

COMPLEJO REDOX

MÉTODOS NO CONVENCIONALES DE EXPLORACIÓN



Manuel Enrique Pardo Echarte
Osvaldo Rodríguez Morán



Manuel Enrique Pardo Echarte

Ingeniero en Geofísica por la Universidad de La Habana, Cuba (1974), doctor en Ciencias Geólogo-Mineralógicas por el Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, La Habana, Cuba (1987); investigador titular de la Academia de Ciencias de Cuba desde 1992; profesor titular adjunto en el Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría desde 1999; trabaja en el Centro de Investigaciones del Petróleo de Cuba en donde ha realizado investigaciones geólogo-geofísicas aplicadas a la zonación tectónica, la cartografía geólogo-estructural, y la evaluación de recursos minerales. También ha realizado exploración geofísica y geoquímica para minerales e hidrocarburos y es inventor y desarrollador de la nueva técnica no convencional de exploración para minerales metálicos e hidrocarburos; estudios de contaminación metálica y de hidrocarburos en suelos y búsquedas de enterramientos arqueológicos metálicos: Complejo Redox. Tiene una amplia experiencia docente, y entre sus principales publicaciones destacan: «Constitución geológica y metalogénia endógena del macizo metamórfico Isla de Pinos, Cuba» (1987); «Características geólogo-geofísica de los estructuras dómicas tardías en los macizos metamórficos Isla de Pinos y Escambray, Cuba» (1992); «Zonación gravimagnética y modelo físico-geológico conceptual del cinturón orogénico cubano; Interpretación geólogo-tectónica» (1992); «Expresión geofísico-geoquímica y cartografía de depósitos someros de hidrocarburos en Cuba; un enfoque de exploración no convencional» (1993); «Mineralización endógena asociada al proceso metamórfico del Macizo Escambray, Cuba» (1994); «Técnicas geofísicas-geoquímica no convencionales para la prospección de hidrocarburos; progresos de su aplicación en Cuba» (1997); «Mediciones *in situ* del Potencial Redox en suelos; una técnica no convencional para la prospección de hidrocarburos y minerales» (1997); «El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la Kappametría a los fines de la prospección geológica» (1999); «La nueva técnica geoquímica de Potencial Redox en suelos (Complejo Redox): principios y aplicaciones» (2001); «El Complejo Redox: Estado del arte en el 2002» (2003); «El Complejo Redox. Consideraciones metodológicas y empírico teóricas» (2009) y el libro *Conventional methods for oil & gas exploration in Cuba: the redox complex*, en coautoría con Osvaldo Rodríguez Morán.

Complejo Redox.
Métodos no convencionales
de exploración

Manuel Enrique Pardo Echarte
Osvaldo Rodríguez Morán

Rodríguez Morán, Osvaldo

Complejo Redox: Métodos No Convencionales de Exploración / Osvaldo Rodríguez Morán y Manuel Enrique Pardo Echarte -- 1a. Ed. -- Villahermosa, Tabasco, México: Universidad Olmeca, 2022

146 Pag.; 21 x 27 cm.

Incluye Índice

ISBN: 978-607-99709-1-8 (Versión Impresa)

ISBN: 978-607-99709-2-5 (Versión Digital)

1.Exploración Petrolera.

I. Pardo Echarte, Manuel Enrique, Coaut.

CD 621.1 R635c 2022

Complejo Redox. Métodos no convencionales de exploración.

Manuel Enrique Pardo Echarte y Osvaldo Rodríguez Morán

Primera edición en formato electrónico, 2022.

D. R. © Universidad Olmeca, A.C.,
Carretera Villahermosa-Macuspana, km 14, Dos Montes, Centro, C. P. 86280,
Villahermosa, Tabasco, México.
www.olmeca.edu.mx/

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, la fotocopia o la grabación, sin la previa autorización por escrito de la Universidad Olmeca, A.C.

ISBN versión impresa: 978-607-99709-1-8

ISBN versión electrónica: 978-607-99709-2-5

Hecho en México / *Made in Mexico*

Complejo Redox. Métodos no convencionales de exploración

Manuel Enrique Pardo Echarte
Osvaldo Rodríguez Morán



UNIVERSIDAD OLMECA
Raíz de sabiduría

De los autores

El presente libro constituye una compilación de los resultados de más de 20 años de investigaciones sobre el Complejo Redox (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica), complejo de métodos geofísico-geoquímicos no convencional de exploración, el cual permite establecer la presencia o no, de elementos metálicos en el subsuelo y sus principales características. El Complejo Redox contribuye al incremento de la efectividad de las investigaciones convencionales (prospección geológica y estudios medio-ambientales y arqueológicos) y a la reducción de sus costos.

Con estos propósitos se identifican también, las técnicas geoquímicas no convencionales de detección directa (indirecta, en el caso de los hidrocarburos), empleadas con carácter complementario, dentro de las cuales se enmarca el Complejo Redox, complejo de métodos que brinda información sobre las modificaciones del medio que tienen lugar en la parte superior del corte, directamente sobre cualquier objetivo de naturaleza metálica, controladas, bajo el Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos, por las particularidades de composición, grado (ley), rasgos geométricos y de yacencia del mismo.

Los autores agradecen a todos los especialistas que a lo largo de más de dos décadas han participado en el desarrollo y aplicación de este complejo de métodos no convencional de exploración. Un agradecimiento especial a la Dra. C. Norma Rodríguez Martínez, Académica de Mérito de la Academia de Ciencias de Cuba, Investigadora Titular del Instituto de Geología y Paleontología del Servicio Geológico Nacional de Cuba, no solo por acceder con amabilidad a escribir el prólogo del libro, sino por ser constante impulsora de inventivas e iniciativas innovadoras como el Complejo Redox. No dejar de mencionar el principal antecedente de este libro: la Monografía Breve de la Editorial *Springer Nature* (2016) «Non Conventional Methods for Oil and Gas in Cuba. The Redox Complex», el cual sentó pautas internacionales en la prospección no convencional de hidrocarburos en Cuba.

Tabla de contenidos

Prólogo	11
I. El Complejo Redox: Consideraciones empírico-teóricas y metodológicas.	13
I.1 Introducción	13
I.2 Principio de Migración Vertical de los Iones Metálicos	16
I.3 Posibilidades y limitaciones del Complejo Redox	20
I.4 Metodología del Complejo Redox	21
I.5 Libreta de campo del Complejo Redox	26
I.6 Equipamiento del Complejo Redox	26
I.7 Equipo de trabajo del Complejo Redox	29
I.8 Interpretación de los datos del Complejo Redox	29
I.9 Aparato matemático para la interpretación cuantitativa	31
I.10 Fundamento empírico del Complejo Redox	35
I.11 Actualidad científica	36
I.12 Novedad	36
I.13 Evaluación económica y contribución social	36
I.14 Conclusiones	37
I.15 Referencias Bibliográficas	37
II. Modelo matemático y automatización del Complejo Redox	39
II. 1 Modelo matemático para la interpretación del Complejo Redox	39
II.1.1. Introducción.	39
II.1.2. El Proceso de Modelación Matemática del Complejo Redox.	42
II.1.3. Determinación del Nivel de Fondo de los atributos.	42
II.1.4. Proceso de Interpretación de los atributos	49

II.1.5	Determinación de los Puntos Singulares (PS).	50
II.1.6	Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala por Atributos (IRAA).	52
II.1.7	Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala del Perfil (IRA) y de los Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA).	52
II.1.8	Determinación de las dependencias entre los atributos.	53
II.1.9	Estimación de las profundidades bajo los Puntos Singulares.	55
II.1.10	Depuración de las profundidades.	56
II.1.11	Clasificación del Intervalo de Respuesta Anómala del Perfil.	57
II.2	El Sistema Redox	66
II.2.1	Ambiente del Sistema Redox	67
II.2.2	Ambiente de las Interfaces	69
II.3.	Referencias Bibliográficas	73
III.	Desarrollo histórico del Complejo Redox.	75
III.1.	Referencias Bibliográficas	78
IV.	Procesos que controlan la movilización, el transporte y la acumulación metálica en el ambiente superficial sobre los cuerpos metálicos enterrados y los depósitos de hidrocarburos	81
IV.1	Resumen de algunas de las técnicas de exploración geoquímica y geofísico-geoquímicas utilizadas para el estudio de los cuerpos meníferos ocultos y los depósitos de hidrocarburos	82
IV.2	Resumen de algunas teorías que explican las anomalías superficiales sobre la mineralización profundamente enterrada	85
IV.3	Resumen sobre las teorías que explican las anomalías superficiales sobre los depósitos de hidrocarburos	87
IV.4	Resumen sobre la actividad microbiana relacionada con la mineralización enterrada y los depósitos de hidrocarburos	92
IV.5	Consideraciones finales y Conclusión	94
IV.6	Referencias Bibliográficas	95
V.	Estrategia de aplicación del Complejo Redox.	99
V.1	Exploración de hidrocarburos	99
V.1.1	Premisas geólogo-geofísico-geoquímicas	99
V.1.2	Cartografía prospectiva integrada. Modelos Generalizados de Respuestas (MGR) y sectores perspectivas	100

V.2	Exploración de minerales	102
V.2.1	Premisas geólogo-geofísico-geoquímicas	102
V.2.2	Cartografía prospectiva integrada. Modelos Generalizados de Respuestas (MGR) y sectores prospectivos	103
V.3	Referencias Bibliográficas	103
VI.	Casos de estudio del Complejo Redox.	105
VI.1	Exploración petrolera	105
VI.1.1	Yacimiento Pina	105
VI.1.2	Área de Ceballos	108
VI.2	Exploración de minerales	112
VI.2.1	Little Golden Hill	112
VI.2.2	Yacimiento Antonio	114
VI.3	Investigaciones medioambientales	114
VI.3.1	Distribuidora de hidrocarburos Güines	114
VI.3.2	Fábrica de Baterías Secas «Yara»	115
VI.4	Investigaciones arqueológicas	117
VI.4.1	Valle de los Ingenios, Guáimaro	117
VI.5	Referencias Bibliográficas	119
	Consideraciones finales	121
	Anexos	123

Prólogo

La exploración de petróleo y gas y la exploración de minerales son actividades económico-productivas, que en mucho determinan el nivel de desarrollo de un país, pues asegura los recursos que sustentan ese desarrollo. Aún cuando la exploración es necesaria no deja de ser una actividad económica, donde los indicadores de rentabilidad determinan su ejecución. Muchos países resuelven este dilema al convocar a la inversión extranjera a participar en los costos de este proceso, pero también resulta efectiva la utilización de métodos que optimicen el uso de los métodos convencionales. Es ahí donde los métodos no convencionales, en específico el Complejo Redox, cumplen un papel primordial, pues su utilización permite, en grandes áreas con potencialidad petrolífera (menífera), seleccionar donde se ubican las más perspectivas, en las cuales, al aplicar los métodos convencionales detallados más costosos, sea posible descubrir nuevos hallazgos con una notable reducción de los costos. El Complejo Redox ofrece, también, soluciones a tareas de medioambiente al evaluar contaminaciones por hidrocarburos y metales pesados y en la localización de enterramientos arqueológicos de naturaleza metálica.

El libro *Complejo Redox. Métodos no Convencionales de Exploración*, de los autores Manuel Enrique Pardo Echarte y Osvaldo Rodríguez Morán, Investigadores del Centro de Investigación del Petróleo y de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» CUJAE, respectivamente, permite al lector constatar los fundamentos geólogo-geofísico-geoquímicos de este complejo de métodos y las herramientas necesarias para su correcta implementación e interpretación.

Los métodos geofísico-geoquímicos no convencionales para la exploración geológica, dentro de los cuales se encuentra el Complejo Redox, se basan en la detección de modificaciones del medio que tienen lugar en la superficie ubicada directamente sobre las acumulaciones de hidrocarburos o cuerpos meníferos, debido a la difusión de los halos de hidrocarburos ligeros e iones metálicos que llegan a la superficie.

Para facilitar su comprensión los autores subdividieron el texto en siete capítulos: el primero aborda consideraciones metodológicas y teóricas que fundamentan el Complejo Redox; en el segundo se desarrolla el proceso de modelaje para la interpretación del método; el tercero trata sobre el desarrollo histórico del Complejo Redox hasta la actualidad, al incluir aspectos económicos y técnicos de la data que procesa; el cuarto capítulo resume los procesos que controlan la migración de los iones metálicos, su transporte y acumulación en la superficie ubicada directamente encima de las ocurrencias; el quinto sobre la estrategia de aplicación del método; el sexto capítulo desarrolla una parte de los casos de estudios en los que se ha aplicado el Complejo Redox y el capítulo final expone las de consideraciones finales de los autores hacia el tema.

El lector después de consultar este libro, quedará armado con las herramientas imprescindibles para entender los resultados de la aplicación del Complejo Redox dentro de las campañas de métodos geólogo-geofísico-geoquímicos, en cualquiera de sus esferas de aplicación. Está hecha la invitación a disfrutar de la lectura del libro y se recomienda utilizarlo con frecuencia como medio de consulta.

Dra. C. Norma Rodríguez Martínez
Académica de Mérito de la Academia de Ciencias de Cuba.
Investigadora Titular del Instituto de Geología y Paleontología,
Servicio Geológico Nacional de Cuba.

I. El Complejo Redox: Consideraciones empírico-teóricas y metodológicas.

I.1 Introducción

Como una regla a nivel mundial, los primeros y muchos de los más importantes descubrimientos de petróleo han sido realizados a partir del criterio de perforar cerca de manaderos, depósitos de asfalto o escapes de hidrocarburos, basados en el supuesto de que parte de los hidrocarburos de una acumulación gasopetrolífera, migran de modo vertical hacia la superficie. Una atención especial merece los denominados microescapes o microfiltraciones de hidrocarburos, dada su relación con acumulaciones bien conservadas en la profundidad. Los probables mecanismos consideran el ascenso vertical de burbujas de gas de tamaño coloidal a través del sistema interconectado de microfracturas, grietas y planos de estratificación, todos rellenos con agua en el subsuelo. La flotación conduce estas burbujas hacia la superficie casi de forma vertical.

La tecnología de exploración más segura y eficiente para detectar y cartografiar las estructuras gasopetrolíferas desde la superficie a profundidades de miles de metros, es la sísmica, en sus distintas variantes. Pero no siempre se obtienen los resultados esperados por diferentes causas. En diversas situaciones geológicas, los datos sísmicos proporcionan poca o ninguna información sobre si una trampa está cargada de hidrocarburos o no. En otros casos, cuando la adquisición es difícil y costosa en extremo o la calidad de la información es deficiente debido a la geología o a condiciones de superficie desfavorables, son los métodos de exploración no-sísmicos y no-conventionales, los únicos que pueden proporcionar información sobre trampas estratigráficas sutiles. Como se ha dicho, está bien documentado que la generalidad de las acumulaciones de hidrocarburos posee microescapes o mi-

crofiltraciones, que son verticales de forma predominante, así como que pueden detectarse y mapearse al utilizar varios métodos de exploración no-sísmicos y no-convencionales.

Schumacher (2014) (**Figura I.1**) ha afirmado que los datos sobre la microfiltración de hidrocarburos –cuando están debidamente adquiridos, interpretados, e integrados con los datos geológicos, sísmicos y de otros métodos convencionales– conducen a una mejor evaluación de las áreas prospectivas y de los riesgos de exploración.

Para ejemplificar esto, Schumacher (2014) en su trabajo, expuso los resultados de la exploración realizada por diversas compañías, en distintas cuencas y utiliza una variedad de métodos no-convencionales dentro del complejo de investigación. Así se obtuvo que un 82 % de descubrimientos se logró en los casos en que los métodos no-convencionales respondían con resultados positivos, contra solo un 11 % de descubrimientos en aquellos casos que correspondían con resultados negativos de estos métodos. Esto indica la importancia de apoyo de los métodos no-convencionales, en la reducción del riesgo en la perforación, lo que equivale a decir que mejora el coeficiente de acierto en la perforación.

Dado el vínculo directo con la cartografía de posibles microfiltraciones de hidrocarburos, la reducción de áreas a los fines de la planificación de la sísmica resulta mucho más efectiva. La interpretación se centra en la cartografía de áreas favorables integradas por agrupaciones de posibles microfiltraciones de hidrocarburos, dentro de un determinado marco geólogo-estructural (cartografiado por gravi-magnetometría) las cuales han de ser reconocidas y evaluadas en tierra, posteriormente, por el Complejo Redox. Ello permite establecer la presencia o no de hidrocarburos en la profundidad y sus principales características.

Como se ha visto en los párrafos anteriores, relacionados con la exploración petrolera, la necesidad de elevar la efectividad geólogo-económica de los programas mínimos por métodos convencionales en la prospección geológica conlleva a su complementación con técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales como el Complejo Redox (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Pedogeoquímica) el cual brinda información sobre las modificaciones del medio que tienen lugar en la parte superior del corte, directamente sobre un objetivo metálico, en virtud del Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos hacia el suelo. Como regla, estas modificaciones están controladas por las particularidades de composición, grado (ley), rasgos geométricos y de yacencia del objeto metálico, por lo que este complejo resulta efectivo de forma particular en su localización, caracterización y evaluación, al permitir la optimización de

GeoConvention 2014

FOCUS

adapt
refine
sustain

Minimizing Exploration Risk: The Impact of Hydrocarbon Detection Surveys for Distinguishing Traps with Hydrocarbons from Uncharged Traps

Dietmar (Deet) Schumacher
E&P Field Services, Mora NM, USA, deetschumacher@gmail.com

Summary

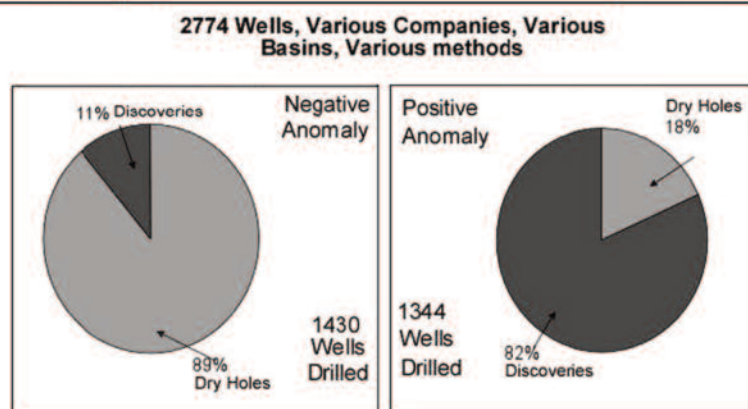
The application of surface geochemical prospecting methods to oil and gas exploration has resulted in varied success and considerable controversy despite advances in technology and an improved understanding of migration mechanisms. Few people question that hydrocarbons can migrate to the surface in amounts that are detectable, but many remain skeptical of how such information is best integrated into exploration and development programs.

It has been well documented that most oil and gas accumulations leak hydrocarbons, that this leakage (or microseepage) is predominantly vertical, and that this leakage can be detected and mapped using any of several geochemical and non-seismic geophysical methods (Klusman, 1993; Schumacher and Abrams, 1996; Klusman, 2002).

The surface expressions of hydrocarbon microseepage can take many forms, including (1) anomalous hydrocarbon concentrations in sediments; (2) microbiological anomalies; (3) mineralogic changes such as the formation of calcite, pyrite, uranium, elemental sulfur, and certain magnetic iron oxides and sulfides; (4) bleaching of red beds; (5) clay mineral changes; (6) acoustic anomalies; (7) electrochemical changes; (8) radiation anomalies; and (9) biogeochemical and geobotanical anomalies. These varied expressions of hydrocarbon seepage have led to the development and marketing of an equally diverse number of hydrocarbon detection methods. These include both direct and indirect surface geochemical methods, and non-seismic geophysical methods such as magnetic and electrical methods, radioactivity-based methods, and satellite remote sensing methods.

What are the benefits of using geochemical and non-seismic hydrocarbon detection methods in conjunction with conventional exploration methods? A review of more than 2700 US and International wildcat wells – all drilled after completion of hydrocarbon detection surveys – documents that more than 80% of wells drilled on prospects associated with positive hydrocarbon microseepage anomalies resulted in commercial discoveries. In contrast, only 11% of wells drilled on prospects without such anomalies resulted in oil or gas discoveries.

Figura I.1. Artículo: *Minimizing Exploration Risk: The Impact of Hydrocarbon Detection Surveys for Distinguishing Traps with Hydrocarbons from Uncharged Traps*, del autor: Dietmar Schumacher (E&P Field Services, Mora NM, USA).



la toma de decisiones y la elevación de la tasa de éxito de la perforación y/o la excavación exploratoria.

Como antecedentes del presente trabajo están las investigaciones: «Método de Medición del Potencial Redox en Suelos y su Aplicación Combinada con la Kappametria a los fines de la Prospección Geológica» la cual fue objeto del Certificado de Autor de Invención No. 22 635, concedido por la Resolución No. 475/2000 de la OCPI (**Anexo I.1**) y «Sistema Redox», amparado por la Certificación de Depósito Legal Facultativo de Obras Protegidas (Registro: No. 1589-2005 de Derecho de Autor) (**Anexo I.2**) (Rodríguez, 2005).

I.2 Principio de Migración Vertical de los Iones Metálicos

Las técnicas de extracción selectiva de elementos metálicos, vinculadas al Principio de la Migración Vertical de Iones Metálicos (**Figura I.2**) han devenido populares en la exploración mineral desde la década de los 80 y 90, al citarse como ejemplos, las técnicas CHIM (en ruso, Extracción Parcial de Metales) (Moon, and Khan, 1990) y MMI (Iones Metálicos Móviles) (Birell, 1996; Mann, 1997).



Figura I.2. Esquema que representa el Principio de la Migración Vertical de Iones Metálicos desde una fuente metálica hacia la superficie.

En la técnica CHIM (Moon and Khan, 1990) una serie de electrodos especiales metálico-selectivos se sitúan en la tierra en estaciones con un espaciamiento regular. Se pasa una corriente directa a través de cada electrodo, en paralelo, con la corriente de retorno al pasar a través de un electrodo distante (en el infinito). Un electrolito en cada electrodo se muestrea de forma periódica y se analiza en el campo para metales específicos de interés. La peculiaridad de este método es que el mismo selecciona y concentra iones metálicos móviles los cuales ocurren en concentraciones (en ppb) por debajo de los límites analíticos de precisión (ppm), disponibles para ese entonces. Como mecanismo de transporte de los «iones rápidos» el método considera algún tipo de fuente gaseosa o «geogas».

En la técnica MMI (Birell, 1996) se miden en esencia, las sutiles concentraciones de iones metálicos débilmente adheridos a las superficies de las partículas del suelo, provenientes de una fuente de mineralización profunda o cubierta, al utilizar la Espectroscopia de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICPMS) (**Figura I.3**). La popularidad de esta técnica deviene del hecho de que la extracción selectiva de elementos metálicos (iones desprendidos en solución por la acción de muy débiles digestores los cuales minimizan el ataque de los materiales de la matriz) provenientes de una fuente mineral profunda de modo significativo o cubierta por potentes depósitos exóticos, exhibe anomalías estrechas que se localizan sobre la proyección apical de la ocurrencia y presentan superior contraste anomalía/Nivel de Fondo que las correspondientes a digestiones convencionales (donde digestores ácidos fuertes disuelven la mayor parte de la matriz química del suelo), cuyas anomalías, más amplias, envuelven a las primeras.

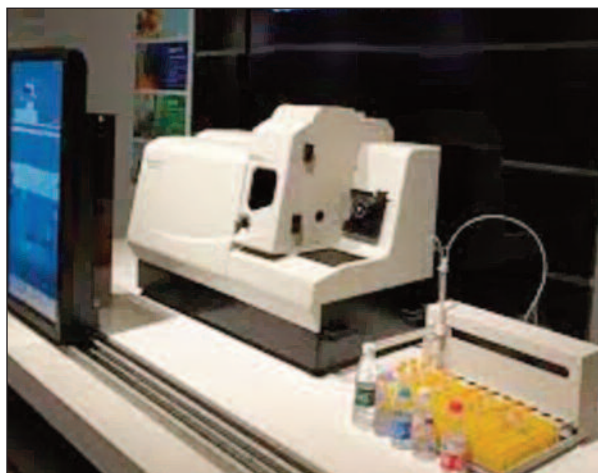


Figura I.3. Modelo de ICPMS (Tomado del sitio: <https://www.ru.nl/science/gi/facilities-activities/elemental-analysis/icp-ms/>).

Las condiciones en que se producen estas anomalías revelan una gran movilidad, rapidez, de los iones metálicos, de ahí también, su denominación como iones metálicos móviles rápidos. En la técnica MMI (Mann *et al.*, 2005) las observaciones empíricas sugieren que las anomalías se localizan, preferentemente, en un intervalo entre 10 y 25 cm debajo de la interfase del suelo (debajo de la capa orgánica), sin importar a cuál horizonte esta profundidad corresponde, al comprender elementos contenidos en la mena que se localizan directamente sobre la fuente de mineralización. Experimentos de laboratorio sugieren que el ascenso capilar y la evaporación juegan un importante papel en la determinación de la posición de emplazamiento de los iones metálicos en el perfil del suelo, la zona de transpiración de raíces participa también, en la deposición/adsorción del soluto dentro de la zona de evapo-transpiración.

Los efectos de percolación de aguas de lluvia, así como las fuerzas ascendentes de naturaleza capilar, son considerados en un modelo el cual ex-

plica varios de los rasgos del emplazamiento de los iones metálicos en los suelos. El modelaje de laboratorio sugiere que la convección, con probabilidad debida al calor producido por la oxidación de la ocurrencia mineral puede, en algunos casos, proporcionar un mecanismo para el ascenso rápido de los iones por debajo del nivel freático. Otra fuente alternativa de ascenso serían los iones metálicos transportados de forma hidromórfica a partir de los procesos de intemperismo. Las investigaciones sobre esta técnica se han enfocado, principalmente, hacia los mecanismos de formación de las anomalías (mecanismos de transporte y deposición de los iones metálicos) y son consideradas un ejercicio de ciencia fundamental.

