Componente se refleja el solapamiento de anomalías geoquímicas de Pb y Bi. Los centros anómalos principales coinciden con afloramientos en los arroyos, reflejándose en ellos zonas con un corte de erosión profundo (Fig. 4.46).
- Según el mapa geoquímico complejo de la Tercera Componente se revelan zonas anómalas de Pb-Zn ligeramente desplazadas hacia el norte, aspecto este que constituye una tendencia que indica la posible relación genética de la mineralización de stockwork de Oro Cándida con una mineralización estratiforme de plomo-zinc semejante a la del depósito Loma Hierro (Fig. 4.47).

En general, todas las zonas anómalas se extienden con un rumbo sureste-noroeste, incrementando sus intensidades en esta misma dirección, lo cual deber estar determinado por una erosión más intensa de la zona supramineral que posibilita el afloramiento de zonas enriquecidas en los elementos indicadores de la mineralización.

CAPITULO V- MODELO GEOLOGO-GEOQUIMICO-METALOGENICO.

Para la creación de un modelo geólogo-geoquímico-metalogénico del Distrito Metalogénico Dora-Francisco se impone realizar una generalización que incluya el análisis integral de la información geológica derivada del mapeo geológico superficial, las características topográficas, la relación entre la distribución de los elementos indicadores de la mineralización en los suelos y cuerpos minerales, los estudios mineralógicos y químicos de la mineralización sulfurosa primaria y mineralización oxidada, etc.

5.1- Antecedentes.

Los depósitos y manifestaciones minerales del Distrito Metalogénico Dora-Francisco están ubicados en una secuencia de rocas sedimentarias de origen deltaico, asociadas al desarrollo de un margen continental pasivo.

De acuerdo con la composición químico-mineralógica, sus rasgos texturo-estructurales, el ambiente geológico de formación y su relación espacial con las rocas encajantes, estos pueden ser clasificados como depósitos exhalativo-sedimentarios (SEDEX) (Large, 1981, 1983, 1991) al igual que los depósitos vecinos del Distrito Metalogénico Matahambre-Santa Lucía. Una descripción resumida de este tipo de depósito lo ofrecen Cox y Singer (1986):

Sinónimos: Depósitos de Zn-Pb alojados en pizarras, sulfuros masivos de Zn-Pb alojados en sedimentos.

Descripción: Acumulaciones estratiformes de sulfuros y sulfatos interestratificados con sedimentos marinos euxínicos que forman depósitos laminares, lenticulares o tabulares de algunas decenas de metros de espesor, y que podrían estar distribuidos en un intervalo estratigráfico superior a 1000 m

Ambiente geológico:

- **Tipos de roca:** Rocas sedimentarias marinas euxínicas, que incluyen: pizarras negras, limolitas, areniscas, silicitas, dolomitas, calizas micríticas y turbiditas. Secciones evaporíticas locales en facies de shelf contemporáneas. Rocas volcánicas, comúnmente de composición bimodal, están presentes localmente en la cuenca sedimentaria. Las tufitas son las más comunes. Brechas, conglomerados y depósitos similares, así como cambios de espesor y facies, están comúnmente asociadas con fallas sinsedimentarias.

- **Ambiente deposicional:** Entrantes marinos epicratónicos y cuencas intracratónicas, con pequeñas cuencas restringidas locales (cuencas de segundo y tercer orden).

- **Ubicación tectónica:** Entrantes epicratónicos y cuencas intracratónicas asociadas con zonas de articulación controladas por fallas sinsedimentarias formando grabens. Dentro de estos grabens (cuencas de primer orden), el tectonismo penecontemporáneo vertical forma pequeñas cuencas (cuencas de segundo y tercer orden) y levantamientos asociados. Las pequeñas cuencas de tercer orden (decenas de kilómetros) dentro de las cuencas de segundo orden (10^2 - 10^5 km) son las trampas morfológicas de los sulfuros estratiformes.

- **Tipos de depósitos asociados:** Depósitos de barita estratificados.

Descripción del depósito.

- **Mineralogía:** Pirita, pirrotina, esfalerita, galena, barita y calcopirita, cantidades trazas de marcasita, arsenopirita, bismutina, molibdenita, enargita, millerita, freibergita, cobaltina, casiterita, vallerita y melnikovita.

- **Textura/Estructura:** Finamente cristalina y diseminada, láminas de sulfuros monominerales son típicas. Los ejemplos metamorfoseados son cristalinos gruesos y masivos.

- **Alteración:** Stockwork y sulfuros diseminados y los minerales de alteración (silicificación, turmalización, albitización, cloritización, dolomitización) representan posiblemente la zona alimentadora de estos depósitos comúnmente presentes debajo o adyacente a los depósitos estratiformes. Algunos depósitos no han reportado alteraciones. La celsiana (moscovita de bario) y otros minerales arcillosos podrían estar presentes.

- **Controles meníferos:** Dentro de grandes cuencas controladas por fallas, pequeñas cuencas locales forman las trampas morfológicas que contienen los sulfuros y sulfatos estratiformes. Las fallas son sinsedimentarias y sirven como alimentadoras para los depósitos estratiformes. Facies euxínicas.

- **Meteorización:** La oxidación en superficie pudiera formar grandes sombreros de hierro contenedores de abundantes carbonatos, sulfatos, y silicatos de plomo, zinc y cobre.

- **Indicadores geoquímicos:** La zonación de metal incluye una secuencia lateral de Cu-Pb-Zn-Ba que se extiende hacia afuera de la zona alimentadora; o una secuencia vertical de Cu-Zn-Pb-Ba extendida hacia arriba. Anomalías de NH_3 podrían estar presentes. Pedernales exhalativos interestratificados con sulfuros y sulfatos estratiformes.

5.2- Evaluación preliminar de las condiciones físico-químicas de formación de los depósitos y manifestaciones minerales.

Los principios esgrimidos para desarrollar este estudio se fundamentan en la experiencia mundial sobre las características de varios depósitos de plomo-zinc alojados en sedimentos.

Lydon (1974) sugiere que la transportación y deposición de los elementos están determinadas por el papel que juegan las especies de azufre reducido y de azufre oxidado en la solución mineralizante (salmuera). La asociación mineral dominante (pirita y/o pirrotina, esfalerita y galena), además de la existencia de grandes cantidades de barita vinculadas con muchos de estos depósitos apoyan la idea de que las soluciones mineralizantes estuvieron en un estado reducido previo a la descarga en el depósito de salmuera.

En general, Large (1981, 1983) considera que una evaluación de las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ en los depósitos de Pb-Zn alojados en sedimentos permite determinar las condiciones redox que imperaron durante la deposición mineral. Así, las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ inferiores a 0.70 son indicativas de un ambiente en el que predominaban las especies oxidadas del azufre (SO_4^{2-} , HSO_4^-) sobre las especies reducidas (S^{2-} , HS^- y H_2S) y fO_2 elevado (con un enriquecimiento en plomo, dada la mayor afinidad geoquímica de este elemento por el azufre), mientras que las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ entre 0.70-0.85 significan un ambiente con predominio de las especies reducidas del azufre y fO_2 bajo.

El transporte de metales en las soluciones hidrotermales ocurre en forma de cloro-complejos y bisulfuro-complejos. La plata es transportada como cloro-complejo (Sewar en: Drummond y Ohmoto, 1976) y es depositada en estado metálico o en forma de Ag_2S ; el oro es transportado en el estado +1 como cloro-complejo y bisulfuro-complejo (Casadewall y Ohmoto en: Drummond y Ohmoto, 1976; Seward en: Drummond y Ohmoto, 1976) y es depositado como metal; el cobre es transportado como cloro-complejo (Crerar y Barnes en: Drummond y Ohmoto, 1976) y es depositado como $CuFeS_2$ o Cu_5FeS_4 ; el hierro está en las soluciones como cloro-complejo ferroso (Crerar et al. en: Drummond y Ohmoto, 1976) y su deposición ocurre en forma de sulfuros (FeS_2 , FeS , $CuFeS_2$, Cu_5FeS_4) u óxidos (Fe_3O_4 , Fe_2O_3); el zinc y el plomo son disueltos como cloro-complejos y se depositan como ZnS y PbS .

Large (1981) considera que la deposición menífera ocurre como resultado del enfriamiento brusco de las

soluciones hidrotermales saturadas de metal generadas en reservorios de rocas volcánicas o sedimentarias. Sugiere que dado que el plomo presenta mayor afinidad por el azufre que el zinc, la galena tenderá a concentrarse en grado superior a la esfalerita en la mineralización próxima a la zona de descarga y en aquellos depósitos formados desde depósitos de salmuera en los que el azufre reducido presenta concentraciones limitadas.

La zonación químico-mineralógica de la mineralización sulfurosa para los depósitos SEDEX fue propuesta por Large (1978) (Fig. 5.1). En esta se expresa la distribución espacial de los principales minerales sulfurosos, según el orden aproximado de deposición desde la zona de descarga, formando zonas mineralizadas con estructuras diferentes: stockwork cuarzo-sulfuroso coincidiendo con la abertura de descarga (vetillas entrecruzadas de pirita, calcopirita, arsenopirita) y estratiforme pirito-polimetálico-barítico situada encima de la abertura de descarga y expandida lateralmente (mineralización bandeada y masiva de pirita, galena, esfalerita, barita).

Como resultado del estudio químico-mineralógico de las menas sulfurosas y su emplazamiento en determinadas secuencias litológicas de la Formación San Cayetano se han podido constatar algunos rasgos que posibilitan estimar preliminarmente las condiciones físico-químicas de formación de la mineralización sulfurosa.

En el caso de la manifestación Loma Roja resulta evidente que la mineralización sulfurosa es el resultado de la descarga de soluciones hidrotermales en los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes, en un ambiente reductor con una tendencia al incremento de las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ lo cual se expresa en su composición químico-mineralógica, texturas y estructuras. La formación de este depósito mineral ocurrió próximo a la zona de apertura, lo cual está en correspondencia con las concentraciones de Ag (pozo P-29) no características para la mineralización cuprífera formada en las raíces de los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes (pozo P-29). Las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ de 0.88 indican la existencia de un medio de deposición mineral con exceso de sulfuro en la salmuera original, lo cual dificulta la precipitación de barita y favorece la formación de esfalerita.

Para el depósito Cándida y la manifestación Oro Cándida existen características que permiten considerar sus condiciones físico-químicas de formación semejantes a la manifestación Loma Roja. En primer lugar, el tipo de mineralización y las texturas existentes son característicos de la deposición mineral en los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes, donde predominan los minerales de alta temperatura de formación (calcopirita, arsenopirita, oro). El predominio de la arsenopirita con oro acompañante y las intensas alteraciones hidrotermales reflejadas en las rocas de caja (cuarcificación, cloritización, sericitación) en la manifestación Oro Cándida permiten suponer que este tipo de mineralización se formó en condiciones de temperaturas superiores respecto al depósito Cándida.

El análisis de las características químicas y mineralógicas de la mineralización sulfurosa asociada al depósito argentífero Loma Hierro y el carácter concordante de los cuerpos minerales oxidados en la secuencia sc_1^2 (sc^d) permiten considerar que su formación ocurrió como resultado de la descarga de soluciones hidrotermales en el fondo de una cuenca de sedimentación marina, en un ambiente reductor con una tendencia a la disminución de las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ lo cual se expresa en su composición químico-mineralógica, texturas y estructuras. Este proceso de mineralogénesis coincidió espacial y temporalmente con la deposición de sedimentos. Las relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ de 0.66 de las menas sulfurosas según los resultados del pozo de prospección LH-96-177 son indicativas de un ambiente de deposición mineral con déficit de sulfuro en la salmuera original, lo cual favoreció la formación de galena.