En opinión de Smee (2003) la principal incertidumbre en las técnicas de Extracción Selectiva es la falta de una sólida comprensión de los procesos de transporte geoquímico que pudiera conducir a patrones de elementos interpretables. Esta comprensión es crítica para producir resultados predictivos a partir de un objetivo mineralizado particular. Adicionalmente, sin este conocimiento no es posible seleccionar el método más apropiado de Extracción Selectiva para cada ambiente geológico y climático o escoger el método de interpretación más revelador. Así, de acuerdo con Hamilton (2000) los procesos de transporte resultantes a partir del intemperismo químico de la mineralización involucra la dispersión de elementos bajo gradientes de uno u otro tipo, incluyendo, químico, de temperatura, piezométrico (ambos, gaseoso y acuoso) y electroquímicos. Estos mecanismos han sido invocados como componentes de los numerosos conceptos de transporte y dispersión que han sido utilizados por los investigadores para explicar las anomalías geoquímicas en suelos sobre la mineralización. Los modelos usados son agrupados en aquellos que descansan en:

- 1) la difusión
- 2) el transporte advectivo de aguas subterráneas
- 3) el transporte gaseoso y
- 4) el transporte electroquímico.

Combinaciones de estos, son también posibles. Según Kelley *et al.* (2004) se incorpora a los tipos citados, además, el transporte facilitado por procesos biológicos. De los referidos mecanismos, uno de los más relevantes y concurridos, en especial, para explicar la dispersión en ambientes con una potente cubierta joven exótica (transportada), es el transporte electroquímico, del cual se considera su mecanismo primario. Este se piensa que operaría también, en otros ambientes, pero su predominio como mecanismo de transporte es menos cierto.

Aunque los modelos de transporte electroquímico presentados en la literatura entran algunas veces en conflicto, la mayoría están basados en el

mismo principio: La conducción de electrones hacia arriba, a lo largo de la mineralización, a partir de áreas profundas químicamente más reducidas resulta en gradientes electroquímicos anómalos en la roca huésped circundante y en la cubierta sobreyacente; el movimiento de masa y carga en la forma de iones resulta en el desarrollo de anomalías geoquímicas en el recubrimiento.

Por sus semejanzas con las posiciones empírico-teóricas del desarrollo del Complejo Redox, se describe de modo breve, la esencia del modelo electroquímico desarrollado por Hamilton (2000) y Hamilton, *et al.* (2004). En el momento de la deposición del recubrimiento (cubierta exótica) se establece un fuerte gradiente Redox vertical justo encima del conductor (cuerpo mineral) reducido en la roca madre y la superficie oxidante, a lo largo del cual los iones tienen una tendencia a moverse. El movimiento hacia el exterior de los iones reducidos tales como HS, Fe^{2+} o $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, a costa del consumo de las especies iónicas oxidantes que van a su encuentro, las cuales están muy limitadas debajo de la zona freática, resulta en la migración hacia arriba de un frente de reducción a partir de la mineralización. Una vez que el frente alcanza el manto freático este proceso se interrumpe debido al predominio de los oxidantes y una columna reductora se habrá desarrollado en el recubrimiento saturado de aguas subterráneas sobre la mineralización.

El referido gradiente en el Potencial Redox se postula como el mecanismo conductor para la redistribución de los elementos en el recubrimiento, al explicar el origen de las diversas anomalías geoquímicas observadas sobre la mineralización, así como una alternativa a la explicación de las «chimeneas reductoras» observadas sobre las ocurrencias de hidrocarburos.

En opinión de Hamilton (2000) y Hamilton, *et al.* (2004) el estudio de los procesos electroquímicos que resultan en anomalías geoquímicas superficiales está aún en su infancia. Varios procesos y fenómenos geoquímicos en apariencia no relacionados que tienen lugar sobre los rasgos geológicos químicamente- reducidos se probarán que están vinculados de modo directo o indirecto a los procesos electroquímicos.

Aunque las técnicas electro-geoquímicas tienen un enorme potencial, aún una gran faena de trabajo adicional se hará para lograr convertirlas en confiables y portadoras de datos interpretables de forma fácil. Es por eso que, aunque cientos de trabajos se han publicado sobre la aplicación del Potencial Espontáneo para la exploración de diversos objetivos metálicos, solo muy pocos se han dedicado a estudiar las variaciones del Potencial Redox, entre otras cosas, por los problemas inherentes a la medición en condiciones superficiales, la cual, además de ser complicada, confronta problemas de irrepetibilidad.

El Complejo Redox no es por cierto, una excepción de las conclusiones señaladas para las técnicas electro-geoquímicas de exploración. No obs-

tante, cualesquiera que sean los mecanismos de transporte que operen, la regularidad en la relación funcional del Potencial Redox y de la concentración superficial de elementos químicos provenientes de la fuente, con la profundidad y características de la misma, parece corresponder, según observaciones empíricas (Pardo, 2004) a un modelo exponencial, en lugar de un modelo logarítmico, tal y como debería esperarse si el proceso estuviese gobernado solo bajo los principios de la difusión.

I.3 Posibilidades y limitaciones del Complejo Redox

Aunque las aplicaciones disponibles son aún, desde el punto de vista estadístico, insuficientes como basamento experimental de las regularidades empíricas formuladas matemáticamente, no obstante, ellas permiten *a priori* el establecimiento de un conjunto de posibilidades y limitaciones del Complejo Redox para cada esfera de aplicación (Tabla I.1, Tabla I.2, Tabla I.3, Tabla I.4):

Tabla I.1. Posibilidades y limitaciones del Complejo Redox para la exploración de hidrocarburos.

Exploración de hidrocarburos	
Posibilidades	Limitaciones
● Reconocimiento y cartografía detallada de la proyección vertical de la ocurrencia y estimación, de manera indirecta y aproximada, de la calidad del hidrocarburo. ● Determinación aproximada de la profundidad de la ocurrencia y del posible tipo de trampa estructural. ● Estimación volumétrica aproximada de la ocurrencia a partir de los resultados del reconocimiento.	● Existencia de varios niveles de hidrocarburos superpuestos (incluye casquetes de gas). ● Falta de sello o el mismo está muy fracturado. ● Presencia de zonas reductoras superficiales de diversa naturaleza. ● Predominio de la respuesta litológica de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral. ● Existencia de una cobertura transportada reciente (menor de 10 años).

Tabla I.2. Posibilidades y limitaciones del Complejo Redox para la exploración de minerales metálicos.

Exploración de minerales metálicos	
Posibilidades	Limitaciones
● Reconocimiento y cartografía detallada de la proyección vertical de la ocurrencia. Estimación, de forma aproximada, de su composición y calidad de la misma. ● Determinación aproximada de la profundidad, buzamiento y extensión vertical del cuerpo mineral principal. ● Estimación aproximada de recursos. ● Evaluación de la presencia de mineralización primaria debajo de una zona de oxidación o una escombrera.	● Existencia de cuerpos minerales primarios superpuestos. ● Presencia de zonas reductoras superficiales de diversa naturaleza. ● Predominio de la respuesta litológica de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral. ● Existencia de una cobertura transportada reciente (menor de 10 años).

Estudios medio-ambientales	
Posibilidades	Limitaciones
• Reconocimiento y cartografía detallada de la zona contaminada, al permitir establecer su naturaleza (superficial o subsuperficial) y grado. • Determinación aproximada de la profundidad de la fuente contaminante subsuperficial.	• Presencia de zonas reductoras u oxidantes superficiales de diversa naturaleza. • Predominio de la respuesta litológica de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral. • Presencia de una cobertura transportada reciente (menor de 10 años).

Tabla I.3. Posibilidades y limitaciones del Complejo Redox para estudios medio-ambientales.

Estudios arqueológicos	
Posibilidades	Limitaciones
• Localización planimétrica de los enterramientos metálicos y estimación de su composición. • Determinación aproximada de la profundidad de los objetos.	• Presencia de zonas reductoras u oxidantes superficiales de diversa naturaleza. • Predominio de la respuesta litológica de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral.

Tabla I.4. Posibilidades y limitaciones del Complejo Redox para estudios arqueológicos.

I.4 Metodología del Complejo Redox

Lo primero que se realiza es el acondicionamiento correcto del terreno para proceder después a las mediciones. Se elimina la capa vegetal junto con los 2-3 centímetros más meteorizado del suelo, en un área cuadrada con un lado aproximado entre 50 y 60 centímetros. En la **Figura I.4** se muestra la vista vertical de la preparación del suelo con las dimensiones aproximadas. Con posterioridad se descompacta el suelo en una profundidad entre 20-30 centímetros (**Figura I.5**). Esto es para propiciar tanto, la colocación de los electrodos para las observaciones del Potencial Redox, las mediciones de la Susceptibilidad Magnética con el kappámetro y la posterior toma de muestra de suelo para la Pedogeoquímica (**Figura I.6**). Este trabajo es realizado por el auxiliar del equipo.

Para la medición *in situ* del Potencial Redox en suelos (Uredox) se utilizan dos electrodos conectados a un milivoltímetro digital de alta impedancia de entrada (sensibilidad 0.1 mV): uno inerte de platino (**Figura I.7a**) y otro de referencia de cobre (electrodo no polarizable-comercial) (**Figura I.7b**) ubicados muy próximos, en posición vertical relativa, dentro de un hoyo de 10-30 cm de profundidad. La comunicación iónica que cierra el circuito se garantiza a través de la cerámica porosa del electrodo de referencia (**Figura I.8**). Primero se coloca el electrodo inerte de platino (Redox) (**Figura I.9-1**) y con posterioridad el Electrodo de referencia de Cu (**Figura I.9-2**) al quedar el dispositivo como se muestra en la **Figura I.9-3**.



Figura I.4. Área de suelo en la que se elimina la capa vegetal junto con los dos o tres centímetros más superficiales de suelo.



Figura I.5. Descompactación del suelo entre 20-30 centímetros de profundidad.



Figura I.6. Muestra de suelo recogida para la determinación en el laboratorio del contenido metálico.

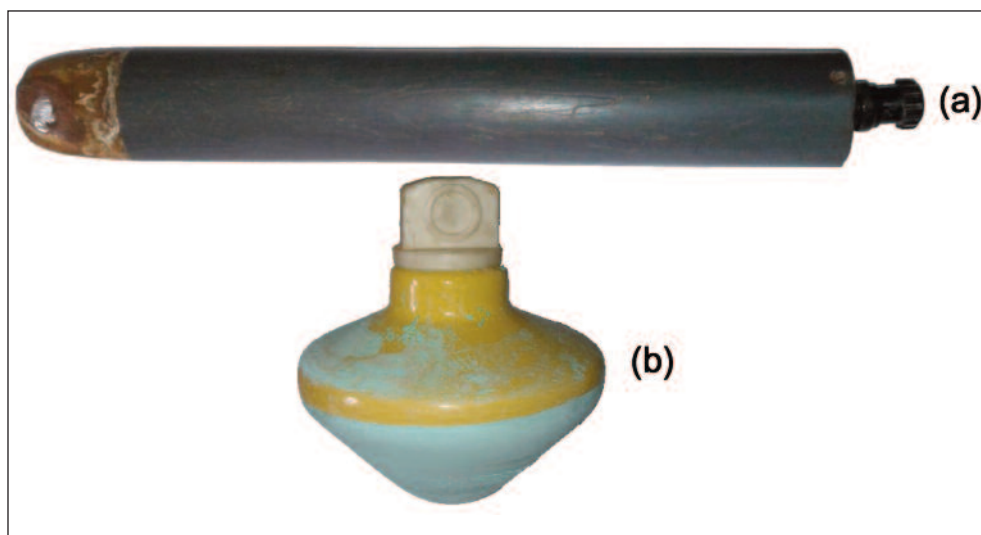


Figura I.7. Electrodos conectados a un milivoltímetro digital de alta impedancia de entrada (sensibilidad 0.1 mV). Uno inerte de platino (a) y otro de referencia de cobre (electrodo no polarizable-comercial) (b).

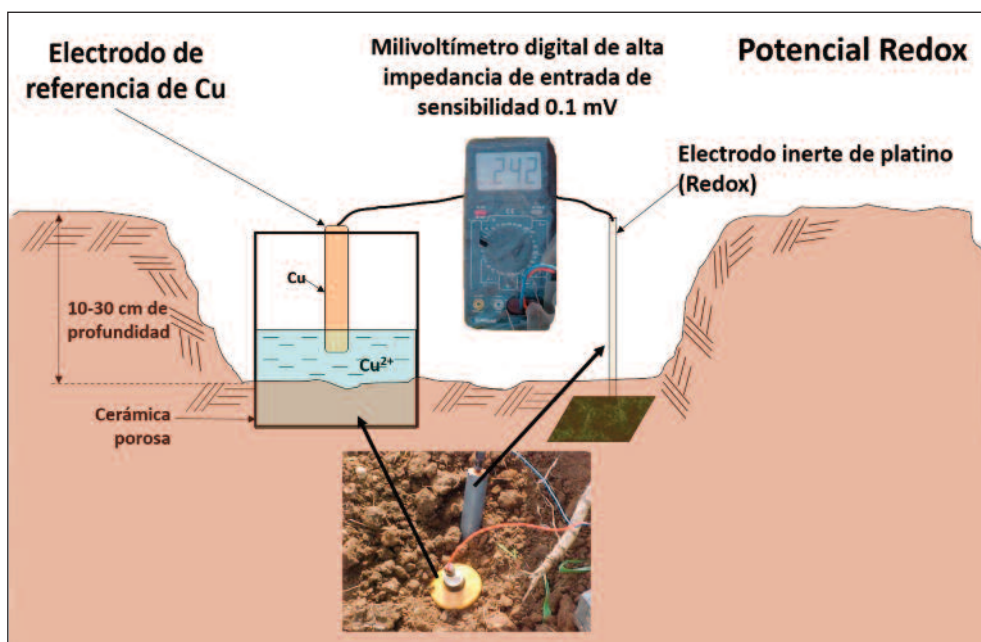


Figura I.8. Esquema de medición in situ del Potencial Redox en suelos (Uredox)

Las mediciones con el dispositivo descrito tienen un comportamiento transiente (**Figura I.9**), determinándose el potencial mediante un algoritmo a partir de cinco lecturas con una diferencia de tiempo entre ellas de un minuto.

Las mediciones se realizan también en el laboratorio, al emplear un equipo comercial de celda Platino-Calomel, en muestras de suelos, roca o cualquier otro material sólido pulverizado. Si las mediciones se realizan en más de una línea, solo una parte (30-50 %) de las muestras tomadas de los puntos de observación se someten además, al estudio de la Reflectancia Espectral y al Análisis Químico de elementos metálicos, en el cual, para este úl-

timo, se utilizan digestiones convencionales y la Espectroscopia con ICP. La calidad de las observaciones de Potencial Redox se evalúa a partir del error absoluto en la determinación del potencial, al considerar un 10 % de mediciones de repetición efectuadas en los mismos hoyos (o muestras) utilizados para las mediciones ordinarias. La precisión aceptada para las aplicaciones descritas no superará los 10- 5 mV. La falta de repetibilidad de las mediciones en días diferentes se resuelve con la reducción por el Nivel de Fondo y de la repetición de no menos de cinco puntos del día anterior si las observaciones del perfil no fueron concluidas.

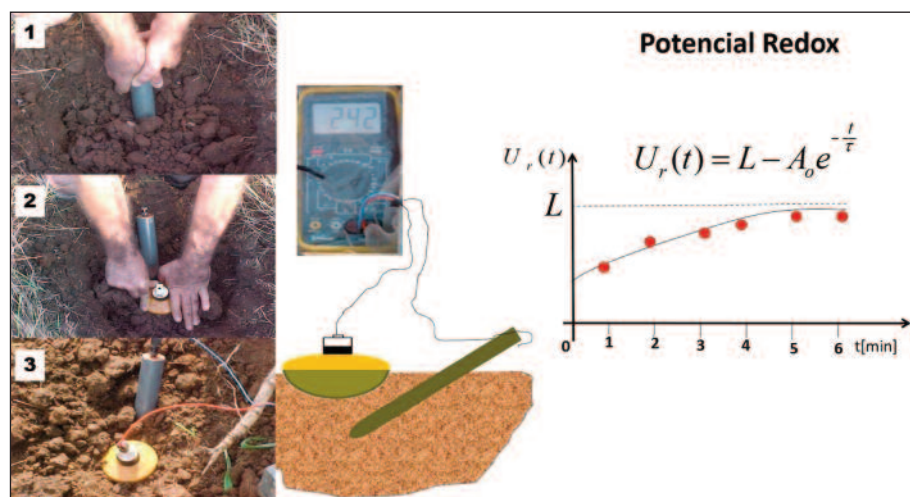


Figura I.9. Comportamiento transiente, de las observaciones del Potencial Redox.

La medición de la Susceptibilidad Magnética (Kappa) se realiza con un kappámetro KT-10 (sensibilidad 1×10^{-5} SI) (**Figura I.10**), al efectuar siete lecturas en el piso y paredes del hoyo (**Figura I.11**) o en muestras tomadas de él, con un peso aproximado de 150-200 g las cuales son promediadas también (**Figura I.12**). La calidad de las observaciones de campo se evalúa a partir del error relativo en la determinación del valor medio de Kappa, al considerar un 10 % de mediciones de repetición en los mismos hoyos (o muestras). La precisión aceptada no superará el 10-15 %.

La medición de la Reflectancia Espectral (RE) se realiza con el Radiómetro Multiespectral CROPSCAN Modelo MSR5, de cinco bandas (485, 560, 660, 830 y 1 650) con lecturas en la primera banda sobre muestras con un peso mínimo de 150 g, al emplear un diseño preparado de forma especial para esos efectos (luz solar, muestra distribuida según un círculo de 15-20 cm de diámetro sobre una superficie negra y sensor ubicado verticalmente a 30-40 cm sobre la muestra) (**Figura I.13**). La calidad de las observaciones se evalúa a partir del error absoluto en la determinación de la Reflectancia Espectral para la primera banda, al considerar un 10 % de mediciones repetidas al término del trabajo en el día. La precisión aceptada no superará el 0.5 %.



Figura I.10¹. Kappámetro KT-10 para medir la susceptibilidad magnética.



Figura I.11. La medición de la Susceptibilidad Magnética (Kappa) se obtiene al promediar siete lecturas en el piso y paredes del hoyo.



Figura I.12. Otra forma de obtener los valores de la Susceptibilidad Magnética (Kappa) es a partir de las observaciones de las muestras tomadas para la Pedo-geoquímica² con un peso aproximado de 150-200g. Se promedian siete lecturas.

¹ Tomado del Manual de TerraPlus (Geophysical Equipment Supplier) The Use of Magnetic Susceptibility of Rock in Geological Exploration, de Frantisek Hrouda, Marta Chlupáková and Martin Chadima).

² Esta variante imprime mayor celeridad a las mediciones de los atributos del Complejo Redox, pues reduce el tiempo de estancia en el campo.

Figura I.13. La medición de la Reflectancia Espectral a la muestra de suelo se realiza con el Radiómetro Multiespectral CROPSCAN Modelo MSR5.



I.5 Libreta de campo del Complejo Redox

Fue diseñada una estructura de libreta de campo para anotar el número de la muestra y los valores de los atributos del Potencial Redox y la Susceptibilidad Magnética. Además de la anotación de la metadata correspondiente como son: Perfil, Sector, Orientación del perfil (Acimut), Paso de medición, Hora de comienzo y término de las mediciones del día, Fecha de las mediciones, Cantidad de puntos físicos medidos, Cantidad de puntos de control y Nombre del operador de los equipos.

La libreta de campo se ha preparado para anotar los seis valores del Potencial Redox a lo largo del transiente, además del valor L (**Expresión I.1**), el valor reducido y el valor después de algún eventual filtrado.

Para la Susceptibilidad Magnética la libreta de campo tiene preparada hasta siete cuadros para recoger los valores medidos en una estación, uno para su valor promedio y otro para el valor normalizado para cada estación y uno para el valor del Nivel de Fondo relativo al perfil. Las coordenadas serán tomadas en cada punto de estación. Primero *in situ* se toman las lecturas de coordenadas geográficas del GPS y después, en el gabinete se transforman a coordenadas planas Lambert. Las cual también será recogida en la libreta.

I.6 Equipamiento del Complejo Redox

El equipamiento del Complejo redox consta de:

- Equipos de cómputo

- Instrumentos de medición
- Herramientas
- Insumos

Figura I.14. Facsímil de la doble hoja de la libreta de campo para las anotaciones de las observaciones de campo del Complejo Redox

Cada uno de estos elementos se destacan en las siguientes tablas, donde se especifica para cada uno de ellos la unidad de medida y la cantidad.

EQUIPOS DE CÓMPUTO

Descripción	UM ³	Cantidad
LapTop (I7, HD 1Tb, 32Mb RAM)	u	1

INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Descripción	UM	Cantidad
GPS	u	1
Multímetro Digital de Precisión (grande)	u	1
Kappámetro KT-10	u	1
Radiómetro Multiespectral (hasta 2.4 μm)	u	1
Electrodos no polarizables	par	5
Protector de voltaje	u	1
Cronómetro digital	u	1

³ Unidad de Medida

HERRAMIENTAS

Descripción	UM	Cantidad
Lima	u	1
Guataca	u	1
Pico de pala ancha	u	1
Soldador eléctrico	u	1
Pinza de corte	u	1
Cuchilla de electricista	u	1
Alicate	u	1
Juego de destornilladores	u	1

INSUMOS

Descripción	UM	Cantidad
Estaño para soldar	rollo	1
Pasta ácida para soldar	rollo	1
Cabo para pico	u	1
Estuche para Electroodos no polarizables	u	1
<i>Mouse</i>	u	1
CDs R	caja	3
Memoria <i>Flash</i> (1 Gb)	u	2
Matachispas (extension de computadora)	u	1
Papel de esmeril	hoja	10
Tubo eléctrico (Plástico) 2 pulgadas de diámetro	1 m	1
Sulfato cúprico pentahidratado	kg	5
<i>Plot</i> (Conectores eléctricos)	u	20
Resina Epóxida	litro	1
Acido nítrico concentrado	litro	2
Estuche para herramientas	u	1
Cable para conexiones (No. 18)	m	5
Conexiones eléctricas (espigas circulares o machos)	u	6
<i>Tape</i> plástico	rollo	3
Baterías de 9 volt.	u	4
Baterías de 1.5 volt (AA)	u	12
Maleta para equipamiento	u	1
Cepillo pequeño	u	1
Caja de madera larga para trabajos de campo	u	1
Caja de madera pequeña para trabajos de campo	u	1
Sacos de muestras (pequeños)	u	500
Sacos grandes de <i>nylon</i>	u	20
Botellón plástico para agua destilada (20 litros)	u	1
Botellón plástico para agua destilada (5 litros)	u	1

I.7 Equipo de trabajo del Complejo Redox

El equipo de trabajo del Complejo Redox está conformado por tres personas (Figura I.15):

- Auxiliar. Preparará el terreno para la colocación correcta de los electrodos en las observaciones del Potencial Redox, las mediciones de la susceptibilidad magnética y la toma de la muestra de suelo.
- Calculista. Llenará las hojas de campo a partir de los valores medidos *in situ*, además obtener las coordenadas obtenidas con el GPS.
- Instrumentista. Manipulará los instrumentos del Complejo Redox para las mediciones del Potencial Redox y la Susceptibilidad Magnética.

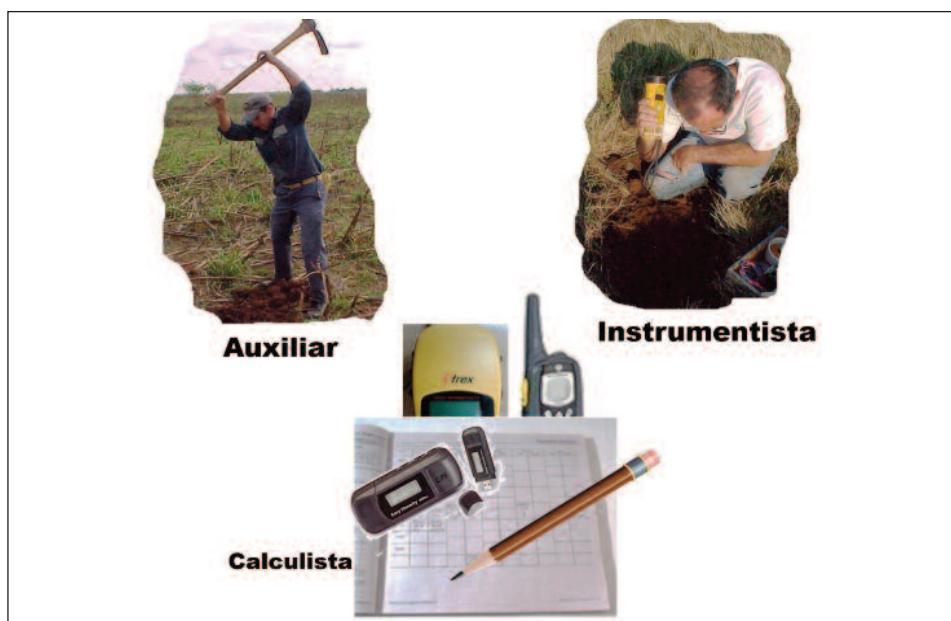


Figura I.15. Esquema que indica la composición del equipo del Complejo Redox

I.8 Interpretación de los datos del Complejo Redox

La interpretación cualitativa de los datos del Complejo Redox involucra la identificación del incremento en el suelo de los elementos metálicos constituyentes básicos (del reservorio, de la mena, de la contaminación o del objeto metálico) que migran desde la fuente, con respecto al Nivel de Fondo local de los elementos químicos característicos de los suelos residuales (cortezas de intemperismo), los cuales pueden estar afectados por diversos tipos de alteraciones vinculadas con la propia fuente. Esto es válido para los atributos medidos (Uredox, Kappa y RE) donde el problema de la interpretación cualitativa considera la identificación, en términos de gradientes (incrementos o decrementos respecto al Nivel de Fondo local) del comportamiento de cada atributo ante la contribución anómala de los elementos metálicos constituyentes básicos provenientes de la fuente.