Las anomalías geoquímicas de Pb, Zn, Ba, Ag y Sb son características de este tipo de mineralización, lo cual es aplicable en general para la revelación de todos los cuerpos minerales del depósito Loma Hierro, pero con un contraste superior para los cuerpos minerales L-1 y L-2. Si a esto se añade la presencia de barita, concentraciones de plata excepcionalmente altas (100-3000 g/t) y relaciones de $Zn/(Zn+Pb)$ de 0.66 (fundamentalmente asociadas al cuerpo mineral L-1), pudiera concluirse que esta constituyó una zona alejada de los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes.

También aparecen anomalías de Cu asociadas a los cuerpos minerales L-4 y L-8 (situados en el extremo sur y oeste de este depósito, respectivamente). El mapeo de esta zona permitió localizar afloramientos de mineralización oxidada con vetas de cuarzo y textura brechosa en el cuerpo mineral L-4 y las concentraciones de plata reportadas son relativamente bajas (20-60 g/t). Todo esto permitiría asegurar la proximidad de estos cuerpos minerales a los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes, con características que lo asemejan a las zonas de stockwork localizadas en el yacente de los depósitos SEDEX.

Cualquier reconstrucción del proceso de formación del depósito Loma Hierro ha de tener en cuenta estos criterios geoquímico-metalogénicos, mientras que para caracterizar la evolución geológica será necesario desarrollar una investigación que incluya el estudio de los aspectos tectónicos que determinaron su fracturación y emplazamiento actual.

Existe un vínculo genético directo entre la mineralización de stockwork cuarzo-calcopirítica del depósito Dora alojada en la secuencia sc_2^1 (sc^c) y la mineralización estratiforme de zinc-plomo del depósito Amistad localizada en el contacto entre la secuencia sc_2^1 (sc^c) y la secuencia sc_1^2 (sc^d). Ambos tipos de mineralización se derivaron de la deposición de estos componentes desde una salmuera común, donde existía un exceso de sulfuro. Las concentraciones de plata bajas y relaciones $Zn/(Zn+Pb)$ superiores a 0.80, indican que las condiciones redox existentes durante la formación del depósito Amistad representaban un ambiente con exceso de sulfuro en la salmuera original y con una relación SO_4^{2-}/H_2S relativamente baja.

Existe una correspondencia estrecha entre la composición mineralógica y el ambiente de sedimentación existente durante la deposición mineral en la cuenca marina. Esto se explica con el predominio de la esfalerita y la ubicación de los cuerpos minerales en el contacto entre areniscas y pizarras negras carbono-arcillosas (indicadores de un ambiente reductor) durante el proceso de sedimentación.

5.3- Modelo genético e implicaciones metalogénicas.

El estudio geólogo-geoquímico-mineralógico de los diferentes tipos de menas sulfurosas descubiertas en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco nos permite confirmar la existencia de dos estilos de mineralización con una génesis común:

1- Mineralización estratiforme de $Zn \pm Pb \pm Ag \pm Ba$ alojada en secuencias arcillosas de la Formación San Cayetano (depósito Loma Hierro y depósito Amistad).

2- Mineralización de stockwork de $Cu \pm As \pm Zn \pm Pb \pm Au$ asociada a secuencias arenosas de la Formación San Cayetano (depósito Francisco, manifestación Loma Roja, depósito Cándida, manifestación Oro Cándida, depósito Dora)

Muchas de las características observadas en los depósitos de sulfuros masivos contenidos en rocas sedimentarias, pueden ser explicadas por los eventos que acompañan la descarga de las soluciones hidrotermales mineralizadas y la precipitación subsiguiente de los sulfuros metálicos y la barita en el fondo oceánico, aspecto este que ha sido comprobado en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco nos permite asegurar que:

- Existe un vínculo genético entre los diferentes tipos de mineralización descubiertas, aunque este se encuentra enmascarado notablemente por los eventos tectónicos ocurridos con posterioridad a los procesos metalogénicos.

- La creación de células convectivas, la lixiviación de los metales básicos (Fe, Cu, Pb, Zn), la plata y el bario desde las rocas y la migración de estos metales en forma de cloro-complejos, constituyeron las premisas para la formación de estos depósitos.

- La disminución de temperatura y el contacto con el agua de mar provocó cambios en la composición química de la salmuera expresados a través de la descomposición de los cloro-complejos, la reacción de los metales calcófilos (Fe, Cu, Pb, Zn, Ag) con el azufre para formar diferentes sulfuros (pirita, marcasita, calcopirita, galena, esfalerita, acantita) y sulfosales (estefanita, rickardita), la precipitación de plata nativa y la formación de barita a expensas de la interacción del bario migrante en la solución hidrotermal y del sulfato existente en el agua de mar. Además, esto provocó la ocurrencia de algunas alteraciones

hidrotermales de las rocas de caja, representadas fundamentalmente por la cuarficación y baritización.

- La deposición mineral ocurrió a partir de un proceso metalogénico único de carácter regional, con algunas diferencias en las condiciones físico-químicas locales. De manera resumida se puede señalar que este proceso ocurrió a partir de las vías siguientes:

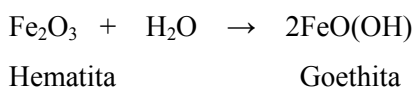
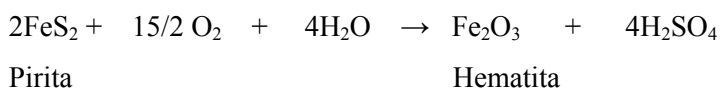
- a) Precipitación en los canales de ascenso de la mineralización pirito-cuprífera y pirito-arsenopirítica con oro acompañante, formando zonas de stockwork cuarzo-sulfurosas en secuencias arenosas, acompañada de alteraciones hidrotermales (cuarficación, sericitación, cloritización) y anomalías geoquímicas (Cu, As, Bi, Pb) en las rocas encajantes.
- b) Precipitación de la mineralización pirito-polimetálica en el fondo del mar, con carácter estratiforme en secuencias arcillo-arenosas y en secuencias arcillosas con material bituminoso (ambiente reductor), con desarrollo simultáneo de alteraciones hidrotermales (cuarficación, baritización, piritización) y anomalías geoquímicas (Pb, Zn, Ag, Ba, Sb, Cu, As).

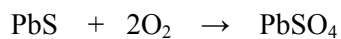
5.4- Transformaciones hipergénicas de la mineralización sulfurosa.

Ya hemos señalado algunos criterios acerca de la posición del corte de erosión respecto a los depósitos y manifestaciones minerales en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco, afirmando que existe una proximidad notable entre ellos en la mayor parte de esta región. Esto conduce a una exposición parcial (ocasionalmente total) de la mineralización sulfurosa a los agentes hipergénicos (agua, dióxido de carbono, oxígeno, etc.) y las consiguientes transformaciones químicas y mineralógicas.

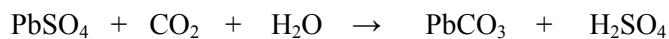
Esto provocó la formación de zonas de oxidación representadas por suelos rojos, sombreros de hierro, rocas hematizadas y limonitizadas, etc., distribuidas principalmente en las estructura metalíferas Francisco-Loma Hierro y Cándida.

En los depósitos estratiformes de $Zn \pm Pb \pm Ag \pm Ba$ (fundamentalmente en el depósito Loma Hierro), los procesos que provocaron estas transformaciones químicas y mineralógicas, se pueden resumir mediante las ecuaciones siguientes:

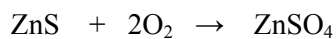




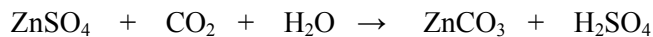
Galena Anglesita



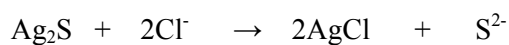
Anglesita Cerusita



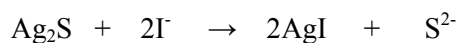
Esfalerita Producto soluble



Smithsonita

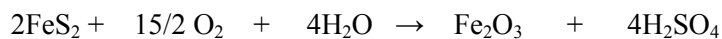


Acantita Querargirita



Acantita Iodargirita

Los depósitos y manifestaciones de Cu±As±Zn±Pb±Au relacionados con zonas de stockwork cuarzo-sulfurosas (manifestación Loma Roja, depósito Cándida, manifestación Oro Cándida y depósito Dora) también han sido afectados por estos procesos, con transformaciones químicas y mineralógicas particulares que se resumen a continuación:



Pirita Hematita



Calcopirita Hematita



Hematita Goethita



Arsenopirita

CONCLUSIONES.

El estudio geoquímico-mineralógico de los depósitos y manifestaciones minerales, las metodologías y procedimientos propuestos para el procesamiento integral de los datos geoquímicos regionales y locales y los criterios geoquímicos obtenidos sobre la base de la interpretación de las anomalías geoquímicas regionales y locales, nos permiten llegar a las conclusiones siguientes:

1- Las investigaciones geoquímicas regionales deben estar anteceditas de la creación de una Base de Conocimientos aportada por un equipo especializado, capaz de valorar integralmente las anomalías geoquímicas en relación con cada tipo de mineralización potencial en el área de estudio.

2- Mediante la utilización de una base de datos litogeoquímicos procedente de trabajos anteriores (levantamiento geológico a escala 1:50 000), se favorecerían los trabajos de reconocimiento y prospección geológica de depósitos minerales en otras regiones. Para el pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa en un ambiente geológico semejante al del Distrito Metalogénico Dora-Francisco (rocas clásticas de la Formación San Cayetano) esta información podría ser procesada con los Sistemas Expertos **CUPR2** y **POLI2** y mediante el Análisis de Componentes Principales, siguiendo las indicaciones metodológicas expresadas en el diagrama de flujo correspondiente (capítulo III).

3- La aplicación conjunta de Sistemas Expertos derivados del sistema RELIS y Análisis de Componentes Principales para el pronóstico geoquímico de mineralización sulfurosa en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco a escala regional (1:50 000) resultó eficaz, lo que queda demostrado en las observaciones siguientes:

- La mayoría de los depósitos y manifestaciones minerales conocidos se reflejan en los mapas patrones para el pronóstico geoquímico de mineralización cuprífera y polimetálica.
- Existe una adecuada correspondencia entre el pronóstico de mineralización sulfurosa basado en datos litogeoquímicos y los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de los sedimentos de fondo.
- Se manifiesta una correlación estrecha entre las secuencias rocosas más favorables para el alojamiento de mineralización sulfurosa y las UIB con categorías prospectivas superiores.

4- Las anomalías litogeoquímicas regionales de Cu, Mo, Co, Pb, Zn, Ba y Ag y las anomalías Cu, As, Bi, Zn, Pb, Ba y Sb en sedimentos de fondo contribuyen favorablemente al pronóstico prospectivo de mineralización sulfurosa en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco.

5- La aplicación sistémica del análisis de cluster (por distancias euclidianas) y el método de los parámetros complejos a la construcción de mapas geoquímicos complejos de sedimentos de fondo surte el efecto

deseado debido a que se logra la agrupación de los elementos según su fuente original (asociación paragenética) y la emisión de una señal única y simplificada que caracteriza al conjunto analizado. Esto garantiza una interpretación menos compleja de la distribución de los elementos indicadores de la mineralización en las anomalías geoquímicas.