Por este motivo es pertinente tratar con atributos reducidos o normalizados con relación al Nivel de Fondo local (en dependencia de que la distribución característica para el atributo medido sea normal o lognormal). Un aspecto de gran importancia resulta, la objetiva y correcta determinación de los diferentes niveles de fondo, los cuales determinan en última instancia, la precisión de las estimaciones cuantitativas. Es por eso, que los autores hayan diseñado un único y sofisticado algoritmo que permite la determinación del Nivel de Fondo de todos los atributos considerados. Por otra parte, el Nivel de Fondo varía de modo espacial dentro de los límites de la ocurrencia y su periferia, al ser mayor sobre la parte central (más próxima a la superficie, potente o enriquecida) de la misma y disminuye paulatinamente, hacia el exterior. De ese modo, un criterio cualitativo para valorar la proximidad a una ocurrencia (o a sus partes más próximas a la superficie, con mayor espesor o enriquecidas) es el gradual incremento de los niveles de fondo de los elementos metálicos constituyentes básicos o la disminución progresiva del Nivel de Fondo del Potencial Redox (aumento del ambiente reductor).

La interpretación cualitativa de los diferentes atributos (reducidos o normalizados) del Complejo Redox exhibe sus propias particularidades, las cuales se resumen en:

- La Susceptibilidad Magnética Normalizada por el Nivel de Fondo local (K_n) exhibe máximos asociados a la columna de ambiente reductor sobre reservorios de hidrocarburos, ocurrencias minerales y contaminaciones al nivel del manto freático, en modo fundamental, debido a que este ambiente reductor favorece la conversión de los minerales de hierro no magnéticos (hematita, pirita) en variedades magnéticas diagenéticas más estables (magnetita, maghemita, pirrotina y griegita). De forma frecuente se observan máximos o mínimos de naturaleza litológica (zonas con alteraciones magnetíticas y suelos ferralíticos, suelos carbonatados, caolinizados y silíceos, entre otros). La amplitud y morfología de los máximos de interés es función de las características de la ocurrencia.
- El Potencial Redox Reducido por el Nivel de Fondo local (U_r) exhibe mínimos (columnas reductoras) asociados a reservorios de hidrocarburos, ocurrencias minerales y contaminaciones al nivel del manto freático, además de zonas de ambiente reductor superficial. Sobre reservorios con hidrocarburos ligeros, el potencial presenta un carácter de mínimo desarticulado, con máximos locales asociados a los microescapes gaseosos. Sobre escombreras, zonas de oxidación de ocurrencias minerales, contaminaciones metálicas

superficiales y objetos arqueológicos muy próximos a la superficie, se observan máximos de potencial. La amplitud y morfología de las anomalías de interés es función de las características de la ocurrencia. El Potencial Redox Reducido resulta insensible a las variaciones del relieve y la tectónica, al ser el Nivel de Fondo del potencial característico del tipo de ambiente geológico (volcánico, oceánico, sedimentario y/o metamórfico). Aunque en Cuba por lo general, los suelos estudiados son del tipo residual, se dispone de una experiencia exitosa sobre una cobertura transportada reciente (exótica), en el caso del yacimiento de petróleo Varadero. Las fuentes de ruido más importantes conocidas hasta el presente son las zonas cenagosas secas, las acumulaciones de material orgánico, los aluviones con alto contenido de elementos metálicos, los cuales producen anomalías muy intensas (mayor e igual que 100 mV) de gradientes pronunciados (mayor que 1.5 mV/m) y simétricos, algunas variaciones litológicas (de suelos) producen anomalías, pero de orden menor.

- La Reflectancia Espectral Reducida por el Nivel de Fondo local (REr) exhibe, como regla, mínimos asociados al incremento del contenido de los elementos metálicos en el suelo, como consecuencia de su oscurecimiento. Con frecuencia, minerales como el cuarzo, la calcita, el caolín, el grafito, la hematita y otros, de naturaleza litológica, son los responsables de que se observen máximos o mínimos que no son de interés. La amplitud y morfología de las anomalías de interés es función de las características de la ocurrencia.
- El contenido normalizado por el Nivel de Fondo local de los elementos metálicos constituyentes básicos en el suelo (Cn) exhibe incrementos sobre la proyección vertical de las ocurrencias de hidrocarburos y minerales (incluyendo zonas de oxidación) sobre contaminaciones metálicas y de hidrocarburos y objetos arqueológicos de naturaleza metálica. La relación entre los distintos elementos mayoritarios o constituyentes básicos es función de la composición de la ocurrencia, contaminación u objeto metálico. La amplitud y morfología de los incrementos depende de las características de la ocurrencia. Para las contaminaciones superficiales el grado es determinable de forma directa a partir del dato químico.

I.9 Aparato matemático para la interpretación cuantitativa

Potencial Redox Reducido - expresiones matemáticas:

- 1 Expresión general de la Respuesta Transiente de la Medición *in situ* del Potencial Redox en suelos:

$$U_r(t) = L - A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [1.1]$$

Donde A_0 y τ son función lineal (inversamente proporcional) de la Conductividad Reducida (Cr) del suelo, resultandos indicativos de mineralizaciones metálicas muy próximas a la superficie (valores mínimos de A_0 y τ , similares y repetidos en estaciones contiguas). La dependencia lineal entre A_0 y Cr (para valores de Cr entre 25 y 105 mhos) es la siguiente:

$$C_r = -2.9261A_0 + 103.01 \quad [1.2]$$

2. Expresión general de la Dependencia del Potencial Redox Reducido con la Profundidad (H), el Espesor (P) y la Concentración de Metal de la fuente (C):

$$U_r(H, P, C) = (212e^{-\frac{80}{H}})H^{-0.15}e^{-0.0005H}e^{\frac{P}{H}}e^{\frac{\Delta C}{\Delta H}} \quad [1.3]$$

Donde

$$A = (212e^{-\frac{80}{H}}) \quad [1.4]$$

El uso de esta expresión general varía en dependencia de la esfera de aplicación (petróleo, minerales y medio-ambiente/arqueología), para lo cual se consideran tres niveles medios de profundidad: 1000 m, 100 m y 10 m, que al ser evaluados en la expresión, se obtienen los valores del coeficiente A ya conocido por vía empírica: 196, 95 y 0.07. También el tipo de aplicación (profundidad media de la fuente) permite asumir consideraciones que simplifican la expresión. Así, para petróleo, se asumirá que la concentración metálica en la fuente es constante ($\Delta C/\Delta x = \Delta C/\Delta y = \Delta C/\Delta z = 0$) y el espesor del reservorio es muy pequeño en comparación con su profundidad, de ahí que la expresión quede:

$$U_r = 196H^{-0.15}e^{-0.0005H} \quad [1.5]$$

La expresión I.5 es válida para hidrocarburos pesados, donde son características las anomalías negativas de intensidad mayor de 30 mV. Para los hidrocarburos pesados-ligeros y ligeros, donde son características las anomalías negativas de amplitud menor a 30 mV se cumple la expresión:

$$U_r = (5e^{-\frac{80}{H}})H^{0.25}e^{0.0005H} \quad [1.6]$$

Para H=1000 m, el Coeficiente A es 4.6.

En los casos de las aplicaciones de minerales y medio-ambiente/ar-

queología, las simplificaciones anteriores no resultan válidas, por lo que es necesario disponer de información complementaria sobre el espesor y la concentración metálica del objeto a fin de poder reducir la ambigüedad en la interpretación.

Contenido de elementos químicos – expresiones matemáticas:

Expresión General de la Dependencia del Contenido Normalizado de Elementos Químicos en el suelo con la Profundidad, el Espesor y la Concentración de Metal de la fuente:

$$C_n = (1039e^{-\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{C \frac{\Delta C}{\Delta H}} \quad [1.7]$$

donde F es el Nivel de Fondo local.

El uso de esta expresión al igual que la correspondiente al Potencial Redox (I.3), depende de la esfera de aplicación y como en el caso anterior, al considerar los mismos tres niveles medios de profundidad: 1000 m, 100 m y 10 m, se obtienen al evaluar los valores del Coeficiente A: 958, 467 y 0.35. También resultan válidas las simplificaciones de la expresión I.7 en las aplicaciones de petróleo donde, al hacerse la unidad los dos últimos términos, queda:

$$C_n = 958 \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} \quad [1.8]$$

De igual manera, para las aplicaciones de minerales y medio-ambiente/arqueología las simplificaciones anteriores no son válidas, al resultar necesario disponer de información complementaria para reducir la ambigüedad en la interpretación.

En las aplicaciones de petróleo se definió un parámetro indicador de la calidad metálica del hidrocarburo, el cual, por su magnitud resulta semejante al grado API de madurez del hidrocarburo y se denominó Grado Redox o Equivalente Inorgánico del Grado API:

$$^{\circ}REDOX = 2.69F^{-0.25} e^{-0.0005F} \quad [1.9]$$

donde

$$F = F_{Ni}F_VF_{Fe}F_{Zn}(10^{-8}) \quad [1.10]$$

La unidad de medida de los valores de niveles de fondo de los distintos elementos es en partes por millón (ppm).

En las aplicaciones de minerales y medio-ambiente/arqueología como indicador de la calidad metálica de la fuente superficial se utiliza la expresión:

$$Ley_{med} = 10C_{max} \quad [1.11]$$

donde $C_{\max}$ es el valor máximo del contenido en el suelo del elemento constituyente básico en cuestión. En el caso del oro (Au), el factor multiplicativo es 3.2, lo cual se explica por su baja insolubilidad.

Relaciones entre atributos reducidos o normalizados—expresiones matemáticas:

Se ha comprobado la existencia de una dependencia lineal entre la Reflectancia Espectral Reducida (REr) y la Susceptibilidad Magnética Normalizada (Kn) con el Contenido Normalizado de elementos químicos en el suelo (Cn) resultante del Principio de Migración Vertical de Iones Metálicos a partir de la fuente.

La relación de la REr, posee un vínculo genético directo con la presencia del metal, no así la Kn, la cual tiene un vínculo indirecto a través de la formación de minerales magnéticos diagenéticos originados como resultado de la existencia de la «Columna Reductora». En el caso particular de objetivos con yacencia horizontal (cortezas de intemperismo, reservorios de petróleo, lentes de contaminación a nivel del manto freático y rocas asfálticas con yacencia horizontal) posee también una dependencia lineal entre el Potencial Redox Reducido (Ur) y el Contenido Normalizado de elementos químicos en el suelo. La mencionada dependencia lineal entre atributos se expresa, generalmente, en forma de hasta tres rectas, las cuales caracterizan el comportamiento del atributo. Las expresiones de estas relaciones lineales son:

$$Cn = \frac{b_i K_n - (b_i - a_i)}{a_i} \quad [I.12]$$

$$Cn = \frac{b_i RE_r - (b_i - a_i)}{a_i} \quad [I.13]$$

$$Cn = \frac{b_i U_r + a_i}{a_i} \quad [I.14]$$

Esta última expresión es válida solo para objetivos horizontales, donde

$$a_i = \frac{1}{C_n - 1} \quad [I.15]$$

$$b_i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{Kn_i - 1} \\ \frac{1}{REr_i - 1} \\ \frac{1}{Ur_i - 1} \end{array} \right\} \quad [I.16]$$

Al ser i un punto cualquiera de las rectas que definen la dependencia lineal.

A partir de las relaciones anteriores, las expresiones más generales que describen la dependencia de la Kn, la REr y el Ur (objetos horizontales) con los parámetros de yacencia, geométricos y de calidad metálica de las fuentes son:

$$Kn = \frac{b_i - a_i}{b_i} + \frac{a_i}{b_i} \left[(1039 e^{-\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{C \frac{AC}{\Delta H}} \right] \quad [1.17]$$

$$REr = \frac{a_i}{b_i} \left[\left((1039 e^{-\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{C \frac{AC}{\Delta H}} \right) - 1 \right] \quad [1.18]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[\left((1039 e^{-\frac{80}{H}}) \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} e^{C \frac{AC}{\Delta H}} \right) - 1 \right] \quad [1.19]$$

Esta última expresión es válida solo para objetos horizontales.

De las expresiones anteriores se derivan las correspondientes para las aplicaciones de petróleo, a partir de las cuales se determina la profundidad del objetivo:

$$Kn = \frac{b_i - a_i}{b_i} + \frac{a_i}{b_i} (958 \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H}) \quad [1.20]$$

$$REr = \frac{a_i}{b_i} \left[(958 \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H}) - 1 \right] \quad [1.21]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[(958 \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H}) - 1 \right] \quad [1.22]$$

Y para las aplicaciones de minerales, objetivos horizontales, profundos (100 m) y superficiales (10 m), estos últimos válidos también para las aplicaciones medio-ambientales:

$$Kn = \frac{b_i - a_i}{b_i} + \frac{a_i}{b_i} \left(\left\{ \frac{467}{0.35} \right\} \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) \quad [1.23]$$

$$REr = \frac{a_i}{b_i} \left[\left(\left\{ \frac{467}{0.35} \right\} \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) - 1 \right] \quad [1.24]$$

$$Ur = \frac{a_i}{b_i} \left[\left(\left\{ \frac{467}{0.35} \right\} \frac{1}{F} H^{-0.25} e^{-0.0005H} e^{\frac{P}{H}} \right) - 1 \right] \quad [1.25]$$

Estas expresiones permiten la estimación del espesor del objetivo (su variabilidad) bajo las condiciones de una composición metálica homogénea y una profundidad constante del tope de la fuente.

I.10 Fundamento empírico del Complejo Redox

El Complejo Redox ha sido empleado en Cuba (Pardo *et al.*, 1997; Pardo y Stout, 1999; Pardo *et al.*, 2000a; Pardo *et al.*, 2000b; Pardo, 2001; Pardo *et al.*, 2001; Pardo y Stout, 2001; Pardo, 2003; Pardo *et al.*, 2003) en diferentes Áreas de Control (con elevado grado de conocimiento de los objetos de estudio) relacionadas con distintos tipos de yacimientos de petróleo (Cantel, Pina, Va-

radero-Varadero Sur, Jatibonico y Cristales) y de minerales metálicos (Mella, La Unión, Antonio, Little Golden Hill, Florencia-Cuerpos Norte y Sur, Jacinto-Vetas Beatriz y El Limón, Camagüey II, Cuba Libre-Río Negro, Yagrumaje Norte, Camarioca Este, Unión 1, Descanso, Meloneras, Stock Guáimaro y Sigua), los cuales son representantes de una amplia variedad de ambientes geológicos, tipos genéticos, componentes útiles, rasgos estructuro-texturales del reservorio o de la mena, condiciones geométricas y de yacencia, así como de relieve. Las aplicaciones para medio-ambiente y arqueología consideran las zonas perimetrales de las industrias: Fábrica de Baterías Secas «Yara», Siderúrgica Antillana de Acero, Refinería Níco López, Electroquímica de Sagua, Fábrica de Sulfometales y Fábrica de Pinturas Capdevilla, así como la Presa de Colas de Mina Delita y los sitios arqueológicos Jardín Exterior del Castillo de la Fuerza, Caimito y el Valle de los Ingenios. Todas estas investigaciones han servido como base experimental para el desarrollo del aparato matemático expuesto en epígrafe I.10.

I.11 Actualidad científica

Las técnicas no convencionales de exploración geoquímica basadas en el Principio de la Migración Vertical de Iones Metálicos, dentro de las que se encuentran el MMI (Canadá, década de los 90) y el CHIM (Rusia, década de los 80) se emplean como herramientas complementarias de exploración con el propósito de elevar la efectividad geológica de la prospección mineral. En esta misma corriente de exploración se inserta el Complejo Redox.

I.12 Novedad

El Complejo Redox representa una alternativa más económica que las citadas técnicas geoquímicas, dado que no exige del empleo de extracciones selectivas y del ICP de masa para las determinaciones analíticas, al utilizar digestiones convencionales y el uso del ICP Espectral. También este complejo cuenta con un aparato matemático para las estimaciones cuantitativas acerca de las fuentes metálicas y ha demostrado su efectividad en otras esferas de aplicación como la exploración petrolera y los estudios medioambientales y arqueológicos.

I.13 Evaluación económica y contribución social

El Complejo Redox empleado con carácter complementario, dentro de los complejos mínimos de exploración/investigación, eleva la efectividad geológica de las investigaciones y reduce los costos generales, al permitir la optimización de la toma de decisiones y la elevación de la tasa de éxito de la perforación y/o excavación exploratoria.

I.14 Conclusiones

Se da a conocer una nueva tecnología de exploración geofísico-geoquímica no convencional para la detección directa o indirecta, caracterización y evaluación de objetivos de naturaleza metálica, cuyo producto final consiste en un mapa con la cartografía de la proyección vertical del objetivo metálico, una sección central con su geometrización acompañada del comportamiento de los atributos que la caracterizan, los parámetros que definen su naturaleza y calidad metálica y una estimación de recursos. Se recomienda generalizar la aplicación de esta tecnología de exploración en las diferentes esferas de aplicación propuestas a fin de comprobar su validez en la consecución de los objetivos trazados.

I.15 Referencias Bibliográficas

- Birell, R.** 1996. MMI geochemistry: mapping the depths. *Mining Magazine* 174 (5). Pp. 306-307.
- Hamilton, S. M.** 2000. Spontaneous potentials and electrochemical cells. In: *Geochemical Remote Sensing of the Subsurface. Handbook of Exploration Geochemistry*, 7. Elsevier, Amsterdam. pp. 81-119.
- Hamilton, S. M.; E. M. Cameron; M. B. Mc Clenaghan; G. E. M. Hall.** 2004. Redox, pH and SP variation over mineralization in thick glacial overburden (I): methodologies and field investigation at the Marsh Zone gold property. *Geochemistry* 4 (1). pp. 33-44.
- Kelley, D. L.; E. M. Cameron; G. Southam.** 2004. Secondary geochemical dispersion through transported overburden, SEG, Perth. pp. 4
- Mann, A. W.** 1997. The use of MMI in Mineral Exploration. 10th International Gold Symposium. Rio de Janeiro, Brazil.
- Mann, A. W.; R. D. Birrell; M. H. F. Fedikov; H. A. F. de Souza.** 2005. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies and sampling depth for Mineral Exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*, Vol. 5, 3. pp 201-210. Geological Society Publishing House.
- Moon, C. J.; A. Khan.** 1990. Mineral Exploration. *Mining Annual Review* 1990. pp 203.
- Pardo, M. E.** 2004. Informe Final del Proyecto I+D 244 «Estimaciones Cuantitativas por el Complejo Redox en su aplicación a la Prospección Geológica, los Estudios Medio-Ambientales y Arqueológicos», (inédito). Instituto de Geología y Paleontología, La Habana, 27. pp. (38)
- Pardo, M.; R. Stout.** 1999. El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la Kappametria a los fines de la prospección geológica. *Memorias del I Congreso Cubano de Geofísica*, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout.** 2001. El método de Potencial Redox en suelos y su apli-

- cación combinada con la Kappametría a los fines de la prospección petrolífera. Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout; R. Aragón; E. Álvarez; R. Lugo.** 2000(a): El método de Potencial Redox en la prospección de minerales; dos ejemplos: el yacimiento Mella y el Stockwork La Unión. Memorias del IV Congreso Cubano de Geología, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout.** 2000(b). Informe del TTP Aplicación de la medición in situ del Potencial Redox en suelos sobre objetivos de prospección de minerales metálicos e hidrocarburos (inédito). ONRM, La Habana.
- Pardo, M.** 2001. Proyecto de Investigación-Desarrollo (227): Análisis teórico y diseño de los parámetros cuantitativos del Método Redox en áreas de control (inédito). IGP, La Habana.
- Pardo, M.** 2003. Proyecto de Investigación-Desarrollo (244): Estimaciones cuantitativas por el Complejo Redox en su aplicación a la prospección geológica, los estudios medio-ambientales y arqueológicos (inédito). IGP, La Habana.
- Pardo, M.; J. Álvarez; G. Echevarría.** 1997. Técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales para la prospección de hidrocarburos; progresos de su aplicación en Cuba. Memorias del III Congreso Cubano de Geología, Vol. I. pp. 547-550.
- Pardo, M.; R. Stout.** 2003. El Complejo Redox: Estado del Arte en el 2002. Memorias del V Congreso Cubano de Geología, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout; E. Kessell; M. Mugía; M. A. Morales; F. Rojas.** 2001. La nueva técnica geoquímica de Potencial Redox en suelos: Principios y Aplicaciones. Memorias del II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
- Rodríguez, O.** 2005. Manual de Usuario Sistema Redox. Derecho de Autor. Certificación de Depósito Legal Facultativo de Obras Protegidas. CENDA. Registro: 1589-2005.
- Smee, B. W.** 2003. Theory behind the use of soil pH measurements as an inexpensive guide to buried mineralization, with examples. Explore No. 118.

II. Modelo matemático y automatización del Complejo Redox

II. 1 Modelo matemático para la interpretación del Complejo Redox

II.1.1. Introducción.

Existen varias definiciones de Modelos. En su sentido más amplio: un modelo abstrae desde cierto aspecto de la realidad. Identifica objetos, relaciones, propiedades y atributos de los objetos, relaciones entre propiedades de ellos (Steels, 1992). La inteligencia surge de la capacidad de construir y usar modelos, es decir de abstraer. Para Karbach *et al.* (1990) los modelos son una poderosa abstracción que permite reducir la complejidad de la realidad para focalizarse en ciertos aspectos (Karbach *et al.*, 1990). DeMarco (1982) expresa:

«Un modelo refleja, a través de la abstracción de detalle, las características relevantes del sistema en el mundo real».

Concuerdan que un modelo usualmente hace referencia a la noción común de abstracción o idealización de un sistema del mundo real, por lo que se asume la definición:

«...sistema representado en la mente o en la realidad, el cual se encuentra en determinadas relaciones con otro sistema (el original)» (Morales, 1984).

Los modelos matemáticos son aquellos constituidos por ecuaciones, inecuaciones, sus sistemas, gráficas, etc.

En su relación con el objeto original, el modelo posee las condiciones de reflejo o analogía de representación y de extrapolación, es decir, tiene ex-

presada de forma explícita una relación de parecido con el original, lo sustituye en los procesos del conocimiento y permite obtener información del mismo.

Según Kent y Saft (1992) la modelación matemática «es el proceso de imitar la realidad al utilizar el lenguaje de las matemáticas», este lenguaje es lo suficientemente rico como para tratar los más diversos problemas tanto por la materia de su contenido como por su complejidad.

El procedimiento de construcción de un Modelo Matemático efectivo requiere de habilidad, creatividad y evaluación objetiva.

Existen varios criterios sobre las fases o etapas del proceso de modelación, por su simplificación se exponen la propuesta siguiente (Kent y Saft, 1992):

- **Formulación del Problema.** Es la etapa, en la cual se obtendrá toda la información necesaria y organizada para «expresarla» de forma matemática. Para ello ha de tenerse una comprensión del área del conocimiento del problema, lo mismo que de las matemáticas correspondientes. El especialista –máximo responsable- no hará otra cosa que explicar, con el mayor rigor científico con su lenguaje, pero entendible, para los otros el problema a resolver y el medio en que este se ubica (Schulcloper, 1990). En esta etapa, podría ser necesario la entrevista con personas que no sean matemáticos (conocedores del problema) y la lectura de la bibliografía pertinente.
- **Formulación del Modelo.** Es imposible evitar que al menos «de forma ideal» se construya el modelo, a medida que el especialista formule el problema (Schulcloper, 1990). Esta es una de las etapas más difíciles, pues es donde se requiere «traducir» al lenguaje formal de las matemáticas, el problema a resolver. Después de tener el problema formulado, del análisis de este, se decidirá cuáles variables serán consideradas. Se determinará qué características del objeto en estudio serán analizadas y cuáles no, pues en el modelo solo estarán representadas aquellas sobre las que se va a influir y las que se utilizarán para lograrlo. Las variables que se desechan son las que tienen poco o ningún efecto en el proceso. Esta es una de las razones de que un modelo represente al objeto, solo para las características en estudio. Las variables independientes tienen un efecto significativo y servirán como información de entrada para el modelo. Las variables dependientes resultan afectadas por las independientes y son importantes en la solución del problema. Esta etapa suele clasificarse como la de definición de variables del modelo, su importancia está en que de su elección depende la calidad del modelo como tal, no

hay una forma única de escoger las variables de un modelo para el mismo problema, como tampoco la hay para la construcción de este, pero se simplificará mucho el trabajo si se hace con eficiencia. Esto requiere un conocimiento profundo del área y una cabal comprensión del problema.

- Selección del Modo de Solución. En la mayoría de los casos resulta sencillo la selección del Modelo Matemático, pero ocurrirá que se tenga en principio más de una forma de solucionarse el problema y la cuestión sería, cuál de ella ofrecería más eficiencia al modelo, lo cual se expresaría por un proceso de iteración a partir de este punto en adelante.
- Solución del Modelo. Se resuelve el modelo, para lo cual es importante que existan métodos para ello, que no hagan muy difícil obtener la solución. En esta etapa entran a jugar su papel los diferentes medios computarizados.
- Verificación del Modelo. Se verificará si la solución proporciona una respuesta adecuada al problema, pues de lo contrario habría que revisar todo desde el principio y detectar la dificultad. Cuando sea posible, la validez del modelo será corroborada al comparar sus predicciones con datos experimentales. Cada vez que se utilice un modelo se le somete a esa prueba, por lo que el proceso no termina mientras se confirme su carácter cíclico.

Tener en cuenta que un modelo no es la realidad, sino una representación de ella, es decir, con él se estudian algunas de las características del fenómeno y la solución que ofrece se relaciona con estas, si se estudian otras, entonces se reformulará el problema y el modelo. Si el modelo es más refinado proporcionará más información, pero la verdadera prueba es su capacidad de encontrar una respuesta aceptable para el problema en cuestión.

En el proceso de resolución de problemas en que interviene la modelación matemática, se podrán cometer dos tipos de errores: tratar de resolver una situación compleja por métodos empírico intuitivos, al ofrecer una solución burda a un problema que requería un modelo y el otro es, por el contrario, tratar de aplicar un modelo a la solución de un problema para el cual no es requerido.