6- Las secuencias sc_1^2 (sc^d) y sc_2^1 (sc^c) resultan las más favorables para la proyección de trabajos de prospección en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco, lo que resulta así al apreciar que las UIB con categorías prospectivas superiores están contenidas preferentemente en éstas.

7- El estudio de la zonalidad geoquímica de las aureolas de dispersión primarias a escala regional (escalas 1:50 000 y menores) resulta poco confiable debido a las dimensiones pequeñas de los depósitos minerales que las generan; tampoco resulta factible desarrollar un pronóstico geoquímico de mineralización cuprífera y de mineralización polimetálica por separado, prefiriéndose que este se dirija al descubrimiento de las zonas más perspectivas para mineralización sulfurosa en conjunto.

8- La aplicación de métodos analíticos modernos (ICP-AES, FA-AAS) para la determinación de las concentraciones de diversos elementos posibilita un estudio geoquímico integral de la distribución de los elementos en el objeto geológico que se investigue (rocas, suelos, sedimentos de fondo, etc.), quedando demostrado fehacientemente en nuestra investigación al ser capaces de revelar los caracteres más significativos que distinguen un tipo de mineralización de otra a partir de las anomalías geoquímicas.

9- La metodología propuesta para el procesamiento de los datos geoquímicos durante las investigaciones prospectivas contribuye notablemente a esclarecer los nexos existentes entre los elementos y definir el papel que estos juegan en las anomalías geoquímicas relacionadas con cada tipo de mineralización. Se ha podido demostrar la efectividad de los métodos estadísticos multivariados, lo cual tiene su máxima expresión en:

- El análisis de cluster y el análisis factorial permiten realizar clasificaciones de los elementos que responden a su comportamiento geoquímico en el medio y a la fuente original.
- El análisis de componentes principales aplicado a la construcción de mapas geoquímicos complejos garantiza la revelación de las zonas anómalas más significativas para diferentes asociaciones paragenéticas de elementos, generando credibilidad para acometer trabajos de perforación.
- El análisis de regresión múltiple posibilita establecer los vínculos entre las concentraciones de varios elementos, lo que puede llegar a adquirir carácter económico si las concentraciones de un elemento (determinadas habitualmente por un método analítico costoso) pueden ser estimadas a partir de una ecuación de regresión.

10- Las anomalías de Cu, As, Bi y Pb (en suelos) caracterizan fielmente la mineralización sulfurosa asociada a zonas de stockwork de la manifestación Loma Roja, reflejando su composición químico-mineralógica, sus características morfológicas, la yacencia de los cuerpos minerales asociados y posición del corte de erosión. Esto se argumenta a partir de los rasgos siguientes:

- Las anomalías de Bi están vinculadas con la mineralización aurífera, tal y como se demuestra en el análisis de regresión múltiple, indicando así las zonas más favorables para una concentración significativa de este metal precioso.
- Las anomalías de Cu y As se relacionan con la mineralización cuprífera localizada en los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes.
- Todas las anomalías geoquímicas presentan formas alargadas y estrechas que se extienden con rumbo sureste-noroeste y sólo aparecen en la falda oeste de esta elevación, lo que supone la extensión de la zona mineral en esta dirección e induce a pensar que en esa posición está situada la zona de máxima exposición de la zona mineralizada. Por consiguiente, debe esperarse una yacencia brusca de los cuerpos minerales hacia el noreste.
- La serie de zonalidad geoquímica para las aureolas de dispersión vinculadas con este tipo de mineralización indica Bi-Cu-As-Pb según la dirección en que se infiltraron las soluciones mineralizantes. Así podría asegurarse que si las anomalías de Bi alcanzan sus intensidades máximas en la pendiente oeste muy próxima a la cota máxima, esto indica una profundización del corte de erosión en la dirección en que se incrementa la altura.

11- Las anomalías de Pb, Zn, Ba, Sb, As y Cu son representativas de la mineralización sulfurosa estratiforme que originalmente constituyó el depósito Loma Hierro, caracterizando su composición químico-mineralógica, la morfología y yacencia de los cuerpos minerales, la posición del corte de erosión y algunos rasgos de zonalidad geoquímica. Esto se expresa en:

- La forma isométrica y extensión areal considerable se corresponden con el carácter estratiforme y yacencia subhorizontal de los cuerpos minerales (demostrado durante los trabajos de exploración geológica).
- La asociación de elementos calcófilos (Pb, Zn, Sb, As y Cu) conjuntamente con el Ba en estas anomalías geoquímicas son una expresión inequívoca de la composición polimetálica de la mineralización original.
- La aparición de anomalías de Cu hacia el sur del depósito Loma Hierro (cuerpo mineral L-4) y la predominancia de anomalías de Sb, Pb y Ag hacia el extremo norte (cuerpo mineral L-1), ofrecen un criterio contrastante de la distribución zonal de los elementos, lo cual puede estar vinculado con la posición relativa de la zona de descarga respecto a una y otra zona. Si nos atenemos a la serie de zonalidad geoquímica para las aureolas de dispersión de estos elementos como Cu-Zn-Pb-Ag-Sb-As-Ba según la dirección de infiltración de las soluciones mineralizantes, entonces el cuerpo mineral L-1 debe corresponderse con una zona alejada de la zona de descarga y el cuerpo mineral L-4 pertenece a una parte del depósito original más próximo a los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes. Esta misma

observación sería aplicable a considerar que en la zona correspondiente al cuerpo mineral L-4 existe un corte de erosión más profundo.

- Las anomalías de Sb, Ba y Ag son exclusivas de este tipo de mineralización, por lo que estos elementos se convierten en indicadores directos para su localización. De hecho, estas características se convierten en criterios geoquímicos válidos para la orientación de trabajos de prospección futuros en los sectores propuestos dentro del Distrito Metalogénico Dora-Francisco y en otras regiones similares.

12- Las anomalías litogeoquímicas de Cu, As, Bi, Au, Pb, Zn y Ag detectadas en la manifestación Oro Cándida, alineadas en dirección sureste-noroeste reflejan la mineralización de stockwork cuarzo-sulfurosa existente y está acorde con el desarrollo de zonas de oxidación extensas y alteraciones hidrotermales de elevada intensidad (cuarcificación, cloritización y sericitización). La aparición de anomalías de Pb y Ag intensas hacia su extremo noroeste parece responder a una tendencia a la transición a una mineralización polimetálica hacia el contacto de las secuencias sc_2^1 (sc^c) y sc_1^2 (sc^d) y a una posición del corte de erosión muy próximo a la zona mineral.

13- La composición químico-mineralógica de la mineralización sulfurosa, sus rasgos texturo-estructurales, la presencia de depósitos estratiformes (Loma Hierro, Amistad) y de zonas de stockwork cuarzo-sulfurosas y oxidadas (Loma Roja, Dora, Cándida, Oro Cándida) y la asociación de los depósitos y manifestaciones minerales a una secuencia de rocas sedimentarias del Jurásico medio-superior (Formación San Cayetano), constituyen elementos que confirman el desarrollo de un proceso metalogénico único que propició la formación de depósitos minerales de tipo SEDEX. Esto debe ser considerado añadiendo las diferencias locales relacionadas con las condiciones físico-químicas existentes durante la deposición mineral desde la solución mineralizante (composición química, condiciones redox, temperatura, etc.).

14- Los vínculos genéticos entre los diferentes depósitos y manifestaciones minerales existentes quedan definidos claramente mediante pares característicos para los depósitos SEDEX: **zona de stockwork** (vetillas entrecruzadas) para mineralización cuprífera y arsenopirítica con oro acompañante y **zona estratiforme** (masiva, bandeada) para mineralización pirito-polimetálica con plata, aunque en ocasiones estos nexos se encuentran enmascarados por los efectos tectónicos. En concreto, se ofrecen algunos criterios que corroboran una alternancia rítmica entre estos tipos de mineralización con una regularidad en cuanto a su posición espacial: en cada escama tectónica la mineralización cuprífera se encuentra al sur respecto a la mineralización polimetálica. Esto se demuestra mediante la combinación de los estudios geoquímico-mineralógicos de los depósitos minerales y las investigaciones geoquímicas en suelos y rocas (estructura metalífera Francisco-Loma Hierro y manifestación Oro Cándida).

15- Existen elementos suficientes para establecer una zonalidad geoquímico-mineralógica acorde al modelo de depósitos SEDEX propuesto por Large (1981, 1983, 1991), aplicable a los depósitos y manifestaciones minerales del Distrito Metalogénico Dora-Francisco. Esto queda demostrado al apreciarse la distribución zonal de algunos caracteres geoquímicos y metalogénicos en el depósito Loma Hierro que posibilitan estimar la posición relativa de la mineralización respecto a la zona de alimentación. El cuerpo mineral L-1 (situado al norte) se revela mediante anomalías de Pb, Zn, Ba, Ag y As, la mineralización sulfurosa se caracteriza por haberse formado en un ambiente con déficit de azufre en la salmuera original, las concentraciones de plata son extraordinariamente elevadas tanto en la mineralización sulfurosa como en la mineralización oxidada y existe presencia de barita; estos indicios sirven para definir que esta zona corresponde a las partes más alejadas de los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes. La existencia de un desarrollo notable de anomalías de Cu (en suelos), la aparición de mineralización oxidada con vetas de cuarzo y estructura brechosa y las concentraciones de Ag relativamente bajas en el cuerpo mineral L-4 (situado al sur) permiten estimar la posible correspondencia de esta zona con los canales de ascenso de las soluciones mineralizantes.

16- La intensa erosión a que ha estado sometida la mayor parte de esta región puso al descubierto una parte de los cuerpos minerales o sus zonas inmediatas, lo que ha conducido a la formación de extensas zonas de oxidación y/o sombreros de hierro, observados fundamentalmente en el depósito Loma Hierro, manifestación Oro Cándida y manifestación Loma Roja. La acción de los agentes hipergénicos sobre la mineralización sulfurosa primaria ha provocado la lixiviación de los metales básicos en aquellas regiones más expuestas y la consiguiente concentración de metales preciosos (oro y plata). Esto le confiere a las zonas de oxidación y sombreros de hierro una potencialidad argentífera y aurífera extraordinaria, comprobado con el descubrimiento del depósito Loma Hierro.

17- Los eventos tectónicos del Eoceno han complicado extraordinariamente la estructura geológica de la región, provocando la fracturación intensa y sobrecorrimientos en dirección sureste-noroeste. Esto dificulta la localización de cuerpos minerales ocultos por las escamas tectónicas. Sin embargo, la acción conjunta de estos procesos tectónicos y de los procesos erosivos tuvo una participación tal que puso al descubierto algunas zonas mineralizadas y/o secuencias rocosas alojadoras de la mineralización, que sitúan a los depósitos y manifestaciones minerales en una posición relativamente próxima al corte de erosión, factor este que favorece el descubrimiento de anomalías geoquímicas de diversa naturaleza (litogeoquímicas, pedogeoquímicas, fluviales, etc.) y las transformaciones hipergénicas de la mineralización primaria, fundamentalmente en las estructuras metalíferas Francisco-Loma Hierro y Cándida

RECOMENDACIONES.