Se exponen las características de la modelación para las Ciencias Geológicas, cuya disciplina científica pertenece al grupo de las ciencias «poco formalizadas», entre las que están también: la Medicina, la Biología, la Psicología y otras. Estas características hacen particular el proceso de Modelación Matemática, ellas son (Schulcloper, 1990):

- No conocimiento de expresiones analíticas de los vínculos o leyes que rigen el comportamiento de los objetos en el universo en cuestión.
- No se posee toda la información sobre los factores que influyen en fenómenos que se estudian y en la mayoría de los casos se desconoce el grado de influencia de los mismos.
- Por lo general se trabaja sobre la base de criterios múltiples para la solución de los problemas, además de que la confiabilidad de dicha solución es variable y en casi ningún caso, absoluta.
- Es común que los especialistas del área no tengan una única explicación (si existe) de las conclusiones a las que arriban.
- Por lo general los especialistas en muchos problemas trabajan sobre la base de analogías, es decir, precedentes (parciales o totales) de experiencias y observaciones acumuladas.
- En los problemas, al describir sus objetos, están presentes tanto variables cualitativas como cuantitativas y con frecuencia, de forma simultánea.
- El análisis de los valores de todas estas variables es cualitativo en lo fundamental y se apoya en muchos casos en inferencias no modelables de forma necesaria con la lógica de las matemáticas clásica.

II.1.2. El Proceso de Modelación Matemática del Complejo Redox.

La característica fundamental del proceso de Modelación Matemática del Complejo Redox, es la modelación de la experiencia empírica de este método reunida en un Experto.

En la etapa de Formulación del Problema se acopiaron las fuentes de conocimiento, entre ellas la documentación disponible y se focalizaron las que estaban pendientes, de forma principal por vía *Internet* y otros, pero en lo fundamental, esta primera parte se desarrolló en exhaustivas entrevistas con el Experto.

Se estudió el dominio a partir de estas fuentes, al lograr una familiaridad con la especialidad y se seleccionaron los elementos clave ya con orientación hacia la identificación de componentes potenciales de modelado.

Las componentes identificadas fueron:

1. Modelación para la determinación del Nivel de Fondo de los atributos.
2. Modelación del Proceso de Interpretación.

II.1.3. Determinación del Nivel de Fondo de los atributos.

Determinar el Nivel de Fondo de un atributo en una serie de observaciones

secuenciales en el Complejo Redox, es una tarea por lo general compleja, dada la insuficiente cantidad de valores de fondo presentes, la cual impide el uso de las herramientas estadísticas convencionales. La solución en este caso está dada, en buena medida, por una significativa carga subjetiva, la cual, en la mayoría de los casos, no es aplicada de forma homogénea. Esto hace que se traten de establecer reglas numéricas generales que modelen su determinación a partir de la experiencia del personal especializado.

El Principio Científico-Metodológico de Superposición, hace que el resultado de la observación de un atributo en un punto dado del espacio, sea equivalente a una suma lineal de los efectos de cada una de las fuentes existentes a su alrededor. Por lo que, separar estas contribuciones por categorías de causas es un problema difícil, pues requiere de datos adicionales que, de modo general, son pocos o no existen. De ahí que resulte tan importante conocer el Nivel del Fondo de un atributo.

Determinar el Nivel de Fondo de un atributo en una serie de observaciones secuenciales en la Complejo Redox, es una tarea en general compleja y que está dada por una buena dosis de influencia subjetiva y en muchos casos, esta subjetividad no es aplicada de forma homogénea en un mismo problema. Esto hace que se traten de establecer reglas numéricas generales para su determinación a partir de la experiencia del personal especializado.

El Nivel de Fondo de un atributo bien establecido permite conocer la existencia o no de anomalías, que serán aisladas y analizadas en su forma y magnitud, al lograr segregar el efecto de las posibles fuentes de interés. Por lo que se necesita un algoritmo que ofrezca los pasos ordenados para la determinación numérica del Nivel de Fondo de un atributo en observaciones secuenciales lineales en la Complejo Redox, basándose en el análisis heurístico de la experiencia. Entre los problemas a resolver están:

1. Detección automática de elementos ráfagas dentro de la secuencia de observaciones.
2. Determinación de qué parte del total de observaciones se tomará para el análisis.
3. Determinación del proceso de depuración final del grupo de observaciones seleccionadas para establecer el Nivel de Fondo.

Se parte siempre de atributos con la característica de ser observados de forma secuencial. Estos datos son un conjunto de observaciones a lo largo de una dirección. En esta estructura de observación, no solo es importante los valores de los atributos en cada uno de los puntos de la sucesión sino, también, la posición de cada uno de ellos en su relación con los datos vecinos: delante y

detrás de cada uno. En la **Figura II.1**, se muestra un ejemplo de secuencia de observaciones de un atributo dado.

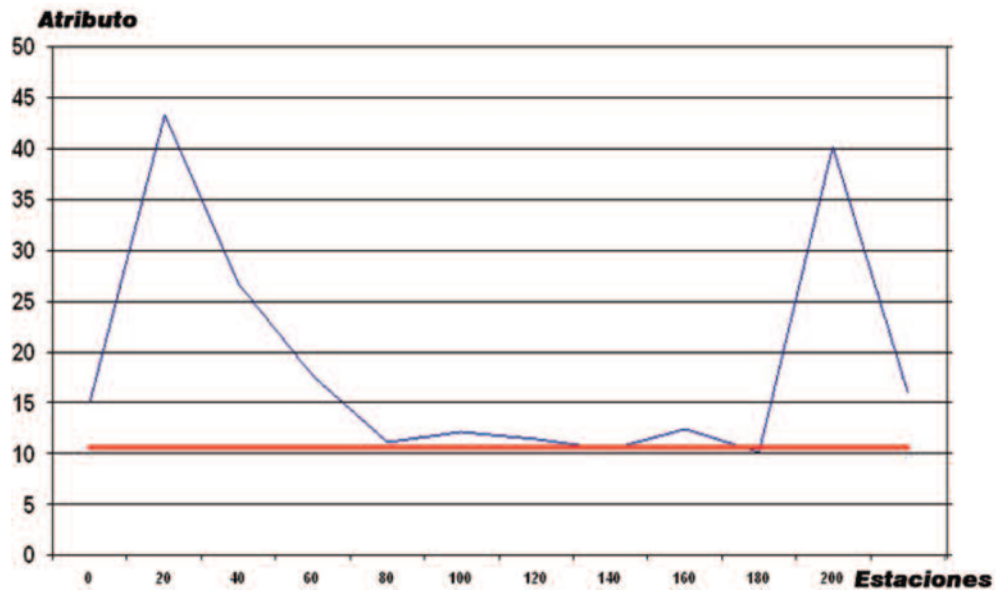


Figura II.1. Ejemplo de secuencia de observaciones de un atributo dado

El primer aspecto se refiere a la detección automática de algún elemento de la secuencia de valores del atributo que, por errores de medición o de índole natural, su valor sea demasiado grande o pequeño con respecto a los valores que lo antecede y precede (elemento ráfaga). Aquí hay dos problemas que son necesarios aclarar: primero, cuán grande será el valor ráfaga respecto al entorno para que sea considerado como tal y segundo, cuán amplio será el entorno alrededor del punto sobre el cual se compara para determinar su categoría de ráfaga.

Según la experiencia, la magnitud del valor considerado ráfaga con respecto a su entorno, estará relacionado mediante un coeficiente o índice que dependerá del nivel medio general para la secuencia de observaciones del atributo, es decir, del Valor Medio del Perfil. En la **Tabla II.1** se muestra la relación, a partir del Criterio Experto, del coeficiente, el cual debería aplicarse para determinar si un elemento es considerado ráfaga respecto a su entorno.

Tabla II.1. Relación entre el coeficiente a aplicar, para determinar si un elemento es considerado ráfaga respecto a su entorno con relación al Valor Medio del Perfil.

Valor medio de las observaciones	Coeficiente
0.1	0.8
1	0.6
10	0.4
100	0.2
300	0.05

Este coeficiente representa la magnitud que sirve para establecer un intervalo alrededor del valor del punto, es decir, si en la secuencia de datos uno de los

elementos posee el valor de X_i y le corresponde un coeficiente de C_i , entonces para que no sea considerado como elemento ráfaga, el elemento predecessor cumplirá la condición:

$$X_i - \frac{C_i X_i}{2} \leq X_{i-1} \leq X_i + \frac{C_i X_i}{2} \quad [II.1]$$

donde X_i es el elemento que se analiza.

Para este análisis las observaciones del Perfil estarán ordenadas de modo creciente. Con vista a la generalización de la **Tabla II.1**, se estableció una regresión con un Coeficiente de Correlación de 0.996 y cuya expresión fue:

$$y = 0.0915 \log(x) + 0.5986 \quad [II.2]$$

donde X es el valor del elemento del Perfil

Y es el valor del coeficiente C_i

En la **Figura II.2** se presenta el gráfico de la regresión correspondiente a la **Tabla II.1**.

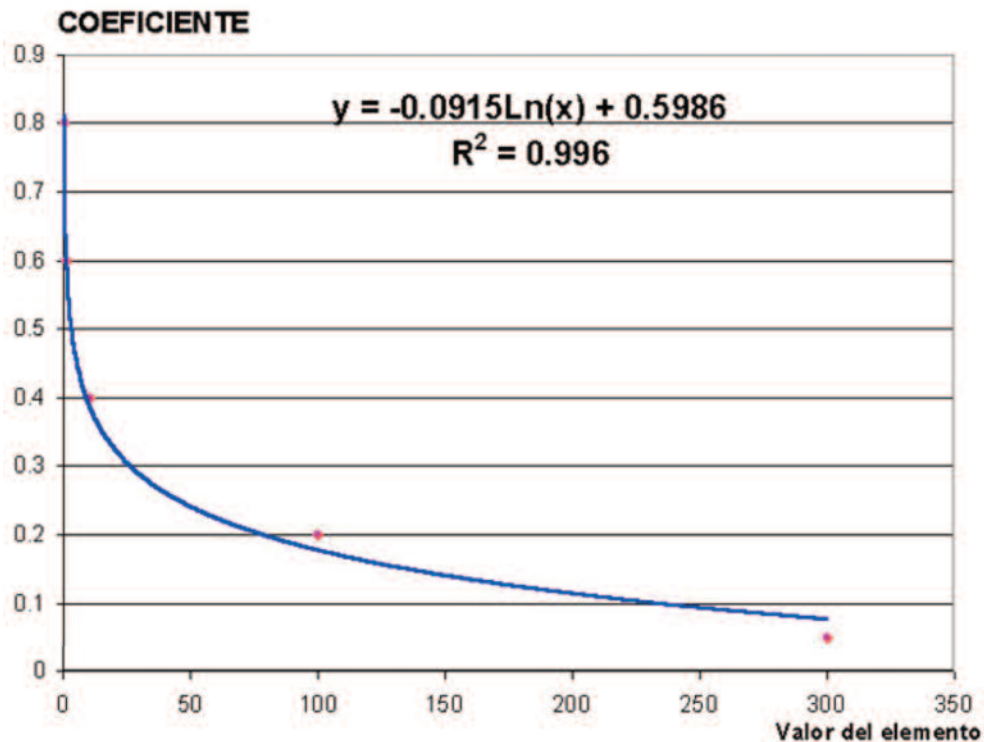


Figura II.2. Regresión resultante de los valores de la Tabla II.1

En el segundo aspecto, la experiencia práctica señala una relación entre el número total de elementos del Perfil (Línea) y el número de las observaciones necesaria para el análisis del Nivel de Fondo. Esta relación se muestra en la **Tabla II.2**.

Tabla II.2. Relación entre el número total de elementos del Perfil (Línea) y el número de observaciones necesarias para el análisis del Nivel de Fondo.

No. de elementos del Perfil	No. de observaciones tomadas
5	2
10	3
15	4
20	5
25	6
30	7

La regresión formulada para establecer la dependencia expresada en la **Tabla II.2** es exacta, es decir, como se apreciará en la **Figura II.3**, la regresión establecida posee un Coeficiente de Correlación igual a uno y su función lineal es:

$$y = 0.2x + 1 \quad [\text{II.3}]$$

donde X es el número de elementos del Perfil y Y es la Fracción de observaciones tomadas.

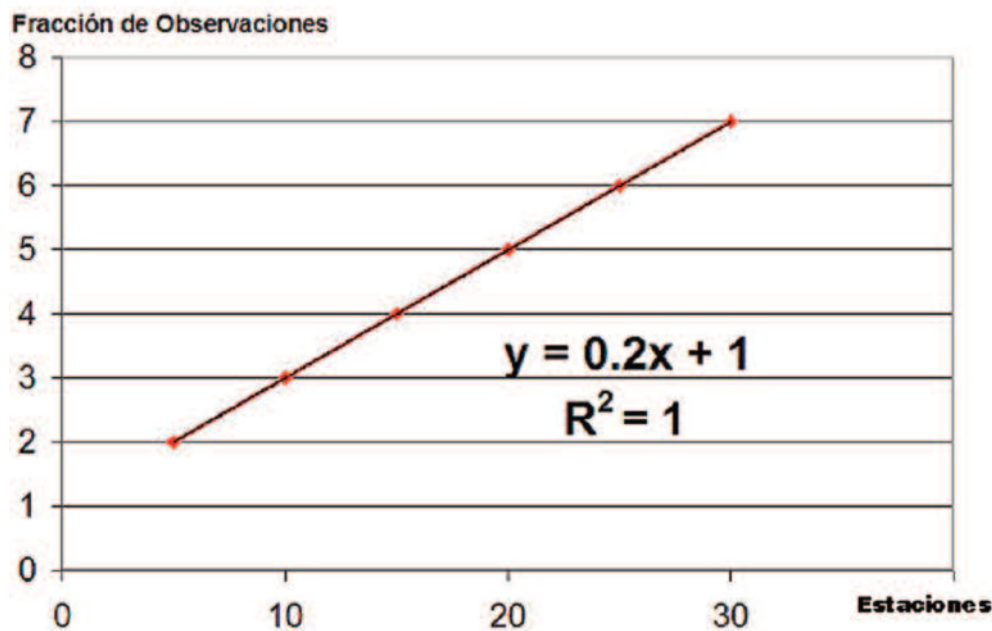


Figura II.3. Regresión resultante de los valores de la **Tabla II.2**.

El valor de la función será un número entero, por lo que se decide, a partir de los resultados prácticos, aplicar a esta función la parte entera del valor calculado, por lo que la relación se modifica así:

$$y = E[0.2x + 1] \quad [\text{II.4}]$$

donde $E[...]$ Función Parte Entera

Si se genera esta función para un dominio práctico, desde $x=5$ hasta $x=70$ y se hace el gráfico de la función resultante y obtendrá una función creciente a intervalos (**Figura II.4**).

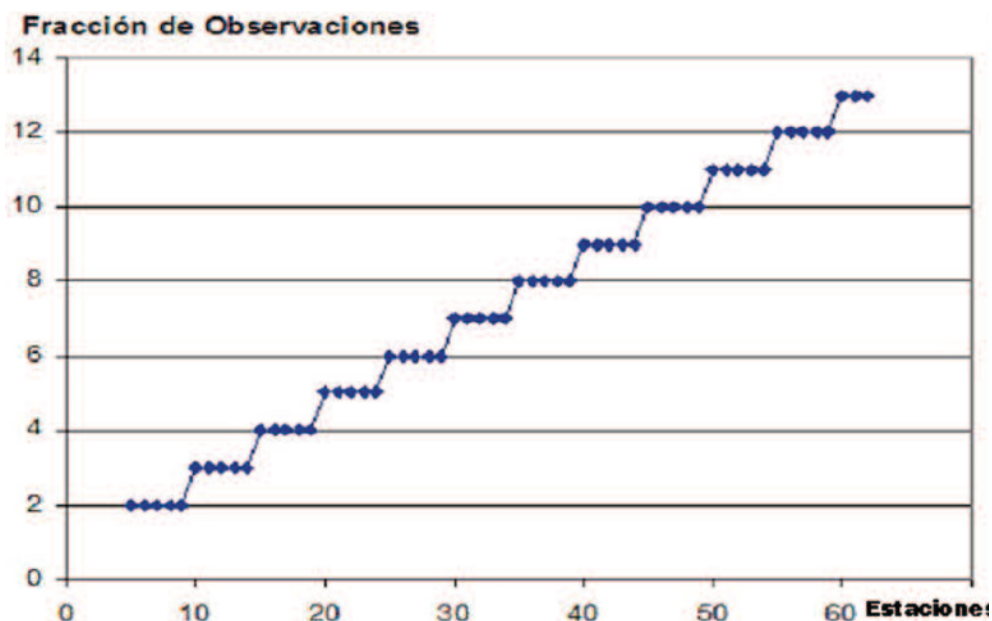


Figura II.4. Función $Y = E[0.2X + 1]$ para un dominio $X \in [5, 60]$

En el tercer aspecto será necesario hacer la depuración final del grupo de observaciones seleccionadas, para lograr de ellos un valor representativo del Nivel de Fondo. El criterio de depuración dependerá de la opinión experticia. Después de seleccionar un número (n) de observaciones del total (N) del Perfil, a partir de un ordenamiento (creciente o decreciente, en dependencia de si el Nivel de Fondo es por valores menores o mayores), es necesario hacer una depuración (eliminación de elementos) de este grupo a partir de los elementos más dispersos respecto al Valor Medio entre ellos. Por la experiencia, se establece una tabla que relaciona el Valor Medio de las observaciones y el coeficiente a partir del cual se evaluará la permanencia o no de cada uno de los elementos dentro de este grupo (Tabla II.3).

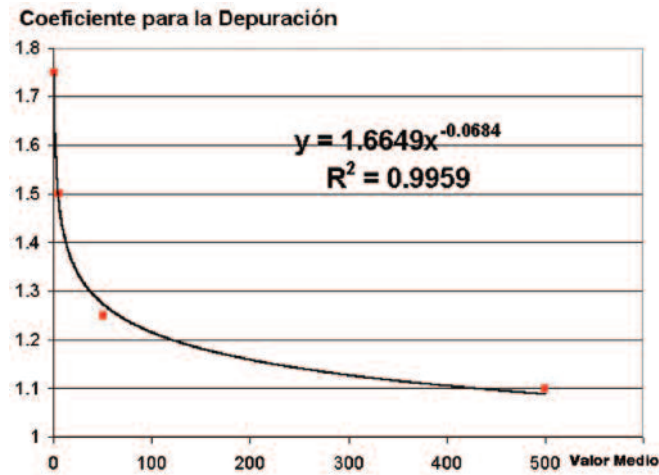
Valor Medio de las observaciones	Coeficiente
500	1.1
50	1.25
5	1.5
0.5	1.75

Tabla II.3. Tabla que establece la relación de Experto entre el Valor Medio de las observaciones y el coeficiente a partir del cual se evaluará la permanencia o no de cada uno de los elementos dentro del grupo seleccionado.

A partir de esta tabla se realizó una Regresión para generalizar el valor del coeficiente para cualquier Valor Medio de las observaciones (Figura II.5). Esta regresión es:

$$y = 1.6649x^{-0.0684} \quad [\text{II.5}]$$

Figura II.5. Regresión para generalizar el valor del coeficiente para cualquier Valor Medio de las observaciones.



El Nivel de Fondo del atributo en cuestión, resulta de promediar los valores de las observaciones seleccionadas n , después de ser depuradas mediante el procedimiento anterior.

Para establecer la medida de eficiencia del algoritmo en la determinación del Nivel de Fondo de un atributo, con respecto a los conceptos establecidos en la práctica por el personal especializado, se utilizó la expresión:

$$E = 100 - \frac{X}{Y} \cdot 100 \quad [II.6]$$

donde X es el número de casos en que el Nivel de Fondo calculado por el algoritmo es mayor de un 5 % al estimado de modo empírico, Y es la cantidad de casos en que el Nivel de Fondo calculado por el algoritmo es menor e igual de un 5 % al estimado de forma empírica y E es el Coeficiente de Acierto del algoritmo con relación a los resultados empírico. Se analizaron 40 perfiles, como muestra representativa para establecer el Coeficiente de Acierto, tal como se exhibe en la **Tabla II.4**.

Tabla II.4. Relación de los niveles de fondo establecidos por el algoritmo y la experiencia para cada uno de los perfiles tomados como muestra, además del Valor absoluto de las diferencias.

Experiencia			Algoritmo			DIF [%]		
A	B	C	A	B	C	A	B	C
0.488	0.488	0.0	5.2	5.5	5.8	0.39	0.39	0.0
349	354	1.4	287.3	287.7	0.1	302.5	307.3	1.6
140.25	140.25	0.0	10.99	11.16	1.5	18.38	18.95	3.1
23.4	22.25	4.9	83.6	81.3	2.8	0.8	0.8	0.0
0.87	0.9	3.4	0.95	0.95	0.0	0.318	0.318	0.0
339.6	342.6	0.9	301.6	307	1.8	310.2	312.6	0.8
1.1	1.1	0.0	8.9	9	1.1	15.16	15.94	5.1
0.46	0.46	0.0	84	84	0.0	3	3	0.0
283.7	289	1.9	85.5	83.3	2.6	73.25	75.6	3.2
0.14	0.14	0.0	1.56	1.57	0.6	5.2	5.14	1.2
382.7	385.3	0.7	17.6	18.1	2.8	280.3	280.3	0.0
14.5	15.3	5.5	0.11	0.1	9.1	12.73	12.73	0.0
0.8	0.8	0.0	128	123	3.9	0.497	0.477	4.0
						0.034	0.036	5.9

En la **Tabla II.4.** de un lado los valores propuestos por el Experto (columna A), por el otro, el calculado por el Algoritmo (columna B) y la columna C la cual establece el valor del por ciento de diferencia entre las columnas A y B, por la relación:

$$C = 100 \frac{A - B}{B} \quad [II.7]$$

Posteriormente se pasa a calcular el Coeficiente de Acierto (E) a partir de la columna C, donde son contados el No. de casos en que el Nivel de Fondo calculado por el algoritmo es mayor que 5 % al estimado por el Experto (X) y el No. de casos en que el Nivel de Fondo calculado por el algoritmo es menor e igual que 5 % al estimado de forma empírica (Y) donde:

X=1 y Y=34 y sustituyendo en II.6 se obtiene:

$$C = 100 - \frac{1}{34} \cdot 100 = 97.44\% \quad [II.8]$$

por lo que el Coeficiente de Acierto calculado es 97.44 %

II.1.4. Proceso de Interpretación de los atributos

La interpretación cuantitativa parte de los conceptos más generales de Intervalo de Respuesta Anómala del Atributo (IRAA) y del Complejo (IRA), de Puntos Singulares (PS) y de Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA). Se definen los mismos:

- Intervalo de Respuesta Anómala del Atributo (IRAA): Es el intervalo de puntos de observación donde existe respuesta anómala del atributo.
- Intervalo de Respuesta Anómala (IRA): Es el intervalo de puntos de observación donde existe respuesta anómala correlacionable en la mayoría los atributos.
- Puntos de Singularidad (PS): Son aquellos puntos de observación dentro del IRA los cuales satisfacen el comportamiento anómalo esperado para los atributos. Estos puntos son utilizados para las estimaciones cuantitativas.
- Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA): Son aquellos puntos de observación fuera del IRA donde no existe correlación en la respuesta anómala esperada o falta la respuesta anómala (por discontinuidad en la fuente). Algunos de estos puntos sirven para establecer los límites de las construcciones geométricas de la fuente y también para la estimación del Nivel de Fondo.

El proceso de interpretación cuantitativa consta de los siguientes pasos (**Figura II.6**):

Paso 1. Examen minucioso de los gráficos y los datos, con el propósito de identificar los IRAA, el IRA, los PS y los PARA. Se atenderá de modo especial, dentro de las aplicaciones de minerales y medio-ambiente/arqueología, a la identificación del ambiente de oxidación, reconocido por la existencia de al menos 3 puntos continuos con valores de Ur mayores o igual al valor del Nivel de Fondo (+15 mV).

Paso 2. En la Base de Datos se seleccionan todos los PS de los IRA, los cuales se utilizan para el establecimiento de las relaciones lineales entre atributos, cuya salida son los valores de a_i y b_i , para utilizarse en las estimaciones cuantitativas.

Paso 3. Las estimaciones cuantitativas de la profundidad o del espesor se realizan para cada PS vinculado a las dependencias lineales para los atributos, al obtenerse por ponderación, el valor más probable. Una vez realizadas todas las estimaciones ponderadas se procede a la construcción geométrica de la superficie resultante, para la cual se emplean también, los PARA.

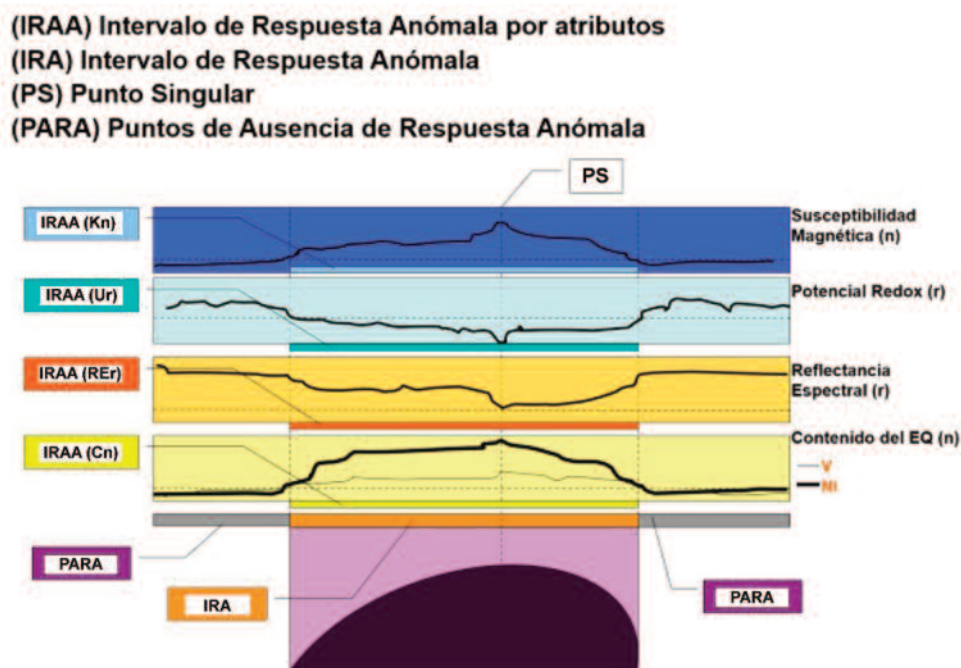


Figura II.6. Esquema que relaciona en una línea, la ubicación de un Punto Singular (PS), un Intervalo de Respuesta Anómala (IRA) y un Punto de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA). Todos para cada uno de los cuatro atributos del Complejo Redox.

Se describirán cada uno de estas subsecuentes tareas y la forma en que se modeló su solución.

II.1.5 Determinación de los Puntos Singulares (PS).

Existen comportamientos de los atributos a lo largo del Perfil, que marcan una simultaneidad entre ellos para una estación dada, las cuales son importantes para las posteriores estimaciones en la interpretación, estos son los Puntos Singulares (PS). Para cada atributo se establece un comportamiento

dado. Por ejemplo, los atributos como Kn y Cn se definirán los PS como máximos relativos y REr y Ur como mínimos relativos.

Hay una extensión de esta norma de definición de PS pues se considerará un PS el extremo inicial del análisis de un máximo (o mínimo relativo, según el atributo) de una meseta de valores iguales del atributo.

En la **Figura II.7** aparece un esquema para los tres casos de PS, por ejemplo, para Kn y Cn. Se muestra en esa Figura que el pico señalado por «1» es de un valor, el señalado por «2» es PS de meseta de dos valores y el punto marcado con «3» es PS de meseta de tres valores. Para el caso de REr y Ur se considerarán de igual forma la extensión de la norma de los PS, pero para mínimos relativos de mesetas de un punto y dos y tres puntos de meseta.

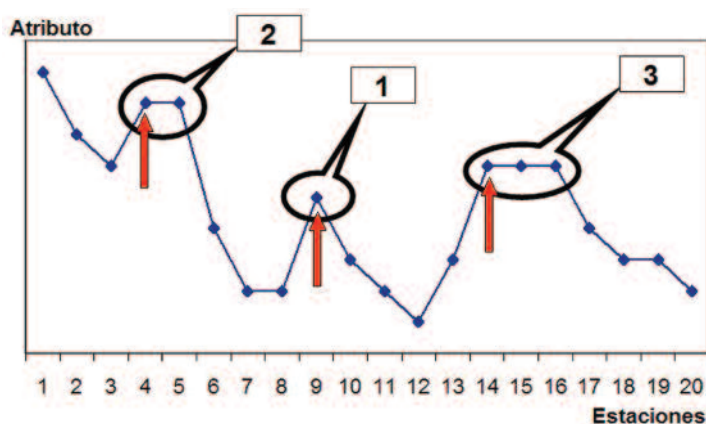


Figura II.7. Esquema donde se muestran las posibles ubicaciones de los tres tipos de Puntos Singulares.

Para el análisis de los PS en los extremos de la Línea. Se considerará un PS en el inicio de la Línea, si la magnitud del atributo de la segunda estación es menor (mayor) respecto a la magnitud del atributo de la primera estación. De modo consecuente, habrá un PS al final de la Línea si la magnitud del atributo en la penúltima estación es menor (mayor) que la magnitud del atributo de la última estación de la Línea. Como se muestra en la **Figura II.8**, aparece un PS al inicio de la Línea, pues el segundo punto es un valor menor que el primero.

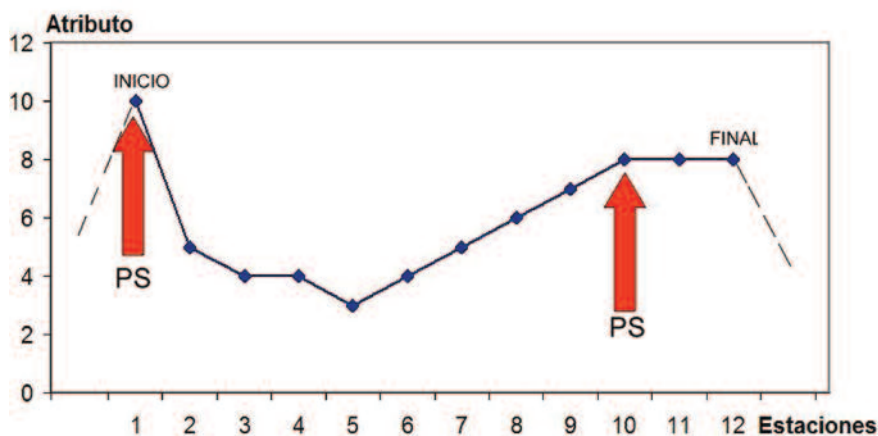


Figura II.8. Línea esquemática donde se muestran los Puntos Singulares incompletos en los extremos.

Cuando se analice una estación de la Línea se hará un conteo de cuántos PS de cada atributo coinciden en esa estación, este valor se llamará «frecuencia del PS» y servirá más adelante para caracterizarlo como un valor de peso. Este valor de peso estará entre 1 y 4.

II.1.6 Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala por Atributos (IRAA).

Este es el primer paso de este complejo camino. Establecer cuáles estaciones de representarán el Intervalo de Respuesta Anómala por cada uno de los Atributo.

Para ello el Experto propuso una serie de inferencias para cada atributo, las cuales conducen a definir estos Intervalos de Respuesta Anómala por Atributo.

Las inferencias fijadas de modo global para los atributos son:

- Considerar un Intervalo de Respuesta Anómala por Atributo que tenga tres o más puntos.
- Los límites del Intervalo de Respuesta Anómala por Atributo, está dado por el punto medio de la zona de gradiente.
- En cada Perfil o Línea existirá más de un Intervalo de Respuesta Anómala por Atributo.

En lo particular para cada atributo cumplirá con las siguientes inferencias:

- Kappa Normalizado (Kn) será mayor o igual que 1.45
- Reflectancia Espectral Relativa (REr) será menor o igual que -1
- Potencial Redox Reducido (Ur) será menor que cero
- Elemento Químico Reducido (Cn) será mayor o igual que 1.45

Para que una estación de un atributo dado sea un IRAA, la estación analizada (Ei) cumplirá con estas condiciones, además de su posición, en su entorno (es decir en las estaciones Ei-1 y Ei+1). Si esto no se cumpliera de modo simultáneo, entonces hay que consultar la información de los PS. Si con las inferencias expuestas con anterioridad una estación no es un IRAA, podría llegar a serlo de forma ocasional si en esta estación existe un PS.

II.1.7 Determinación de los Intervalos de Respuesta Anómala del Perfil (IRA) y de los Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA).

Para lograr definir el ámbito que se designará como Intervalo de Respuesta Anómala de la Línea, será necesario evaluar cada uno de los atributos y su aporte, por lo que será necesario definir cuál será la contribución de cada uno de ellos a partir de su importancia. Estos pesos tienen un origen empírico (Tabla II.5).

Atributo	Símbolo	Peso [%]	¿Existe IRAA?
Kappa Normalizado	Kn	25	Si $W_1 = \text{Peso}$ No $W_1 = -\text{Peso}$
Potencial Reducido	Ur	25	Si $W_2 = \text{Peso}$ No $W_2 = -\text{Peso}$
Reflectancia Espectral Relativa	REr	20	Si $W_3 = \text{Peso}$ No $W_3 = -\text{Peso}$
Químico Normalizado	Cn	30	Si $W_4 = \text{Peso}$ No $W_4 = -\text{Peso}$

Tabla II.5. Influencias (pesos) de cada uno de los atributos en la conformación de un IRAA.

Si la suma de los W_i para los cuatro atributos resulta con signo positivo, entonces la estación i será parte de un Intervalo de Respuesta Anómala, de lo contrario, la estación i será un Punto de Ausencia de Respuesta Anómala (PARA).

Si la suma de los W_i para la Estación i es negativa y representa un PARA por este criterio, es posible que pueda ser considerado un punto de IRA si para esa estación existe un PS global con una frecuencia mayor que uno, esto significa que en esta estación al menos dos atributos posean PS cada uno.

II.1.8 Determinación de las dependencias entre los atributos.

Las dependencias entre atributos se establecen para relacionar cada uno de los atributos (REr y Ur y Kn) con respecto al contenido del elemento químico utilizado (generalmente, el Ni), es decir, se establecerán las dependencias Kn vs Cn, REr vs Cn y Ur vs Cn, donde Cn es el contenido del elemento químico utilizado (**Figura II.9**).

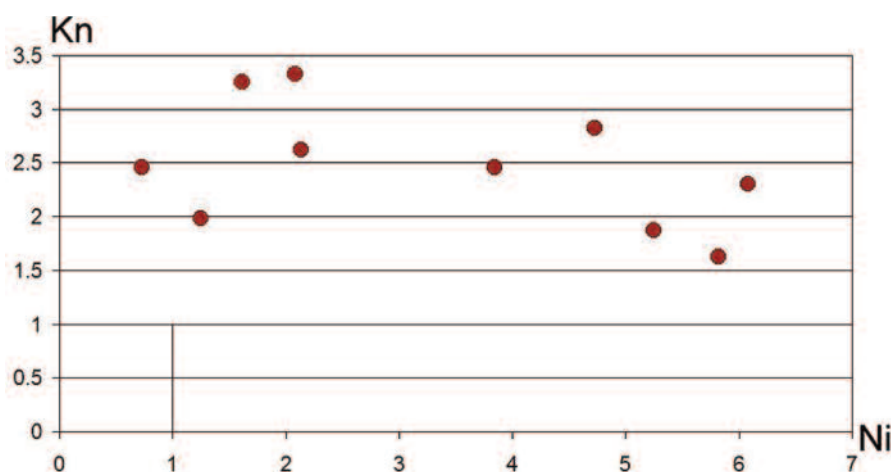


Figura II.9. Ejemplo de dependencia Kn vs Ni.

Cada pareja de valores tomados para la dependencia corresponderá a un PS, de esta manera, al establecer las dependencias lineales entre atributos se estimará de forma cuantitativa la profundidad del objeto emisor metálico.

El trabajo de selección del algoritmo apropiado fue arduo, puesto que los elementos seleccionados para establecer las dependencias lineales, no se ajustaban a los métodos tradicionales de regresiones como la de cuadrados

mínimos, por ejemplo. Se trataba de buscar los pares ordenados de la dependencia que poseyeran la mayor colinealidad, es decir, que poseyeran la mayor agrupación angular, lo que implicaba la fortaleza en la determinación de la profundidad de un nivel de emisión del objeto.

En el proceso de ajuste de la dependencia se consideró, de acuerdo con la experiencia del Experto, hasta tres niveles posibles para ser considerados en la interpretación.

El análisis se llevó a cabo de la forma siguiente: por cada par ordenado de la dependencia –por ejemplo– (Cn_i, Kn_i) se le asocia el ángulo de la Pendiente que pasa entre ese punto y el Punto Pivote. Este punto Pivote representa el punto a partir del cual estarán los valores de la dependencia para cada uno de los atributos, es decir, el valor de 1 para los atributos normalizados (ejemplo: Cn y Kn) y 0 para los atributos reducidos (ejemplos: Ur y REr). Por lo que el Punto Pivote podrá ser (1,1) para la dependencia Kn vs Cn y (1,0) para las dependencias: REr vs Cn y Ur vs Cn.

Como está asociado a cada punto de la dependencia (Cn_i, Kn_i) el ángulo de la Pendiente que pasa entre ese punto y el Punto Pivote, se hará un análisis de agrupación por estos valores angulares cuyo recorrido será desde 0 a 90 grados sexagesimales (**Figura II.10**). Este análisis de agrupación es expresado mediante el cálculo de la matriz de similitud entre los ángulos y la determinación de las agrupaciones resultantes a partir de la proposición de un Umbral por el Experto. Los resultados expresados a partir de la proposición de un valor de Umbral de 15° , estuvieron de acuerdo con las dependencias trazadas desde el punto de vista empírico.

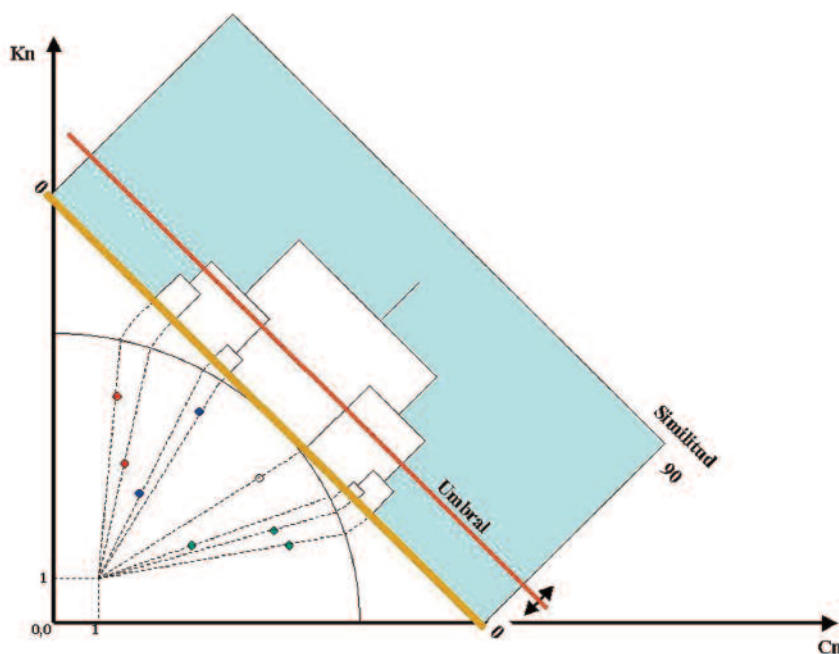


Figura II.10. Esquema del principio de agrupación angular para la determinación de las direcciones fundamentales de las dependencias entre atributos.

Después de establecidos los grupos resultantes para el umbral previsto se calcula la media ponderada de los valores angulares de los elementos que conforman cada grupo y ponderado por el valor de frecuencia con que se manifiestan los PS seleccionados. En la **Figura II.11**, se expone el ejemplo de la dependencia K_n vs N_i para el objetivo de Jatibonico Nuevo. Fueron trazados tres niveles, estos están dados por cada una de las tres rectas. Cada una de ellas recoge la mayor linealidad (dentro del umbral de 15°) para al menos dos puntos de la dependencia (sin incluir el Punto Pivote).

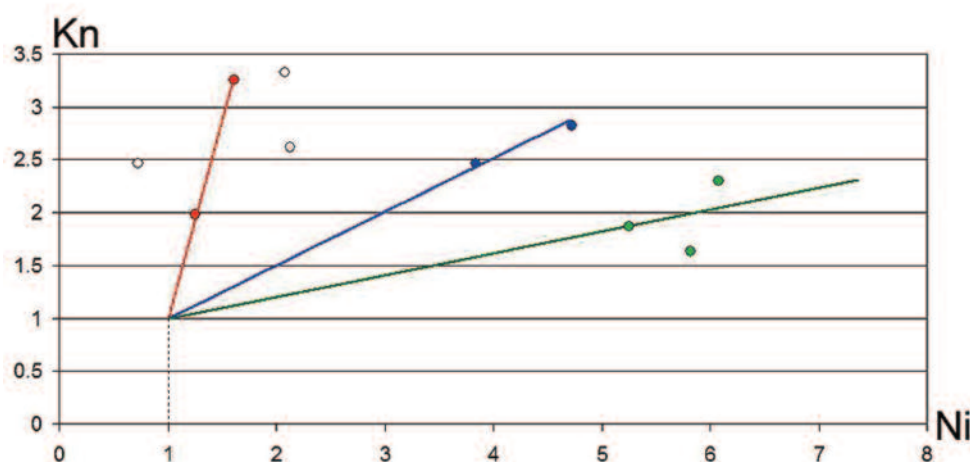


Figura II.11. Ejemplo de la dependencia K_n vs N_i para el objetivo de Jatibonico Nuevo

Para cada una de estas dependencias lineales se estima un punto medio perteneciente al lugar geométrico de la recta entre el valor extremo de ella y el Punto pivote para así calcular al corresponder los valores de a_i y b_i . Estos valores de a_i y b_i se utilizarán a su vez para la estimación de las profundidades correspondientes a cada punto asociado a cada recta establecida.

II.1.9 Estimación de las profundidades bajo los Puntos Singulares.

Con los valores de los atributos (reducidos o normalizados) para cada PS seleccionado en las dependencias y los correspondientes a_i y b_i , se evalúan y se obtienen los valores correspondientes a las profundidades. Esto se realiza mediante un algoritmo de aproximaciones sucesivas, puesto que la expresión, por ser trascendente, no permite el despeje de la profundidad. En la **Figura II.12** se muestra de modo esquemático el proceso utilizado para el cálculo de la profundidad.

El proceso es el siguiente: se hace variar la profundidad desde valores de uno hasta 5 000 con un intervalo de 100 metros. Para cada iteración se obtiene un valor de H_i , el cual se evalúa en la expresión correspondiente del atributo en cuestión, es decir, para H_i entonces:

$$K_{n_i} = f(a_i, b_i, F, H_i) \quad [\text{II.9}]$$

Si el valor de Kn^* es el valor correspondiente del atributo, entonces si el valor de Kn_i es menor que Kn^* para H_i , se retrocede al valor iterado de H_{i-1} y se disminuye el paso de iteración en la mitad y se continúa el proceso hasta que la diferencia absoluta de los valores Kn_i y Kn^* sea menor del orden de precisión establecido que será tomado como igual a uno.

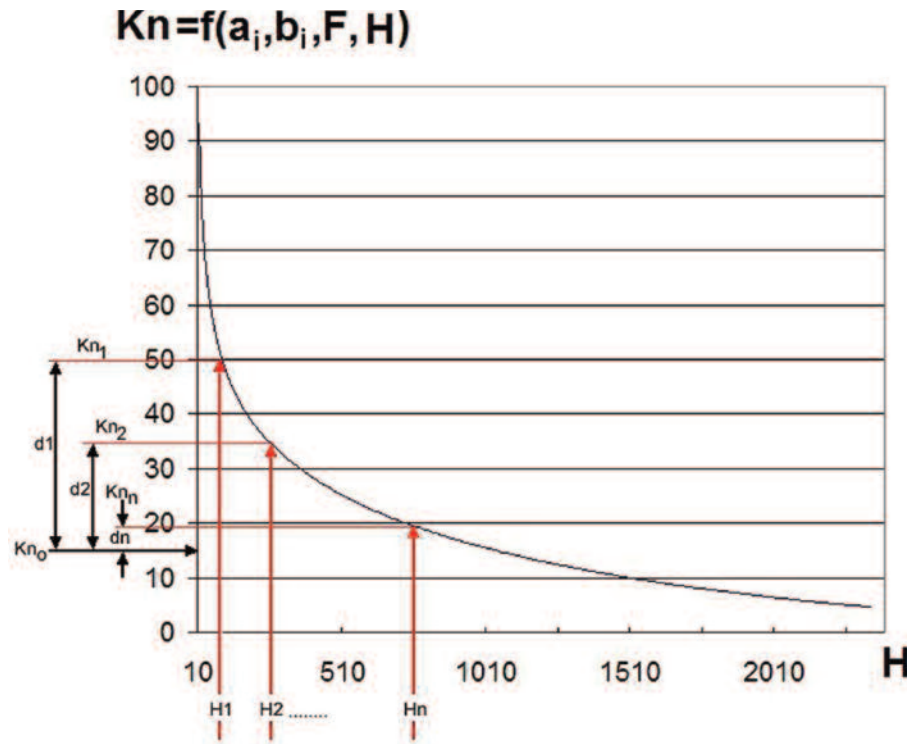


Figura II.12. Esquema para ilustrar el algoritmo de aproximaciones sucesivas

II.1.10 Depuración de las profundidades.

En esta etapa es necesario antes de calcular la profundidad referida a un PS, considerar cuáles de ellas (las profundidades estimadas para cada atributo en una estación) habría que procesar.

La profundidad referida a un PS es la estimada del conjunto de las profundidades que más agrupadas estén, para lo cual se establece un índice de agrupación de un 15 % del valor de cada una de ellas. El proceso en general es el siguiente:

1. Se ordenan en orden creciente las profundidades estimadas para todos los atributos referidos a una estación, es decir $P_1, P_2, \dots, P_4$, donde P_i es menor o igual que P_{i+1} .
2. Si la segunda profundidad P_2 es menor o igual a $1.15P_1$, entonces P_2 se adiciona al grupo que inició P_1 .
3. Si la tercera profundidad P_3 es menor o igual a $1.15P_2$, entonces P_3 se adicionará al grupo que forma P_1 y P_2 .

4. Si en el paso 1 la profundidad P_2 es mayor que $1.15P_1$, P_2 comienza a analizarse como la primera profundidad y así sucesivamente. Si ocurre que P_{i+1} es mayor que $1.15P_i$ entonces no se formaría ningún grupo y solo quedaría tomar la profundidad menor de ellas como representativa.

II.1.11 Clasificación del Intervalo de Respuesta Anómala del Perfil.

Se definió de forma empírica cuatro patrones referidos al área de Cuenca Central en el centro de la isla de Cuba, por presentar características disímiles entre ellos y disponer de la información completa para los mismos, estos son:

- Jatibonico Nuevo
- Yacimiento Jatibonico
- Yacimiento Cristales
- Jatibonico Oeste

Para el análisis se incluyeron los atributos más informativos, desde el punto de vista práctico:

- El Valor Medio de la Susceptibilidad Magnética Normalizado (Kn_{VM})
- El Valor Medio del Potencial Redox Reducido (Ur_{VM})
- El Valor Medio de la Reflectancia Espectral Reducida (RER_{VM})
- El Fondo del Contenido de Níquel Normalizado (Ni_F)
- El Valor Medio del Contenido de Níquel Normalizado (Ni_{VM})
- El Fondo del Contenido de Hierro Normalizado (Fe_F)
- El Fondo del Contenido de Zinc Normalizado (Zn_F)
- El Fondo del Contenido de Vanadio Normalizado (V_F)

Con estos atributos se conforma una Tabla de Objetos/Propiedades (TOP). Todos los atributos de la TOP son numéricos, por lo que se trabajará en un espacio métrico. Con la TOP reducida y optimizada por los atributos se establecerá una medida de similitud que bien podría ser la distancia euclidiana para llevar a cabo el proceso de clasificación. Con los patrones depurados y la medida de similitud propuesta se pasaría a clasificar el objeto que se procesa. Se utilizará el método de componentes principales, la cual es una técnica de reducción de dimensionalidad lineal que identifica direcciones de la variación máxima ortogonal en los datos originales. Para ello se utilizó el *software* comercial *STATISTICA* v8.0.

Para tener una idea de los niveles de asociación entre los atributos y entre los objetos se muestran las **Figura II.13** y **Figura II.14**.

Figura II.13. Dendrograma de la TOP asociada a partir de los atributos.

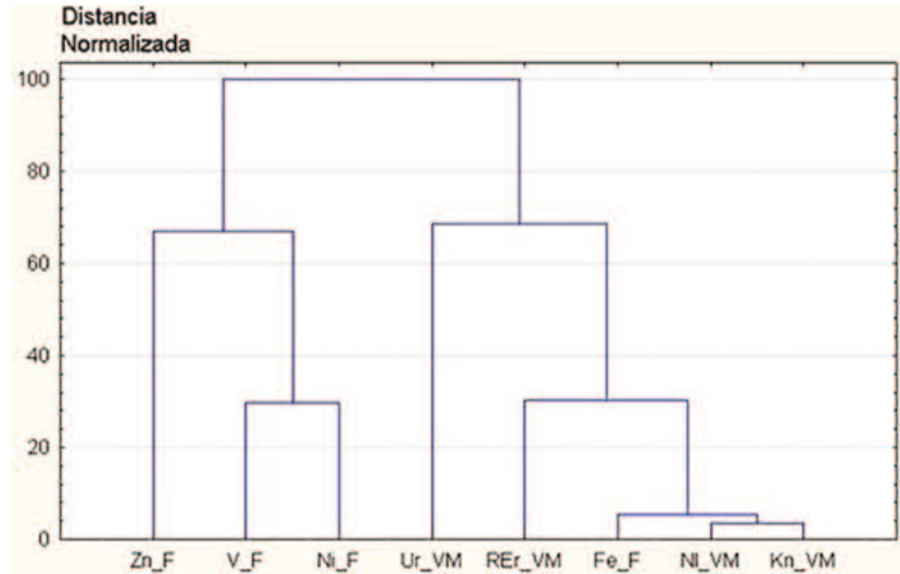
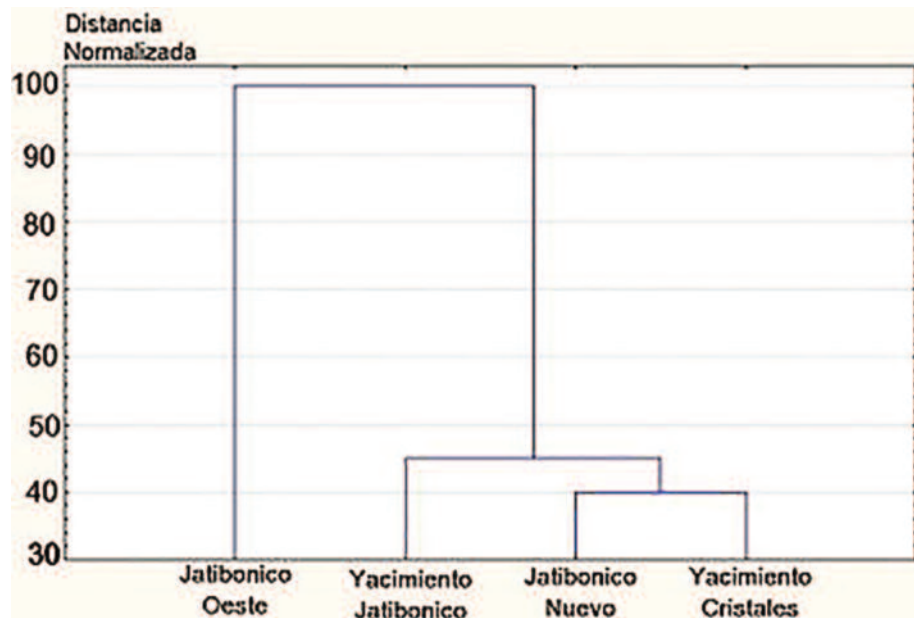


Figura II.14. Dendrograma de la asociación de yacimientos que se tomarán como patrones.