- 1- Aplicar la metodología propuesta para el procesamiento integral de los datos geoquímicos haciendo uso de sistemas expertos y medios automatizados con el fin de realizar un pronóstico geoquímico confiable de mineralización sulfurosa en otras regiones con perspectivas para el descubrimiento de depósitos minerales de origen hidrotermal. Esto sugiere la posible extensión de estos procedimientos a la creación de mapas geoquímicos regionales para el pronóstico de mineralización sulfurosa a diferentes escalas, muy factible en Cuba occidental.
- 2- Proyectar y ejecutar trabajos de prospección en los sectores propuestos con el objetivo de verificar el pronóstico prospectivo de mineralización sulfurosa en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco.
- 3- Aplicar los procedimientos estadísticos y representaciones gráficas propuestos durante los trabajos de prospección de depósitos minerales.
- 4- Realizar análisis isotópicos y de inclusiones líquido-gaseosas para lograr una caracterización más confiable y exacta de las condiciones físico-químicas de formación de la mineralización sulfurosa en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco.

BIBLIOGRAFIA.

Alfonso, J., 1989. Estadísticas en las ciencias geológicas. Editora ISPJAE, Ciudad de La Habana.

Arias, D., 1996. A case of successful soil geochemistry: the Rubiales Zn-Pb orebody (NW Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, Vol.56, N°3, pp. 229-235.

Astajov, K., Solianik, V., Martínez, D., Fernández, R., Oubiña, J., Dimidov, S., Santamaría, Z., 1981. Levantamiento a escala 1:50 000 Pinar Noroeste, C.N.F.G., Pinar del Río.

Bellehumeur, C., Marcotte, D., Jebrack, M., 1994. Multi-element relationships and spatial structures of regional geochemical data from stream sediments, southwestern Quebec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 51, N°1, pp. 11-35.

Beni Licht, O.A., Turvainon, T., 1996. Multipurpose geochemical maps produced by integration of geochemical exploration data sets in the Paraná Shield, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 56, N°3, pp. 167-182.

Burov, V., Martínez D., Yusainov, Y., Fernández, R., Dervenev, V., Uspensky, A., 1985. Informe de los trabajos de levantamiento geológico a escala 1:50 000 realizados en la parte occidental de la provincia de Pinar del Río en 1981-85. C.N.F.G., Pinar del Río.

Cheng, Q., Agterber, F.P., Bonham-Carter, G.F., 1996. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 56, N° 3, pp. 183-195.

Cobiella, J., 1996a. Estratigrafía y eventos jurásicos en la cordillera de Guaniguanico, Cuba Occidental. *Minería y Geología*. Vol. 13, N° 3, pp. 11-25.

Cobiella, J., 1996b. El magmatismo jurásico (caloviano? - oxfordiano) de Cuba occidental: ambiente de formación e implicaciones regionales. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Tomo 51, N° 1, pp. 15-28.

Cox, P., Singer, D., 1986. Mineral Deposit Model. U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 380 p.

Demidov, V., Muñoz, J.N., 1993. Introducción a la Minerografía. Editorial Felix Varela, La Habana, 288 pp.

Díaz, O., Casarreal, G., 1991. El método de los parámetros complejos en la interpretación de datos geólogo-geofísicos. Publicaciones internas, Universidad de Pinar del Río, 5 p.

Drummond, S.E., Ohmoto, H., 1985. Chemical Evolution and Mineral Deposition in Boiling Hydrothermal Systems. *Economic Geology*, Vol. 80, pp. 128-147.

Fernández de Lara, R., 1993. Confección del mapa pronóstico, asistido por métodos matemáticos, para la mineralización sulfurosa en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco en Pinar del Río. Tesis de doctorado. Inst. Sup. Polit. José A. Echevarría, Ciudad de la Habana, 125 p.

Finlow-Bates, T., Large, D.E., 1978. Water depth as a major control on the formation of submarine exhalative ore deposits. *Geol. Jb.*, D30, pp. 27-39.

Finlow-Bates, T., 1980. The Chemical and Physical Control of the Genesis of Submarine Exhalatives Orebodies and their Implications for Formulating Exploration Concepts, *Areview Geol. J. B.*, D40. Hannover, pp. 131-138.

Gustafson, L.B., Williams, N., 1981. Sediment-Hosted Stratiform Deposits of Copper, Lead and Zinc, *Economic Geology*, Volume 75th Anniversary, pp. 139-178.

Haczewski, G., 1976. Sedimentological reconnaissance of San Cayetano formation: an accumulative continental margin in the Jurassic of Western Cuba. *Acta Geologica Polonica*. Vol. 26, Nº 2, pp. 331-353.

Haczewski, G., 1987. Reconocimiento sedimentológico de la Formación San Cayetano: un margen continental acumulativo en el Jurásico de Cuba Occidental. *Contribución a la geología de la provincia de Pinar del Río*, Editorial Científico-Técnica, Ciudad de la Habana, pp. 228-247.

Hatten, W.C., 1957. *Geology of the Central Sierra de los Organos, Pinar del Río province, Cuba*, C.N.F.G., Habana.

Hernández, G., Guerra, J., Krapiva, L.Y., 1988. Minerales de plata en las menas polimetálicas del sector Francisco. *Memorias IV Encuentro Científico Técnico de Geología, Pinar del Río*.

Hongjin, J., Yengzheng, Z., Xisheng, W., 1995. Correspondence cluster analysis and its application in exploration geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 55, Nº 1-3, pp. 137-150.

Iturralde-Vinent, M., 1981. Nuevo modelo interpretativo de la evolución geológica de Cuba, *Ciencias de*

la Tierra y del Espacio, N°3, pp. 51-90.

Iturralde-Vinent, 1988. Características generales del magmatismo de margen continental de Cuba. Revista Tecnológica, Vol. XVIII, N° 4, pp. 17-24.

Jujvit, V., Fesenko, G., 1966. Informe preliminar sobre las limonitas de hierro en Pinar del Río.

Khudoley, K., Meyerhoff, A., 1971. Paleogeography and geological history of Greater Antilles. Geological Society of America, Memoir 129, 199 p.