El primero de los atributos muestra una gran similitud entre el Nin y la Kn y corrobora el importante vínculo que existe entre estos elementos pues controlan el contenido metálico. Los objetos muestran que los elementos más parecidos son Jatibonico Nuevo y el yacimiento Cristales.

Para la clasificación de un Objeto dado con estos patrones, se tienen en cuenta algunas definiciones:

Sea un Objeto a clasificar con diferentes atributos o propiedades: Obj_1 , Obj_2 , Obj_3 ,..... Obj_n

Si se describen los patrones como una Tabla de Objetos-Propiedades:

$$TOP = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} \cdots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m,1} & p_{m,2} & p_{m,3} & p_{m,n} \end{bmatrix} \quad [II.10]$$

Se calcularán los valores Máximos y Mínimos para cada atributo y se designarán como:

$$\begin{matrix} Min_1, Min_2, Min_3, \dots, Min_n \\ Max_1, Max_2, Max_3, \dots, Max_n \end{matrix} \quad [II.11]$$

Donde Max_i y Min_i son los valores Máximos y Mínimos respectivos del atributo i , por lo que, se procede a la normalización de los atributos de la TOP y del Objeto, mediante la expresión:

$$|p_{i,j}^*| = \frac{p_{i,j} - Min_i}{Max_i - Min_i} \quad [II.12]$$

La normalización de cada uno de los elementos de la TOP y del Objeto se representan como:

$$TOP^* = \begin{bmatrix} p_{1,1}^* & p_{1,2}^* & p_{1,3}^* \cdots & p_{1,n}^* \\ p_{2,1}^* & p_{2,2}^* & p_{2,3}^* \cdots & p_{2,n}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m,1}^* & p_{m,2}^* & p_{m,3}^* \cdots & p_{m,n}^* \end{bmatrix} \quad [II.13]$$

$$Obj_i^* = \frac{Obj_i - Min_i}{Max_i - Min_i} \quad [II.14]$$

A partir esto, se define la Medida de Similitud como la distancia euclidiana entre el Objeto y cada Patrón en la TOP, es decir:

$$\delta_{o,i} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (Obj_j^* - p_{i,j}^*)^2}}{Norma_{k,l}} \quad [II.15]$$

Donde, $\delta_{o,i}$ es la medida de similitud entre el objeto a clasificar y los patrones normalizados por $Norma_{k,l}$, que es la distancia euclidiana entre los dos patrones más cercanos entre sí y que son, en este caso, el yacimiento Cristales y Jatibonico Nuevo.

$$Norma_{k,l} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_{k,i}^* - p_{l,i}^*)^2} \quad [II.16]$$

Así el resultado de la clasificación se interpretaría sobre la base de un múltiplo a partir de la cercanía entre estos dos patrones.

II.1.12 Geometrización de los resultados.

Se parte de las zonas de IRA de la Línea y la posición de los PS destacados y sus valores de profundidades correspondientes.

Se procede a hacer una depuración de las profundidades de los PS correspondientes a un IRA. En este proceso no solo se cuenta con los valores de la profundidad para cada PS, sino además la relación de distancia horizontal entre los PS. A partir de la práctica, esta depuración-construcción sigue el siguiente procedimiento:

Se ordenan los valores de profundidad y se toma el menor valor. A partir de aquí comienza el proceso de aceptación o eliminación de profundidades.

En el sentido creciente de las profundidades se analizarán los PS, los cuales cumplirán con la condición lateral de estar dentro de un sector angular «beta» establecido de 13 grados como máximo a partir del punto anterior. Este ángulo ha sido establecido por la práctica.

Como se aprecia en la (Figura II.15), se toma el elemento 1 por ser el menor valor de profundidad del ordenamiento inicial, después quedan aceptados los elementos 3 (por estar dentro del sector de 1), 4 (por estar dentro del sector de 1), 6 (dentro del sector de 4). El elemento 4 está dentro del sector de 2, pero este fue rechazado por el elemento 1. El análisis se realiza independiente a cada lado del PS de menor profundidad.

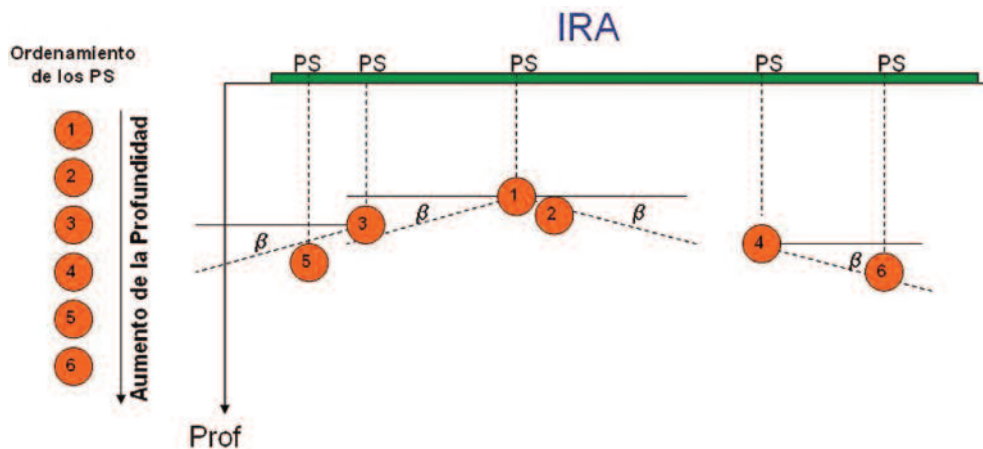


Figura II.15. Esquema del principio de depuración de las profundidades dentro de un IRA.

Depurados los valores de profundidad para un IRA, se procede de la manera siguiente para geometrizar el modelo final:

1. Se establece la posición de los límites del IRA dentro de los PARA contiguos.
2. Si hay dos IRA contiguos, el límite será el punto medio del PARA que los conecta.

3. Si el extremo del IRA coincide con el borde de la Línea, el límite del IRA queda abierto.
4. Se une con líneas los valores resultantes de la depuración de profundidades en el IRA que se geometriza.
5. Con posterioridad se analiza cuál de los extremos de las profundidades enlazadas comienza a trazar el cierre de la sección, para esto, a partir del punto extremo de mayor valor de profundidad se traza una recta al límite del IRA más cercano con un ángulo de inclinación de 10 grados sexagesimales desde la horizontal.
6. Si este límite es abierto, la poligonal representa esta abertura al bajar hasta una profundidad dada por la intercepción de este límite vertical y una línea que parte desde el punto anterior con un ángulo de inclinación de 15 grados (Figura II.16).

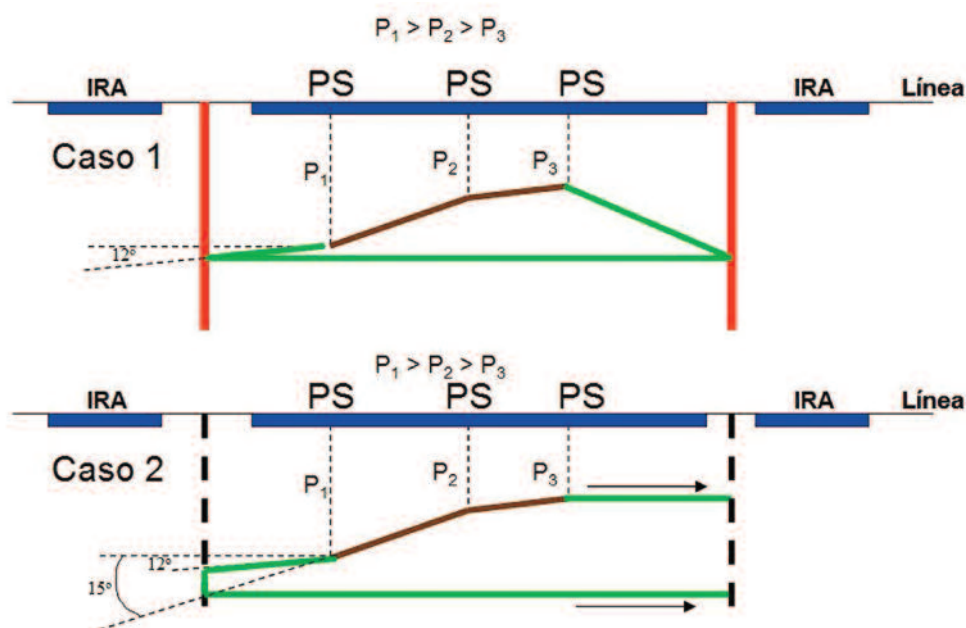


Figura II.16. Esquema del proceso de geometrización dentro del IRA.

En este último punto, se traza una horizontal hasta el otro límite del IRA (este es el supuesto «Contacto Agua-Petróleo»).

Si este otro límite es abierto, el próximo punto (último) se proyectará de modo horizontal con este otro límite vertical, de lo contrario, se cierra la poligonal.

En la **Figura II.16** se muestran dos casos. En el Caso 1, la poligonal comienza a cerrarse por la izquierda (por ser este extremo de la poligonal el de mayor profundidad), además, ambos límites son cerrados. En el Caso 2 de la misma figura, esta poligonal se cierra por el mismo lado, pero los límites del IRA son ambos abiertos. Para este caso es necesario denotar de alguna

forma estos límites abiertos del IRA. En el límite de la izquierda esta indicación se hace, al localizar un punto más abajo, que sea la intersección de una recta con un ángulo de 15 grados desde la horizontal y a partir del punto anterior y en el otro extremo (derecho) la proyección horizontal de los dos extremos de la poligonal en ese límite vertical.

II.1.13 Estimación Volumétrica del Modelo.

Después de geometrizar el modelo, se establecerá para un IRA, la poligonal a partir de los vértices: (X_1, Z_1) , (X_2, Z_2) , (X_n, Z_n) , donde X_i es la posición del Punto Singular i-ésimo dentro de la Línea y Z_i es el valor de profundidad correspondiente al Punto Singular i-ésimo

Con esta poligonal se estimará el valor volumétrico del modelo. Para esto es necesario, a partir de la información geomorfológica o en su lugar, de

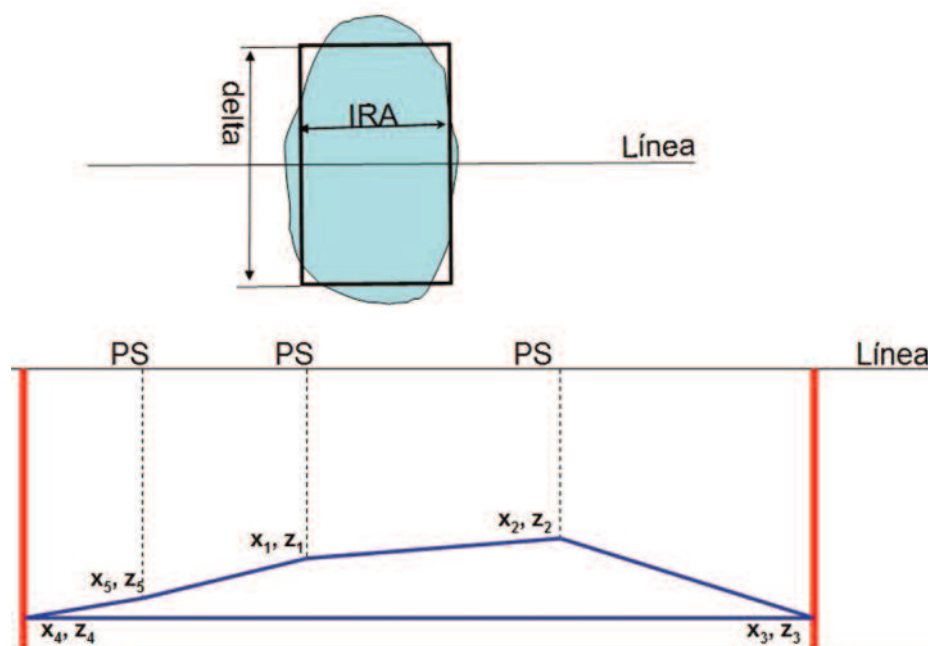


Figura II.17. Distribución de la secuencia de coordenadas de la poligonal

la Susceptibilidad Magnética, proponer de modo conservador, un valor delta (dex) de la extensión horizontal del prospecto en las inmediaciones de cada Perfil para calcular el volumen (**Figura II.17**).

La sección del prospecto se calcula a partir de la secuencia de coordenadas anteriores, al aplicar el método del cálculo de las áreas hasta la superficie de cada uno de los segmentos de la poligonal (**Figura II.18**).

La expresión propuesta para su cálculo es la **II.17**. En ella se toman los puntos por pares consecutivos para calcular el área correspondiente desde ese segmento hasta la superficie de la Línea. Cada segmento tendrá un signo, referente al sentido horario o antihorario en que es calculada el área.

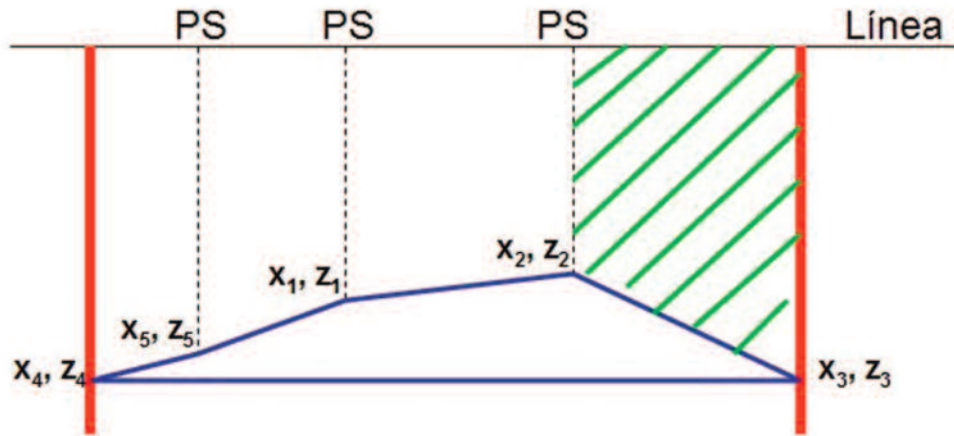


Figura II.18. Señalización de uno de los sectores al cual se le calcula el área.

$$A_s = \left| \sum_{i=1}^{n-1} \frac{x_{i+1} - x_i}{|x_{i+1} - x_i|} \cdot \frac{|x_{i+1} - x_i| |z_{i+1} - z_i|}{2} \right| \quad [II.17]$$

Y para determinar el volumen del prospecto se efectúa la operación:

$$Vol_{prosp} = A_s \cdot \text{delta} \quad [II.18]$$

donde delta es valor de la extensión horizontal del prospecto en las inmediaciones de cada Perfil.

II.1.14 Validación del Modelaje.

En primer lugar, validar el modelo incluye tanto la verificación como la validación propiamente dicha. En cuanto a la verificación, la misma supone una validación formal, es decir, si la especificación del conocimiento es correcta desde el punto de vista sintáctico y consistente, esto es, no faltan componentes o sobran, por ejemplo, inferencias que no se utilizan en ninguna tarea.

Para la validación en cuanto a la comprobación de que el modelo contiene todo el conocimiento necesario, lo más práctico es una simulación, sobre el papel o con el uso de un soporte *software*. En este último, la simulación se realizaría en un ambiente tal, en que el modelo se convierte en un prototipo automático, sin que requiera gran cantidad de tiempo y esfuerzo.

Esto fue realizado en un ambiente de *Microsoft Excel*, el cual facilita la reducción de tiempo y esfuerzo en la simulación de la validación del modelo y propicio por la facilidad con que asimilan nuevos ajustes en el perfeccionamiento del modelo a la realidad.

La determinación del Nivel de Fondo de los atributos, fue simulado dentro del ambiente del propio Sistema Redox, el cual será visto en el próximo capítulo.

Con respecto al proceso de interpretación de las líneas se diseñó la secuencia de pasos en hojas de *Microsoft Excel*. Estas hojas en orden consecutivo ofrecían el orden del procesamiento de forma metodológica.

La simulación se programó a nivel de celdas vinculadas en modo dinámico como la del diseño de macros, es este último caso, cuando el nivel de complejidad era mayor.

La validación del modelaje matemático se presenta aplicada al caso más complejo desde el punto de vista geológico, que es el caso del yacimiento Cristales, cuyo reservorio presenta una estructura escalonada. En general, se diseñaron 10 hojas *Excel*, ellas son:

- Hoja para el almacenamiento de los datos (BaseDatos).
- Hoja para la selección de los datos (SeleDatos).
- Hoja para la estimación de los IRAA, los IRA, los PS y los PARA de la Línea (PS_IRAA_IRA_PARA).
- Hoja para la selección de los pares de las dependencias (DatosDependAtrib).
- Hoja para la resolución de las dependencias (Dependencias).
- Hoja para el cálculo y depuración de las profundidades (Profundidades).
- Hoja para la clasificación del objetivo a partir de los patrones (Clasificación).
- Hoja para el graficado del modelo propuesto (Geometrización).
- Hoja para la estimación del volumen del Prospecto (CálculoVolumétrico).
- Hoja auxiliar para variables globales de trabajo (Definiciones).
- Se hará una breve explicación de cada una de las hojas diseñadas para simular el proceso de interpretación de una Línea del Complejo Redox:
- Hoja para el almacenamiento de los datos (BaseDatos).

En esta primera hoja (**Anexo II.1**) la cual es pasiva, se encuentran ordenados en una Tabla de Objetos/Propiedades la información necesaria de cada una de las líneas procedentes de la Base de Datos Redox. Los datos se encuentran de forma consecutiva y están referenciados con el encabezamiento correspondiente a cada columna. Los datos aparecen de la siguiente manera respecto a las columnas:

Hoja para la selección de los datos (SeleDatos). En esta hoja se realiza (**Anexo II.2**), primero la selección dinámica de la Línea con que se desea trabajar y con posterioridad se comprueba de modo visual la calidad y estruc-

tura de los datos que contiene la Línea Objeto. Esto se hace al colocar una «x» en una de las celdas de la columna O desde la fila 9 hasta la 12.

Hoja para la estimación de los los IRAA, IRA, los PS y los PARA de la Línea (PS_IRAA_IRA_PARA). Esta es una hoja dinámica de cálculos múltiples (**Anexo II.3**), es decir en ella se obtienen los Puntos Singulares de la Línea, los Intervalos de Respuesta Anómala por Atributos, el Intervalo de Respuesta Anómala y los Puntos de Ausencia de Respuesta Anómala. Además, algunos cálculos como son la media de los valores del atributo para las estaciones del IRA y otros elementos informativos.

Hoja para la selección de los pares de las dependencias (DatosDependAtrib). Prepara los datos que serán llevados a establecer la dependencia de los elementos químicos con los restantes atributos (**Anexo II.4**).

Hoja para la resolución de las dependencias (Dependencias). Posee características de cálculo dinámico y una macro asociada con la imagen superior (se activa al hacer *click* en la imagen). Aquí el algoritmo de agrupaciones propuesto es de tal complejidad que el trabajo con la programación de las celdas queda por debajo de las posibilidades. Además de los cálculos se ofrece los gráficos de las dependencias para hasta tres horizontes (hasta tres rectas). Se calculan los valores de a_i y b_i que se necesitan para la estimación con posterioridad de las profundidades. Todos los puntos traídos de la hoja anterior a ésta son Puntos Singulares (**Anexo II.5**).

Hoja para el cálculo y depuración de las profundidades (Profundidades). Con de cálculo dinámico y macro (asociado a la imagen superior izquierda) se calculan las profundidades para todos los PS de los cuatro atributos a partir de los parámetros traídos de otras hojas de cálculo, estos son a_i , b_i , el valor del atributo, el valor del Fondo y otros elementos informativos. Después de esto, se realiza la depuración de las profundidades de todos los atributos para cada estación, al ofrecer la macro diseñada, el valor de la profundidad y los errores (en más/menos metros y el por ciento que representa) (**Anexo II.6**).

Hoja para la clasificación del objetivo a partir de los patrones (Clasificación). Clasifica la Línea respecto a los patrones elaborados (**Anexo II.7**).

Hoja para el graficado del modelo propuesto (Geometrización). Con macro asociada a la imagen superior izquierda, grafica la información de las columnas de la A hasta la D. Se obtiene así la sección del modelo que representará al prospecto que se estudia. Aparecen otros datos informativos como el nombre de la Línea y la clasificación de la hoja anterior (**Anexo II.8**).

Hoja para la estimación del volumen del Prospecto (CálculoVolumétrico). Se calcula de modo dinámico la magnitud del volumen en millones de metros cúbicos (**Anexo II.9**).

Hoja auxiliar para variables globales de trabajo (Definiciones). Esta última hoja Excel (**Anexo II.10**) es solo de datos globales y apoya todo el proceso de interpretación de la Línea.

De esta manera fue validado el modelaje realizado para la interpretación de las líneas del Complejo Redox. Con esta simulación, no solo se corrobora la coincidencia de los resultados del modelo con los resultados estimados por la experiencia, sino que en algunos casos se ofrecen variantes interesantes y propuestas aceptadas por el sistema.

II.2 El Sistema Redox

Un sistema de base de datos y sus aplicaciones fueron diseñados, programados y puestos a punto (Booch, 1996; Booch, *et al.*, 1999a; Booch, *et al.*, 1999b) para resolver de forma confiable y rápida todos los procesos de almacenaje, reportes, gráficos y las interpretaciones correspondientes del Complejo Redox. El alcance del Sistema Redox trasciende los límites de un simple programa de cálculo y almacenaje, ya que sería utilizado por otros especialistas no Expertos, para obtener resultados de la interpretación.

Se aplicaron los métodos de la ingeniería del conocimiento (Larman, 2002) para modelar los algoritmos referidos. Para el diseño del Sistema Redox fueron utilizadas las técnicas de los diagramas UML (Lenguaje de Modelo Unificado).

El flujo de la información que entra y se genera del Sistema Redox aparece en la **Figura II.19**. Se aprecian los elementos del flujo de la información. Comienza a partir de los datos observados, los cuales son introducidos en la base de datos mediante un formulario (captador de datos). También se tiene en cuenta las transformaciones de reducción/normalización, determinación del nivel de fondo de las observaciones, la generación de los gráficos correspondientes y los reportes de Sector, Línea.

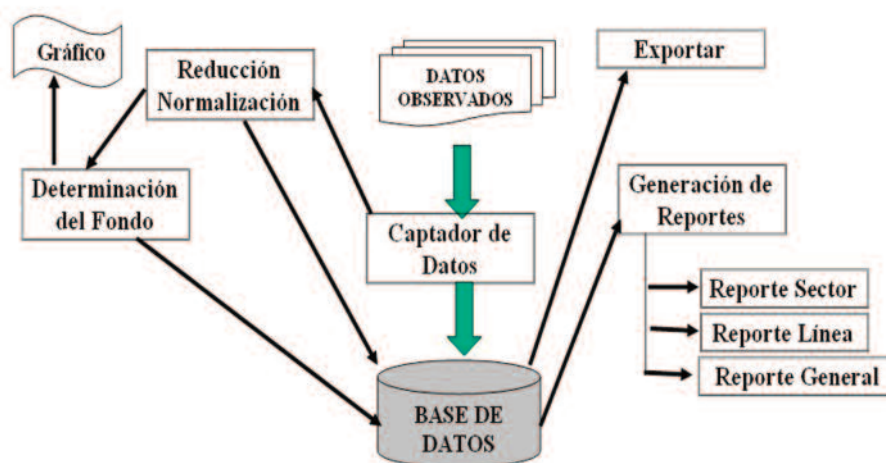


Figura II.19. Flujo general de la información en el Sistema Redox.

Las entidades fundamentales y sus relaciones se muestran en la **Figura II.20**. En esta figura se muestra la relación de **uno a muchos** de cada una de estas entidades, las cuales discurren de lo general a lo particular, por ejemplo: Proyecto, Objetivo, Sector, Línea (o Perfil) y las Estaciones (Estacas).

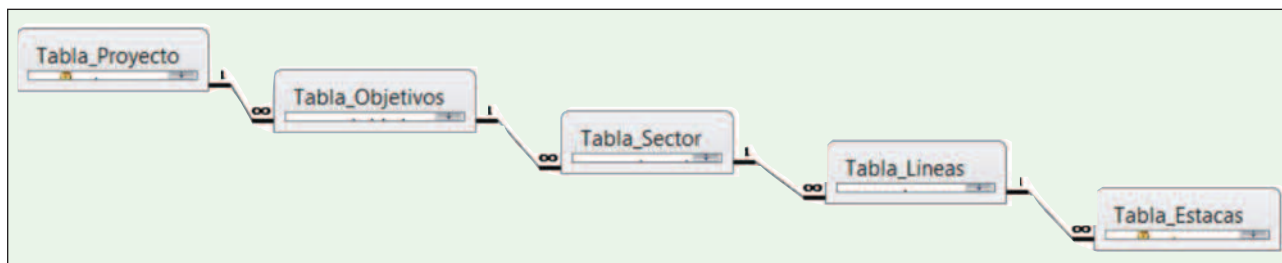


Figura II.20. Relación de uno a muchos de cada entre cada una de estas entidades fundamentales del sistema.

En el sistema de base de datos que sustenta al Sistema Redox no solo se almacenan los datos observados necesarios para el proceso de interpretación, sino también los descriptivos de los atributos principales:

- La información geoespacial (Coordenadas Lambert, Coordenadas Geográficas, Nombre y número de la Hoja Cartográfica 1:50000 de los trabajos).
- Diversos datos cualitativos reflejados en la libreta de campo.
- Identificación de la muestra de suelo tomada para ser enviada al laboratorio.
- Elementos químicos determinados en el laboratorio.

Además de estos elementos explicativos de los datos, se incluyen las observaciones del Complejo Redox: la Susceptibilidad Magnética, el Potencial Redox, la Reflectancia Espectral y el Contenido de Elementos Químicos determinados en el punto de observación.

II.2.1 Ambiente del Sistema Redox

El ambiente del Sistema Redox (**Figura II.21**) está conformado por las facilidades que proporciona el manipulador y el asistente de diseños de interfaces o formularios del *Microsoft Access* (Riel, 1966; Reenskaug, *et al.*, 1996).

Existe una estructura de carpetas definida para el **Sistema Redox**. Sobre una carpeta nombrada como ComplejoRedox se estructura el Sistema. Dentro de esta carpeta se tienen las siguientes: Aplicaciones, Ayuda, Imágenes, ModelosMatematicos y Reportes (**Figura II.22**).

La Base de Datos (SistemaRedox_v_2_1.accdb) se encuentra directamente en la carpeta: ComplejoRedox.



Figura II.21. Interface principal Sistema Redox.

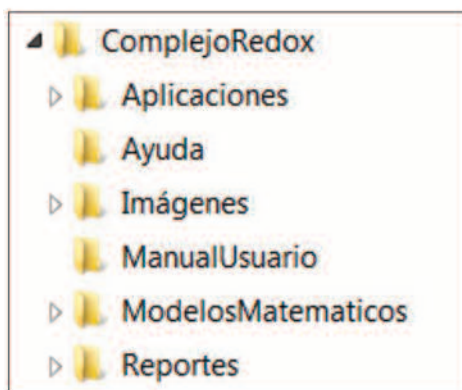


Figura II.22. Estructura de carpetas definida para el Sistema Redox.

La Base de Datos (SistemaRedox_v_2_1.accdb) se encuentra directamente en la carpeta: ComplejoRedox.

- En la carpeta Aplicaciones se almacenan los programas elaborados en Visual Basic que son utilizados por el Sistema Redox.
- En la carpeta Ayuda se almacena los ficheros pdf, sobre los cuales se ha diseñado la ayuda del Sistema Redox.
- La carpeta Imágenes posee dentro una serie de carpetas referentes a las imágenes que describen las observaciones para cada proyecto.
- En la carpeta ModelosMatematicos están los objetos Excel, sobre los cuales se valida todo el proceso de Modelación Matemática del proceso de interpretación. Estos objetos Excel están vinculados de forma automática a la interface de interpretación del Sistema Redox.
- En la carpeta Reportes se almacenan automáticamente todos los elementos generados como reportes por el Sistema Redox.

Al sistema se accede al seleccionar el nombre del usuario autorizado en una lista, se teclea la clave particular de ese usuario. Esta clave debe regir en un dominio particular del sistema.

En el menú se encuentran los siguientes accesos principales: Autorización / Captador / Reportes / Interpretación / Herramientas / Exportar / Importar / Nomencladores / Créditos / Ayuda / Salir. Para cada uno de los elementos de la primera línea del menú, en general existe una serie de submenú que ofrece una gama de variedad de procesamientos del sistema.

II.2.2 Ambiente de las Interfaces

Cada una de las interfaces del Sistema Redox son:

- Interface del Módulo de Autorización. Está integrado por la interface Autorización de Usuario. Es solo manipulada por el Administrador.
- Interface del Módulo de Captación (de Datos). Este Módulo es uno de los más importantes del Sistema Redox (**Figura II.23**). Aquí se introduce mediante el teclado los datos medidos en los trabajos del Complejo Redox. La distribución espacial de la información de la interface está acorde a la estructura jerárquica y básica de los datos.

Figura II.23. Interface del Módulo de Captación (de Datos) del Sistema Redox.

Objetivo	Inicio	Termino
Petróleo	20/03/2005	21/03/2005
(ninguno)		

Sector	Escala	Cono	No Hoja	Nombre Hoja	DistLineas	Provincia
Reconocimiento Cacah	40000	Norte	4482-II	Morón	0	Ciego de Avila
(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	(ninguno)	0	(ninguno)

Linea	Fecha	Hora_I	Hora_T	DistEstacas	Acimut	PFO	PFC	Operadores
LF	20-mar-05	7.45	12.55	200	330	21	0	Pardo Echarte Manuel
T	21-mar-05	7.20	10.45	200	0	15	0	(ninguno)
				0	0	0	0	

Estaca	Mstra	LoG	LoM	LoS	LaG	LaM	LaS	CoordX	CoordY	Tipo de Suelo	Observaciones	Amonalia
0	129	78	34	51	22	1	13	749768	245800	Pardo rojizo		No Anómalo
20	130	78	34	54	22	1	20	749676	245993	Pardo rojizo		No Anómalo
40	131	78	34	56	22	1	25	749596	246160	Pardo rojizo		No Anómalo
60	132	78	34	59	22	1	31	749510	246331	Pardo rojizo		No Anómalo
80	133	78	35	2.5	22	1	36	749413	246505	Pardo rojizo		No Anómalo
100	134	78	35	6	22	1	42	749310	246688	Pardo rojizo		No Anómalo
120	135	78	35	8.2	22	1	47	749244	246828	Pardo rojizo		No Anómalo
140	136	78	35	11	22	1	53	749175	247018	Pardo rojizo		No Anómalo
160	137	78	35	13	22	1	58	749098	247177	Pardo rojizo		No Anómalo
180	138	78	35	16	22	2	4.3	749024	247360	Pardo rojizo		No Anómalo
200	139	78	35	18	22	2	9.8	748941	247528	Pardo rojizo		No Anómalo
220	140	78	35	21	22	2	16	748863	247705	Pardo rojizo		No Anómalo
240	141	78	35	24	22	2	20	748778	247839	Pardo rojizo		No Anómalo
260	142	78	35	27	22	2	28	748676	248084	Pardo amarillento		No Anómalo

- Interface del Módulo de Elaboración Primaria. Posee uno de los elementos de modelación esenciales para el proceso general de interpretación: la estimación del Nivel de Fondo de los atributos que componen el **Complejo Redox** y la correspondiente Reducción/Normalización de los datos (**Figura II.24**).

REDUCCION - NORMALIZACION

Proyecto: XXXXXXXX
Objetivos: Petróleo
Sector: XXXXXXXX
Línea: XXXXXXXX

Kappa Redox Reflectancia Elementos Químicos I Gamma Magnetometría

Estaca	Kappa	Sel	Kappa_N	Fondo
0	3.07	☐	7.87	0.39
20	2.35	☐	6.03	0.39
40	3.52	☐	9.03	0.39
60	2.35	☐	6.03	0.39
80	2.27	☐	5.82	0.39
100	3.1	☐	7.95	0.39
120	2.74	☐	7.03	0.39
140	2.87	☐	7.36	0.39
160	3.86	☐	9.9	0.39
180	3.27	☐	8.38	0.39
200	3.41	☐	8.74	0.39
220	3.16	☐	8.1	0.39
240	2.97	☐	7.62	0.39
260	0.39	☒	1	0.39
280	0.79	☒	2.03	0.39
300	0.57	☒	1.46	0.39
320	2.73	☐	7	0.39
340	5.54	☐	14.21	0.39
360	2.75	☐	7.05	0.39
380	1.2	☐	3.08	0.39
400	1.14	☐	2.92	0.39
NI	0	-9999.99	-9999.99	-9999.99

Cálculo de la Media

Selección Tipo Anomalia

☐ Máximos

☐ Máximos y Mínimos

☒ Mínimos

Extender el valor calculado del Fondo y el Reducido/Normalizado para toda la selección

☒

Figura II.24. Interface del Módulo de Elaboración Primaria del Sistema Redox.

- Interface del Módulo de Reportes {XE «Sistema Redox»}. Está enmarcada en dos variantes, los Reportes de Sector y los Reportes de Línea. En la **Figura II.25**, se muestra un ejemplo de reporte de Línea interpretado.
- Interface del Módulo de Interpretación {XE «Sistema Redox»}. Está conformada por un vínculo a un objeto *Excel*, el cual es portador de la metodología del modelaje matemático del proceso de interpretación para objetivos de petróleo, minerales, contaminación ambiental y enterramientos arqueológicos metálicos (**Figura II.26**).
- Interface del Módulo de Herramientas {XE «Sistema Redox»}. Se concentran los programas que han sido de utilidad dentro del Sistema. Estas herramientas son: Transformación de Coordenadas, Zonación Espacial, Análisis de Agrupaciones, Generación de Curvas y Trapecios Cartográficos.

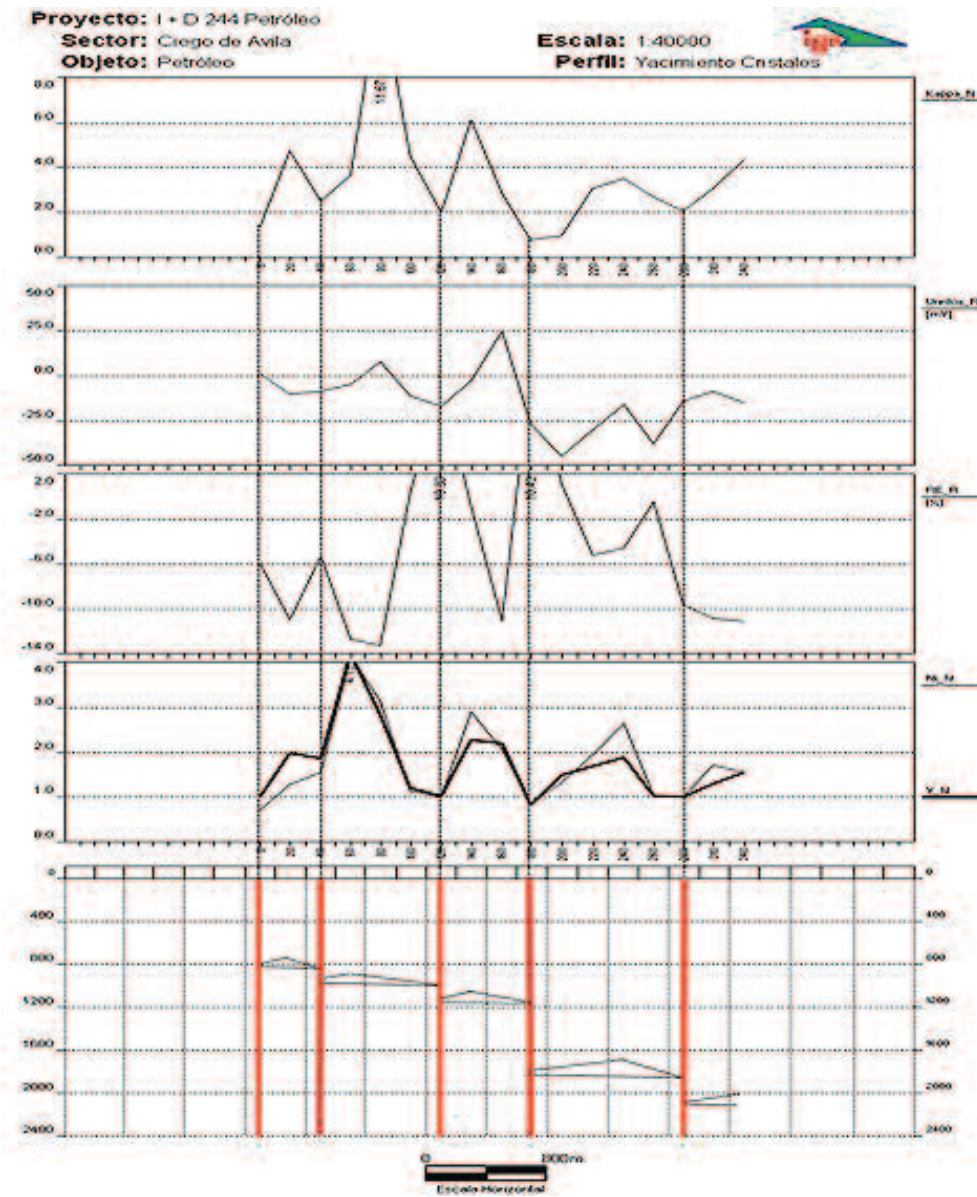
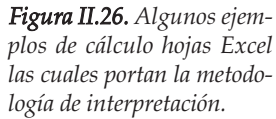


Figura II.25. Un ejemplo de un perfil interpretado por el Sistema Redox sobre un objetivo petrolero.

- Interface del Módulo de Exportar {XE «Sistema Redox»}. Establece la comunicación del Sistema Redox con los sistemas comerciales. Existen acciones no implementadas en el Sistema Redox, puesto que hay programas comerciales que lo hacen, por ejemplo: confección de mapas, entre otras. Los sistemas con los cuales el Sistema Redox establece relación mediante exportación de ficheros son: *AutoCad* (Formato: dxf), *GeoSoft* (Formato: xyz), *Surfer* (Formatos: dat y bln).
- Interface de los Nomencladores {XE «Sistema Redox»}. En el Sistema Redox se establecen una serie de codificadores los cuales solo serán editados por el Administrador del sistema.



- En la **Tabla II.6** se muestra el volumen de información en el Sistema Redox por cada una de las esferas de aplicación hasta la fecha de redacción de este trabajo.

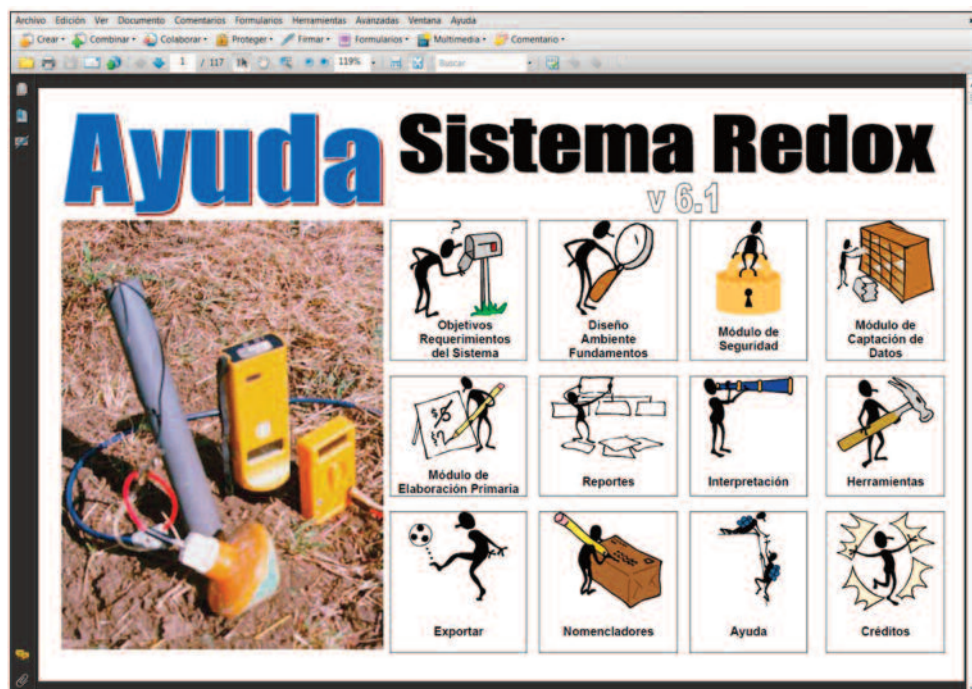


Figura II.27. Inicio de la ayuda del Sistema Redox conformada.

Esferas de aplicación (Objetivos)	Número de observaciones	Volumen Total [km]
Petróleo y Gas	985	246 250
Minerales metálicos	1873	41 743
Estudios medioambientales	318	7 635
Estudios arqueológicos	50	26
Total:	3226	253 593

Tabla II.1. Volumen de información en el Sistema Redox por cada una de las esferas de aplicación⁴.

II.3. Referencias Bibliográficas

{XE «SISTEMA REDOX»}

- Booch. G.** 1996. Análisis y Diseño Orientado a Objetos con aplicaciones, 2^a edición, Addison-Wesley/Díaz de Santos. Disponible: http://www.cuspide.com/detalle_libro.php?isbn=9684443528. [citado mayo 2004].
- Booch. G.** 1999a. Unified Modeling Language UML. Notación guide and UML Semantics, version, 1.3. Disponible: <http://www.rational.com> [citado mayo 2004].

³ Tabla actualizada hasta agosto del 2021.

- Booch, G.**, 1999b. El lenguaje unificado de modelado. Disponible: <http://www.agapea.com/El-lenguaje-unificado-de-modelado-n11514i.htm> [citado mayo 2004].
- De Marco, T.** 1982. Structured Analysis and System Specification. Yourdon Press. New York.
- Larman, C.** 2002. UML y Patrones: Una introducción al análisis y diseño orientado a objetos y al proceso unificado, 2^{da}, Prentice-Hall. Disponible: <http://www.fitco.edu.co/iacademica/sistemas/Agora/articulos/UML.pdf> [citado mayo 2004].
- Karbach, W.; M. Linster; A. Voss.** 1990. Model-Based approaches: One label-one idea? En Wielinga, Boose, Gaines Schreiber y Someren, Eds. *Current Trend in Knowledge Acquisition*. pp. 173-387. Amsterdam: IOS Press.
- Kent-Nagle, R.; Saft Edward B.** 1992. Fundamentos de Ecuaciones Diferenciales. Estados {XE «Estados»} Unidos: Addison - Wesley Iberoamericana, 1992.
- Morales-Pita, A. {XE «Antonio»} E.** 1984. Metodología de la modelación económico-matemática. La Habana: Editorial Científico-Técnica.
- Reenskaug, T.** 1996. Working with Objects, Manning. Disponible: <http://www.2020ok.com/4013.htm>. [citado mayo 2004].
- Riel, A.** 1966. Object-Oriented Design Heuristics. Disponible: <http://www.iam.unibe.ch/~girba/download/Mari05aSAIL.pdf> [citado mayo 2004].
- Rodríguez, O.** 2005: Manual de Usuario *Sistema Redox*. Derecho de Autor. Certificación de Depósito Legal Facultativo de Obras Protegidas. CENDA. Registro: 1589-2005.
- Schulcloper, J. R.** 1990. Modelos {XE «Modelos»} Matemáticos para el Reconocimiento de Patrones {XE «Patrones»}. Facultad de Matemática, Física y Computación. Universidad Central de Las Villas. (Folleto), pp 245.
- Steels, L.** 1992. Components of Expertise. *Al Mazagine*, 11(2). pp. 28-49.

III. Desarrollo histórico del Complejo Redox.

La evolución histórico-práctica de la técnica de Potencial Redox en suelos, usada en combinación con la Kappametría a los fines de la exploración de hidrocarburos y minerales metálicos (Pardo y Stout, 1999), desde su innovación e introducción en 1992, (Alfonso *et al.*, 1993) hasta el año 2001, (Pardo y Carballo, 1996; Pardo *et al.*, 1996; Pardo y Domínguez, 1997; Pardo *et al.*, 1997; Pardo y Stout, 1999; Pardo *et al.*, 2000(a); Pardo *et al.*, 2000(b); Pardo y Stout, 2001, Pardo *et al.*, 2001) exigía de un nuevo estadio teórico- experimental dirigido a la complementación multiparamétrica, el desarrollo del basamento teórico del complejo de técnicas y la implementación de su interpretación cuantitativa. Para eso, se hacía necesaria la sustentación empírica, con un volumen mínimo (todavía insuficiente) de observaciones sobre objetivos conocidos o áreas de control, el cual se realizaría dentro de dos proyectos de investigación para el período 2001-2002 (Pardo, 2002) y 2003-2004, (Pardo, 2004). Las áreas eran seleccionadas al atender al propósito de caracterizar diferentes tipos de ambientes y depósitos con variadas características: de yacencia, geométricas y de composición, de manera que pudiera hacer más representativo el análisis para el diseño de los parámetros de interpretación cuantitativa.

Los progresos alcanzados en el desarrollo histórico del **Complejo Redox** {XE «Tecnología Redox»} han seguido el camino que va desde la observación empírica, al pasar por la experimentación y la postulación de expresiones matemáticas que modelan las regularidades observadas, hasta una aproximación a la teoría. Las principales etapas de este desarrollo son las siguientes:

■ 1991-1993

- Invención, diseño e introducción de la Medición *in situ* del Potencial Redox {XE «Potencial Redox»} en suelos {XE «**Suelos**»}.
- Innovación, diseño e introducción de los Escenarios {XE «Escenarios»} de Espectrometría Gamma Aérea (EGA) para petróleo: El índice integrado K/eTh.

■ 1996-2001

- Establecimiento de la relación genética entre el Potencial Redox {XE «Potencial Redox»} Reducido por el fondo local y la Susceptibilidad Magnética del suelo a partir del *Principio de la Migración Vertical de los Iones Metálicos*. Introducción del complejo Uredox {XE «Uredox»}-Kappa {XE «Kappa»} en la prospección {XE «**prospección**»} geológica.
- Invención, diseño e introducción de la Medición Temporal del Potencial Redox {XE «Potencial Redox»}, a partir de la formulación matemática de su comportamiento transiente.
- Establecimiento de la relación genética entre el Potencial Redox {XE «Potencial Redox»} Reducido por el Nivel de Fondo local y la Pedogeoquímica {XE «Pedogeoquímica»} a partir del Principio de la Migración Vertical de los Iones Metálicos. Introducción del complejo Uredox {XE «Uredox»}-Kappa {XE «Kappa»}-Pedogeoquímica en la prospección {XE «**prospección**»} geológica.

■ 2002-2005

- Establecimiento de la relación genética entre la Reflectancia Espectral {XE «Reflectancia Espectral»} Reducida por el Nivel de Fondo local en muestras de suelos {XE «suelos»} y la Pedogeoquímica {XE «Pedogeoquímica»}, a partir del Principio de la Migración Vertical de los Iones Metálicos. Innovación, diseño e introducción de los Escenarios {XE «Escenarios»} Satelitales para petróleo y minerales metálicos {XE «**metálicos**»}.
- Introducción de la normalización por el Nivel de Fondo local de la Susceptibilidad Magnética y la Pedogeoquímica {XE «Pedogeoquímica»}.
- Integración definitiva del Complejo Redox {XE «Tecnología Redox»}: Escenarios {XE «Escenarios»} a Distancia, Potencial Redox {XE «Potencial Redox»}, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral {XE «Reflectancia Espectral»} y Pedogeoquí-

mica {XE «Pedogeoquímica»} (atributos reducidos o normalizados por el Nivel de Fondo local).

- Invención, desarrollo (modelación) e implementación automatizada de las expresiones matemáticas que vinculan a los distintos atributos con los parámetros de yacencia, geométricos y de composición de los objetos de prospección {XE «**prospección**»}.
- Innovación, diseño e introducción del Sistema Redox {XE «Sistema Redox»} para las aplicaciones de la prospección {XE «**prospección**»} geológica (petróleo y minerales), los estudios medio ambientales y arqueológicos.

■ 2010-2013

- Aproximación a la teoría de los procesos que controlan la movilización metálica, el transporte y la acumulación en el ambiente superficial sobre cuerpos meníferos enterrados y depósitos de hidrocarburos.

En sus inicios, las aplicaciones a la prospección geológica del método de Potencial Redox en suelos están determinadas por la posibilidad de detección de la columna de ambiente reductor que se forma directamente sobre las ocurrencias metálicas y de hidrocarburos y que alcanza la parte superior del corte. Dentro de esta columna se favorece la conversión de los minerales de hierro no magnéticos a variedades magnéticas más estables, hecho que explica la observada correlación inversa con la Susceptibilidad Magnética y justifica la integración de ambos métodos. El empleo de estas técnicas posee como propósito complementar el complejo convencional de prospección con fines de la reducción de áreas y/o de la selección de los objetivos más favorables, al resultar en un incremento de la efectividad geólogo-económica de las investigaciones.

La medición *in situ* del Potencial Redox (ORP) en suelos constituía una modalidad poco conocida en la década de los 90, determinación que se realizaba de forma convencional sobre medios acuosos o semilíquidos (agua, fangos y soluciones de suelos). Su aplicación aislada o combinada con la Kappametría de suelos a los fines de la prospección geológica tampoco había sido reportada entonces. Los inicios del desarrollo e introducción en Cuba de este método datan de 1992-93 (Alfonso *et al.*, 1993), donde fue empleado, en combinación con otras técnicas no convencionales, para revelar zonas superficiales de ambiente reductor sobre ocurrencias de hidrocarburos. Ha sido aplicada con posterioridad, en combinación con la Kappametría, sobre di-

versos objetivos metálicos y de hidrocarburos (Pardo y Carballo, 1996; Pardo y Domínguez, 1997; Pardo *et al.*, 1997; Pardo y Stout, 1999; Pardo *et al.*, 2000a; Pardo *et al.*, 2000b; Pardo y Stout, 2001; Pardo *et al.*, 2001).

Por su parte, la Kappametría de suelo con fines de la prospección geológica posee sus antecedentes en la detección de aureolas de dispersión sobre ocurrencias metálicas, aunque también era conocida en la actividad petrolera (Saunders *et al.*, 1991). Esta técnica se orientaba a la detección de anomalías de la Susceptibilidad Magnética en un determinado horizonte del suelo, a partir de mediciones en muestras tomadas para otro método (muestras metalométricas o muestras para el análisis de gases hidrocarburos).