Lara, J., Blanes, J., Klepikov N., 1989. Informe sobre los resultados de la prospección preliminar de menas de cobre y polimetálicas a escala 1:10 000 entre los depósitos Dora y Francisco. C.N.F.G., Pinar del Río.

Lara, J., Lastra, J. 1995. Informe geológico anual. Concesión Dora-Francisco. Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A.

Lara, J., Lastra, J., Medina, J., 1996. Reporte geológico de la Estructura Cándida. Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A.

Lara, J., Lastra, J., 1996. Potencial para menas con oro y plata en el Distrito Metalogénico Dora-Francisco. Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A.

Large, D.E., 1981. Sediment-hosted submarine exhalative lead-zinc deposits - A review of their geological characteristics and genesis. En: Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, Vol. 9, pp 469-507.

Large, D.E., 1983. Sediment-Hosted Massive Sulphide Lead-Zinc Deposit: An Empirical Model. Short Course Handbook. Vol. 9, May 1983. Victoria, Canadá, pp 1-25.

Large, D.E., 1991. Empirical Model For Sediment-Hosted Massive Sulphide Zinc-Lead Deposits (SEDEX) -An Update. Germany, 49 p.

Lastra, J., 1993. Geoquímica de los depósitos exhalativo-sedimentarios (trabajo referativo inédito).

Lastra, J., Lara, J., 1996. Reporte geoquímico de suelos. Depósito argentífero oxidado Loma Hierro Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A.

Lastra, J., Lara, J., 1997. Reporte geoquímico de suelos. Estructura Francisco-Loma Hierro. Asociación

Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A.

Linares, G., Acosta, L., Sistachs, V., 1986. Estadística multivariada, ENPES, Universidad de La Habana, Ciudad de La Habana, 320 p.

Lydon, J., 1974. Chemical parameters controlling the origin and deposition of sediment-hosted stratiform lead-zinc deposit. Short Course Handbook: Sediment-hosted stratiform lead-zinc deposits, Vol. 9, pp. 175-245.

Melchior, A., Dejanghe, L., Hughes, G., 1996. A geomicrobiological study of soils collected from auriferous areas of Argentina. Journal of Geochemical Exploration, Vol. 56, N°3, pp. 219-227.

Moore, D.W., Young, L.E., Modene, J.S., Plahuta, J.T., 1986. Geology Setting and Genesis of the Red Dog Zinc-Lead-Silver Deposit, Western Brooks Range, Alaska, Economic Geology, Vol. 81, pp. 1696-1727.

Mormil, A., Norman, A., Varvarov, A., Shosiriev, V., Linares, E., Vergara, F., 1980. Geología y metalogénia de la provincia de Pinar del Río, Tomo II, Ciudad de La Habana, Empresa Geominera Pinar del Río.

Novitski, Y., 1963. Informe Dora - Amistad. C.N.F.G., Pinar del Río.

Pardo, M., 1989. Regularidades de la metalogénia endógena y su pronóstico en el macizo metamórfico de Isla de la Juventud, Ciencias de la Tierra y del Espacio, N°15-16, pp. 17-26.

Pardo, M., Díaz, M., 1989. Métodos cuantitativos de pronóstico aplicados a las investigaciones metalogénicas. Un ejemplo: Isla de la Juventud, Ciencias de la Tierra y del Espacio, N°15-16, pp. 27-39.

Pfeffer, E. W. 1960. Informe sobre los depósitos de hierro en el área de la mina Francisco. C.N.F.G., Pinar del Río.

Piotrowska, K., 1987. Las estructuras de nappes en la Sierra de los Organos. Contribución a la geología de la provincia de Pinar del Río, Editorial Científico-Técnica, Ciudad de la Habana, pp. 85-156.

Piotrowski, J., 1987. Primeras manifestaciones de vulcanismo en el geosinclinal cubano. Contribución a la geología de la provincia de Pinar del Río, Editorial Científico-Técnica, Ciudad de La Habana, pp. 163-169.

Poplavski, J., Kasantsov, V., Tribunski, M., Nicolaev, I., De Los Hoyos, L., 1966. Informe sobre los resultados de los trabajos de búsqueda efectuados para mineral de cobre durante el período 1963-66 en la parte noroeste de la provincia de Pinar del Río. C.N.F.G., Pinar del Río.

Pszczółkowski, A., 1987. Secuencias miogeosinclinales de la Cordillera de Guaniguanico: su litoestratigrafía, desarrollo de facies y paleogeografía. Contribución a la geología de la provincia de Pinar del Río, Editorial Científico-Técnica, Ciudad de La Habana, pp. 5-84.

Simón, A., 1983. El extremo occidental del arco septentrional cubano. Boletín Geociencias, Vol. 2, N° 1, pp. 3-27.

Simón, A., 1984. Evolución metalogénica del territorio cubano.

Tianxing, R., Shaoping, Y., Yinghan, L., 1995. Characteristics of element dispersion and geochemical exploration for concealed ore deposits overlain by loess and red soil in eastern Gansu Province, China. Journal of Geochemical Exploration, Vol. 55, N° 1-3, pp. 103-114.

Valdés E. L., Díaz A., Davies, J.F., Whithhead, R.E., Fonseca, L., 1993. Cogenetic Sedex Zn-Pb and Stocwork Cu Ores, Western Cuba. Explor. Mining Geol., Vol. 2, N°4, pp. 297-305.

Vázquez, M., Medina, J., Sobrino, E., 1998. Resultados sobre el muestreo de sedimentos de fondo en la concesión Dora-Francisco. Asociación Económica Holmer Gold Mines Limited - Geominera S.A.

Vologdin N., Dorofeeva, G., Frunkina G., 1963. Estructura geológica y minerales útiles de la parte noroeste de la provincia de Pinar del Río (Informe de la brigada de búsqueda de levantamiento N°3 para los años 1961-1962), C.N.F.G, Pinar del Río.