III.1. Referencias Bibliográficas

- Alfonso, J. R.; M. Pardo.** 1993. Informe sobre los trabajos metodológicos-experimentales de métodos geofísicos y geoquímicos no convencionales para la prospección de hidrocarburos someros en Cuba Septentrional (inédito). ENG, La Habana.
- Pardo, M.; F. Rojas.** 1996. Naturaleza geoquímico-mineralógica de las anomalías aerogammaespectrométricas vinculadas con depósitos de hidrocarburos; primeros resultados en Cuba: Pina-Ciego de Ávila (inédito). IGP, La Habana.
- Pardo, M.; O. Carballo.** 1996. Mediciones experimentales in situ del Potencial Redox en suelos sobre objetivos meníferos en los sectores de Loma de Hierro y Loma Roja, Provincia de Pinar del Río (inédito). IGP, La Habana.
- Pardo, M.; E. Domínguez.** 1997. Reporte sobre los trabajos de Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética y Análisis Químicos de suelos, para petróleo, en un área del Sur de Camagüey (Cuenca Vertientes) (inédito). IGP, La Habana.
- Pardo, M.; J. Álvarez; G. Echevarría.** 1997. Técnicas geofísico-geoquímicas no convencionales para la prospección de hidrocarburos; progresos de su aplicación en Cuba. III Congreso Cubano de Geología, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout.** 1999. El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la Kappametría a los fines de la prospección geológica. I Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout y otros.** 2000(a). Informe del TTP Aplicación de la medición *in situ* del Potencial Redox en suelos sobre objetivos de prospección de minerales metálicos e hidrocarburos (inédito). ONRM, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout; R. Aragón; E. Álvarez; R. Lugo.** 2000b. El método de Potencial Redox en la prospección de minerales; dos ejemplos: el yaci-

- miento Mella y el stockwork La Unión. IV Congreso Cubano de Geología, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout; E. Kessell; M. Mugía; M. A. Morales; F. Rojas.** 2001. La nueva técnica geoquímica de Potencial Redox en suelos: Principios y Aplicaciones. II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
- Pardo, M.; R. Stout.** 2001. El método de Potencial Redox en suelos y su aplicación combinada con la Kappametria a los fines de la prospección petrolífera. II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.
- Pardo, M.** 2002. Informe del Proyecto I+D 227: Análisis teórico y diseño de los parámetros cuantitativos del método Redox en áreas de control (inédito). IGP, La Habana.
- Pardo, M.** 2004. Informe del Proyecto I+D 244: Estimaciones cuantitativas por el *Complejo Redox* en su aplicación a la prospección geológica, los estudios medio-ambientales y arqueológicos (inédito). IGP, La Habana.
- Saunders, D. F.; K. R. Burson; C. K. Thompson.** 1991. Relationship of soil magnetic susceptibility and soil gas hydrocarbon measurements to subsurface petroleum accumulations. Bull. Am. Ass. Petr. Geol., 75, 389- 408.

IV. Procesos que controlan la movilización, el transporte y la acumulación metálica en el ambiente superficial sobre los cuerpos metálicos enterrados y los depósitos de hidrocarburos

Las observaciones empíricas, de forma particular aquellas que usan la geoquímica de suelo de alta resolución como herramienta de análisis, sugieren que las anomalías geoquímicas de suelo sobre la mineralización y los depósitos de hidrocarburos son dinámicas y mantenidas por un suministro ascendente de iones a partir de la fuente. Esto ha sido de modo particular evidente en las áreas de recubrimiento exótico. La investigación para definir una teoría única y coherente sobre la movilización y la migración vertical de iones para formar anomalías geoquímicas (y algunas geofísicas) sobre los cuerpos meníferos enterrados y los depósitos de hidrocarburos, será una tarea actualizada. Se cree que no hay un único mecanismo capaz de explicar de forma adecuada el desarrollo de las anomalías geoquímicas del suelo en todas las situaciones geológicas, dada la amplia variedad de terrenos y climas que existen y las diferentes condiciones encontradas por debajo y por encima del nivel freático.

En el pasado, ha habido un esfuerzo concertado para examinar los procesos de movilización metálica y los mecanismos de transporte metálico (incluyendo los metales asociados a microfiltraciones de hidrocarburos) a través del recubrimiento y la acumulación resultante de estos metales, verticalmente transportados, en el medio superficial. En consecuencia, muchos hechos relacionados bien documentados podrían describirse, aunque todavía hay debate sobre los factores que los controlan, por ejemplo:

- La presencia de anomalías geoquímicas secundarias en el recubrimiento transportado sobre cuerpos meníferos enterrados.

- Los gases (hidrocarburos y altas concentraciones de N, CO₂, H₂ y otros) sobre cuerpos meníferos enterrados resultantes de las reacciones agua-roca a largo plazo entre los cuerpos meníferos y sus rocas de caja y también de la actividad bacteriana durante la oxidación de la mena.
- La investigación y los estudios de caso sobre las zonas contenedoras de metal/hidrocarburos conocidas que muestran que los iones metálicos móviles y los compuestos adicionales se acumulan en los suelos superficiales por encima de estas «fuentes de metales».
- El proceso de migración vertical a la superficie de los gases y metales químicamente reductores a partir del objetivo oxidante enterrado (cuerpos meníferos y depósitos de hidrocarburos), lo que se traduce en «chimeneas reductoras» que alcanzan la superficie, «los carbonatos y casquetes ácidos» en la zona no saturada y los metales que se acumulan en una «zona de acreción metálica» muy superficial en los suelos.

Al tener en cuenta la relevancia del Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos Móviles, en el que se basan muchas técnicas actuales de exploración geoquímica y geofísico-geoquímicas (es decir, CHIM, MMITM, SGH, Complejo Redox), se presenta una revisión sumaria de diferentes aspectos en las teorías relacionadas con la movilización metálica, el transporte vertical a la superficie y la acumulación resultante de estos metales, verticalmente transportados, en el medio superficial a partir de los cuerpos meníferos enterrados y depósitos de hidrocarburos.

IV.1 Resumen de algunas de las técnicas de exploración geoquímica y geofísico-geoquímicas utilizadas para el estudio de los cuerpos meníferos ocultos y los depósitos de hidrocarburos

Según Fabris y Keeling (2006) la técnica electroquímica CHIM (Chastichnoe Izvlechennye Metallov) fue desarrollada inicialmente en Rusia, con versiones modificadas desarrolladas en Estados Unidos de América y China. Se basa en la fuga de iones (rápidos) a partir de un cuerpo menífero y su transporte a la superficie por una fase de vapor / gas (Goldberg, 1998), donde una corriente directa aplicada posee el potencial para recogerlos en electrodos diseñados de forma especial y colocados en el suelo, a partir de un volumen mucho mayor del que sería factible con los métodos de muestreo de suelos tradicionales.

Según la Visión General SGS MMITM (2004) los Iones Metálicos Móviles (átomos y moléculas metálicas cargadas) medidos en los suelos superficia-

les, se liberan de los cuerpos meníferos y acumulaciones de hidrocarburos oxidados y viajan hacia arriba, hacia la superficie. Se ha demostrado por un estudio de la Organización de Investigación de la Industria Minera de Canadá (CAMIRO), al usar isótopos de Pb, que estos Iones Metálicos Móviles son transportados desde los cuerpos meníferos profundamente enterrados a la superficie. Científicos de todo el mundo han estudiado este fenómeno desde hace muchos años. El transporte de vapor/gas, la difusión, la advección de agua y gas (bombeo sísmico y barométrico), el transporte electroquímico, la convección y el ascenso capilar, son algunas de las teorías que se han propuesto. El ascenso capilar se piensa que es un proceso muy importante en el entorno cercano a la superficie (por encima del manto freático), que es responsable del mantenimiento de las anomalías. A medida que los iones llegan a la superficie, se adhieren débilmente (son adsorbidos) a las partículas del suelo. Estos son los iones que son medidos por la técnica MMITM (lixiviaciones parciales) para encontrar la mineralización y los hidrocarburos en las profundidades. Los iones débilmente adheridos están en concentraciones muy bajas. Debido a que los iones han llegado de modo reciente a la superficie ellos proporcionan una «señal» precisa de forma directa sobre los objetivos metálicos. Cuando los iones metálicos móviles han llegado a la superficie ellos tienen una vida útil limitada en forma de iones «móviles». En la superficie los iones están sujetos al intemperismo y están obligados por los procesos formadores del suelo (es decir, se convierten en parte del suelo).

Según Sutherland (2011) las bacterias que lixivian y metabolizan compuestos a partir de depósitos minerales o *plays* petroleros en la profundidad, de modo eventual liberan hidrocarburos que migran a la superficie. Muestras superficiales tales como el suelo, sedimentos, turba, humus, e incluso nieve, actúan como colectores de estos hidrocarburos. Los investigadores anteriores han utilizado compuestos muy volátiles en la gama de C₁ a C₄ de la serie del carbono y también tienen la hipótesis de la utilización de hidrocarburos más pesados (en la gama de C₅ a C₁₇ de la serie del carbono). La investigación con estos hidrocarburos más pesados se ha traducido en una geoquímica más robusta, que se define como Hidrocarburos Gaseosos del Suelo (SGH, investigado y desarrollado desde el año 1996). Los compuestos SGH pueden migrar desde la profundidad en una forma volátil, pero no son gaseosos a temperatura y presión ambiente. Los compuestos orgánicos desorbidos se recogen y se introducen en un Cromatógrafo de Gases/Espectrómetro de Masas (GC/MS), donde 162 de estos compuestos de hidrocarburos más pesados se miden en el rango de parte por tonelada (ppt). Los datos se revisan de modo forense al resultar en combinaciones y proporciones específicas de los hidrocarburos, que definen diferentes firmas orgánicas relacionadas de modo di-

recto con el objetivo. La dispersión geocromatográfica superficial de varias clases de compuestos orgánicos también se ha investigado y encontrado para ser capaz de señalar la localización de objetivos de exploración enterrados. SGH es, pues, una geoquímica predictiva de penetración profunda de doble propósito que permite no sólo la localización, sino que también identifica el tipo de objetivo que estará presente. La firma geoquímica de SGH se ha demostrado exitosa para la localización de *plays* de Petróleo, Gas y Carbón a profundidades de hasta 1000 metros; objetivos minerales también se han identificado a profundidades de hasta 700 metros.

Hamilton (2007) recomienda el uso simultáneo de tres clases de herramientas geoquímicas con el fin de optimizar la eficacia de la geoquímica en la discriminación y la priorización de los objetivos enterrados: lixiviaciones selectivas (MMI™ y Lixiviación Enzimática®) técnicas de hidrocarburos de suelo (SGH y Pirólisis Desorción de Suelo (SDP)) y el análisis del pH de la suspensión del suelo. Según este autor, la MMI™ y la Lixiviación Enzimática® miden no solo la señal elemental primaria emitida por los depósitos minerales enterrados, sino que también pueden detectar una señal secundaria causada por los principales procesos geoquímicos que ocurren en la cobertura por encima del depósito y relacionada con el objetivo enterrado. Entre estos procesos secundarios un papel importante lo juega la acidificación debido a la oxidación metálica por encima del nivel freático. Además, las técnicas de hidrocarburos de suelo son útiles para medir el aumento de hidrocarburos más pesados y otros gases en los suelos por encima de los depósitos minerales. Los cambios se interpretan como relacionados con aumentos en microbios autótrofos que prosperan en una «chimenea reductora» que ocurre en el recubrimiento por encima del depósito mineral. Finalmente, el pH de la suspensión del suelo busca detectar respuestas del pH que se sabe que ocurren sobre los depósitos minerales. Los resultados pueden tomar la forma de un área acidificada encima del nivel freático (el «casquete ácido») o una zona alcalina debajo de ella.

Según Pardo *et al.* (2003) y Pardo & Rodríguez (2009) el Complejo Redox (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Geoquímica de Suelos/lixiviación total) es un complejo de técnicas de exploración no-convencionales utilizado (con carácter complementario dentro del complejo convencional de exploración) para la detección directa y evaluación de los diversos objetivos de naturaleza metálica. Se basa en el Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos Móviles (iones liberados de objetivos metálicos en profundidad) al ofrecer información sobre las modificaciones del terreno que tienen lugar en su parte más alta (10-30 cm del perfil del suelo) sobre el objetivo. Este complejo ha sido aplicado con

éxito en diferentes ámbitos: la exploración de hidrocarburos y minerales metálicos; los estudios de contaminación metálica y de hidrocarburos en suelos y subsuelo y la búsqueda de enterramientos arqueológicos metálicos. El Complejo Redox mejora la probabilidad de éxito, ya que cada método detecta un aspecto físico o químico diferentes resultado de un único proceso microbiano/geoquímico a gran escala que ocurre sobre los depósitos de mineralización y de hidrocarburos enterrados: «chimeneas reductoras» que llegan a la superficie; cambio de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral del suelo y metales que se acumulan a muy poca profundidad en los suelos (10-30 cm) en una «zona de acreción metálica». A pesar de su potencial, hay muchas fuentes posibles de error cuando se utiliza el Complejo Redox: atributos físicos, como la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral del suelo son de alguna manera litológico dependiente; el Potencial Redox depende de las zonas superficiales reductoras u oxidantes de diferente naturaleza; y la señal geoquímica de suelos proveniente del objetivo de mineralización o hidrocarburos es en general, sutil y algunos procesos superficiales pueden producir respuestas equivalentes o más fuertes. De acuerdo con Hamilton (2007) una de las fuentes más probables de error de la geoquímica de suelos en los terrenos más secos es el contenido de humedad variable, debido a que estos suelos están asociados a un pH más ácido y a un Nivel de Fondo mayor de las concentraciones de metales tanto en suelos de humus como minerales. El Complejo Redox es apropiado para la discriminación de objetivos y la priorización de numerosos objetivos geofísicos. Sin embargo, es menos adecuado para la cartografía de objetivos, es decir, la observación de grandes redes, debido a su baja productividad (se utiliza un paso de muestreo corto, no más de la mitad de la anchura prevista del objetivo, además que la medición del Potencial Redox requiere mucho tiempo) y también a causa de las muchas «falsas anomalías» relacionadas con las condiciones superficiales variables. En general, los observadores conscientes, las buenas notas de campo y un conocimiento básico de los procesos geofísico-geoquímicos superficiales durante el estadio de interpretación, son los factores críticos de éxito.

IV.2 Resumen de algunas teorías que explican las anomalías superficiales sobre la mineralización profundamente enterrada

Según Coker (2007) los procesos postulados para explicar las anomalías superficiales sobre la mineralización enterrada en lo profundo, incluyen el transporte de vapor/gas, la difusión, el transporte electroquímico, la migración capilar de iones, la convección y la advección de agua/gas (bombeo sísmico y barométrico).

Malmqvist y Kristiansson (1984) han sugerido un mecanismo por el cual el material iónico es arrastrado hacia arriba por gases portadores como el nitrógeno y el dióxido de carbono. Un modelo gaseoso en el cual los iones son unidos, desde un punto de vista hidrófilo, a las burbujas de gas debajo del nivel freático se prefirió (Mann *et al.*, 1995) después de un número de mecanismos investigados. Los investigadores rusos (por ejemplo, Goldberg, 1998) han sugerido de manera constante la presencia de una clase de «iones rápidos» ya que la difusión química en general se descuenta por la mayoría de los autores por ser demasiado lenta (los modelos basados en la difusión sufren de bajas tasas de migración). Smee (1998) señaló que los iones de hidrógeno podrían difundirse lo suficientemente rápido para estar involucrados en la redistribución química que se produce en los halos de alteración por encima de los depósitos de minerales y de hidrocarburos, pero admite, que en el caso de los depósitos de oro en Nevada, «el pH solo no explica los patrones observados, sobre la mineralización».

Se han propuesto teorías electroquímicas (Sato y Mooney, 1960; Govett, 1973; Hamilton, 1998, 2000) y hay pocas dudas sobre los efectos electroquímicos en una parte o en todos los depósitos. Se cuestiona aun el hecho de que si son una causa universal o un resultado de la migración iónica. Los modelos electroquímicos muestran una zona catódica en la parte superior de un conductor de sulfuro enterrado. Los cationes son atraídos hacia el cátodo en lugar de a la superficie, sin embargo, los metales que más comúnmente migran como cationes se encuentran formando anomalías en la superficie. El modelo desarrollado por Hamilton (1998) propone que la propagación hacia arriba de especies reducidas al manto freático forma una columna reducida sobre la zona mineralizada, así como desarrolla anomalías geoquímicas en la cobertura superficial suprayacente. La oxidación del Fe^{2+} y su precipitación en oxi-hidróxidos férricos provoca la producción de ácido y la disolución de carbonato, que precipita en el borde de la columna reductora, donde el pH es más alto. Las tasas teóricas de migración de iones en campos electroquímicos son mucho más rápidas que las velocidades de difusión y ellas son compatibles con la formación de anomalías geoquímicas en la superficie, en las jóvenes (~ 8000 años) capas gruesas de sedimentos glaciales que cubren los depósitos minerales (Hamilton, 1998; Hall *et al.*, 2004).

El ascenso capilar ha sido sugerido por Mann *et al.* (1997) como un proceso importante en la distribución y redistribución de los iones en el medio ambiente cercano a la superficie (es decir, por encima del nivel freático) tanto en los ambientes áridos y no áridos. Mann *et al.* (2005) llevaron a cabo experimentos de laboratorio que sugieren que el ascenso capilar y la evaporación desempeña un papel dónde los elementos se acumulan en el perfil del

suelo. La transpiración de la zona radicular también afectaría la deposición de soluto y la adsorción en la zona de la evapotranspiración. Además, los autores indicaron que, tal vez, la percolación de las aguas subterráneas después de la lluvia, así como los efectos alcistas del ascenso capilar podrían explicar muchas de las características del emplazamiento de iones en los suelos. Las observaciones empíricas sugieren que las anomalías se localizan con preferencia de 10 a 25 cm por debajo de la interface del suelo, un aspecto muy importante debido a que la profundidad óptima de muestreo en suelos es fundamental para la detección de anomalías. El modelado de laboratorio de Mann *et al.* (2005) también sugirió que la convección a partir del calor producido por la oxidación del depósito podría, en algunos casos, ser un método para el rápido ascenso de los iones por debajo de nivel freático.

Según Cameron *et al.* (2004) en terrenos áridos o semiáridos, con una potente zona no saturada, el transporte advectivo, que es la transferencia de masa de agua subterránea o aire, junto con sus componentes disueltos o gaseosos, es el único medio viable conocido para el movimiento de elementos a la superficie, la difusión de los iones en el agua o gases en el aire, es varios órdenes de magnitud más lento. Ejemplos de transporte advectivo son el bombeo de agua subterránea mineralizada a la superficie durante la actividad sísmica (dilatancia cíclica o bombeo sísmico) y la extracción de aire más gas por el bombeo barométrico. Ambos mecanismos requieren la fractura de la roca y la interpretación de las anomalías derivadas requiere la consideración de las estructuras neotectónicas.

Klusman (2009) describe un modelo para una chimenea reductora por encima de los depósitos meníferos que complementa el modelo de carga eléctrica existente. Dicho modelo enfatiza el papel de los gases reducidos en la formación de la chimenea. Un modelo computarizado para el transporte de gases reducidos en la zona no saturada y la subsecuente oxidación microbiana se aplica a una chimenea de gas hidrocarburo. El modelo de zona no saturada se aplica al transporte vertical de las partículas ultrafinas, con aplicación al oro (Au). El bombeo barométrico provoca gradientes de presión en la zona no saturada que son capaces de mover partículas sub-micras de oro (Au) a la superficie.

IV.3 Resumen sobre las teorías que explican las anomalías superficiales sobre los depósitos de hidrocarburos

Según Price (1985) la microfiltración se define como la migración vertical a la superficie de la tierra, en lo fundamental, de la Serie de Hidrocarburos (SHC) C₁ a C₅ a partir de los depósitos hidrocarburos para formar hidrocarburos y otras anomalías. La migración vertical de la SHC a partir de depósitos de hidrocarburos cambia de alguna manera las características físicas y químicas

de los suelos superficiales y de cerca de la superficie por encima de los depósitos o incluso de la columna entera de roca por encima de éstos.

Las técnicas que miden estos cambios se denominan Métodos Indirectos de Detección Geoquímicos (y Geofísicos) (IDG) por las dos siguientes razones:

- 1) Tales cambios son un resultado secundario o indirecto, de la microfiltración de hidrocarburos y
- 2) También pueden ser causados por acumulaciones de metano biogénico.

Muchos autores han enumerado diferentes métodos IDG, que incluyen: El análisis radiométrico, el Potencial Redox, el análisis de bitumen (luminiscencia o fluorescencia) el análisis de «sales» del suelo (principalmente carbonatos) el análisis de metales traza o de elementos traza, el análisis geobotánico, la mineralogía del suelo (litológico) y los análisis hidroquímicos y magnéticos. Un método IDG no relacionado con la microfiltración de hidrocarburos, pero que permite el diagnóstico de un depósito de hidrocarburos es el levantamiento de helio.

Según Saunders *et al.* (1999) (**Figura IV.1**) las combinaciones de métodos como la detección de microondas aérea, los análisis de laboratorio de gas hidrocarburo de suelo, el levantamiento aeromagnético de fuentes superficiales, las mediciones de la susceptibilidad magnética del suelo, las mediciones de rayos gamma aéreas y de superficie, así como geomorfología, se utilizan para encontrar depósitos de petróleo y gas productivos. Los resultados sugieren, que el uso de estos métodos, aumentarían de modo sustancial la probabilidad de éxito de la perforación y reducir los costos en la búsqueda para ambientes geológicos seleccionados; sin embargo, estos métodos de superficie no pueden revelar la profundidad, el tamaño o la calidad de los reservorios o incluso si se encuentran hidrocarburos productivos.

Según Fedikow *et al.* (2009, 2010) los métodos de Exploración Geoquímica de Superficie (EGS) tienen una historia larga y variada en su aplicación para la búsqueda de depósitos de petróleo y gas, centrada en la recopilación y análisis de gases del suelo y la integración de la expresión química de la microfiltración de hidrocarburos con las bases de datos geológica y geofísica (sísmica). Por otro lado, los distintos reservorios de hidrocarburos representan «fuentes metálicas» de características geoquímicas variables, es decir, ellos contienen diferentes elementos traza en cantidades variables.

Las técnicas EGS identifican metales asociados a microfiltraciones de hidrocarburos a partir de los mismos reservorios, mediante la medición de los Iones Metálicos Móviles en los suelos superficiales y de tal modo, discri-



Figura IV.1. Modelo de alteraciones relacionadas con la microfiltración de hidrocarburos ligeros sobre una acumulación de petróleo (Tomado de Saunders et al., 1999)

minar objetivos «productivos» frente a objetivos sísmicos «no productivos». También será usado para delinear los recursos anulados de petróleo y gas en yacimientos petrolíferos agotados, para evaluar objetivos sísmicos por su prospectividad o para evaluar áreas para la presencia del potencial de petróleo y gas.

La fuente será cualquier acumulación de metales en contraste con las rocas circundantes como petróleo y gas dentro de los reservorios y carbón. De modo independiente al tipo de zona metálica enriquecida en profundidad los iones metálicos dentro de esa zona se movilizarán a la superficie bajo una variedad de mecanismos, incluyendo el transporte en fase de vapor/gas por hidrocarburos ligeros, vapor de Hg, He, dióxido de carbono y tal vez, otros mecanismos. Esto es evidencia de un sistema geoquímico continuo y dinámico. Al medir los Iones Metálicos Móviles en los suelos superficiales y por medio de determinaciones geoquímicas relacionadas adicionales, se documentará la presencia de respuestas apicales enfocadas (anomalías) directamente sobre las regiones fuentes, hecho avalado por muchas investigaciones y casos de estudios sobre las zonas de metal/con hidrocarburos conocidas.

Según Hale (2001) los mecanismos de migración de gas se dividen a grandes rasgos en tres categorías, con la migración en cada una de ellas gobernada por una ley física bien establecida, es decir:

1. Difusión (Ley de Fick)
2. Flotabilidad (Ley de Arquímedes)
3. Flujo de masa (Ley de Darcy)

La difusión, es una tendencia espontánea para eliminar un gradiente de concentración, debido a que no involucra ninguna fuerza externa; es un proceso constante, pero lento.

En general, la difusión es una fuerza marginal en términos de velocidad y la escala de la migración de gas y otros procesos más rápidos se superponen sobre ella. La flotabilidad se origina a partir de la diferencia de densidad entre el agua y las burbujas de petróleo o gas. Mac Elvain (1969) propuso por primera vez la formación de anomalías por microfiltración de hidrocarburos a partir del ascenso vertical de ultra-pequeñas (tamaño coloidal) burbujas de gas a través de los sistemas de microfracturas sobre los depósitos de hidrocarburos. Sus pequeños tamaños permiten superar los efectos fricción («aferrarse») por el movimiento browniano. Como señaló Mac Elvain (1969):

...las burbujas de gas de tamaño coloidal son desplazadas con facilidad hacia arriba por el agua circundante a velocidades de hasta varios milímetros por segundo, independientemente de las partículas sedimentarias que pueden intruir en el camino de su trayectoria browniana zigzagante hacia arriba. Tales extremadamente pequeñas burbujas pueden ascender de forma rápida cientos y hasta miles de pies de una manera no permisible para grandes burbujas de gas o de moléculas de gas individuales. Las grandes burbujas contienen un área superficial demasiado grande para poder demostrar una oscilación cinética o browniana, mientras que las moléculas individuales de gas disuelto poseen insuficiente diferencia de densidad para el desplazamiento gravitacional a pesar de que son empujadas poderosamente por el efecto browniano...

La flotabilidad es el único mecanismo en concordancia con los datos observados en cuanto a los bordes afilados y el desplazamiento lateral limitado de anomalías de gas superficiales (resolución) su rápida respuesta a los cambios de presión del yacimiento y la ausencia general de hidrocarburos más pesados que el C_5 en las anomalías de la superficie. El flujo de masa es un movimiento mayor de los hidrocarburos en monofase o disueltos en agua. El mismo requiere de una fuerza externa (gradiente de presión o el estrés estructural) y de un sistema de conductos bien definido. Por consiguiente, la microfiltración resultante de un flujo de masa se limita, como característica, a un área pequeña o cinturón, dentro del cual las anomalías son de alto contraste y a menudo contienen algunos hidrocarburos de alto peso molecular.

Según Klusman y Saeed (1996) se proponen tres mecanismos para la migración vertical de hidrocarburos ligeros: la difusión, el transporte en solución acuosa y la flotabilidad de microburbujas. Ha sido demostrada la di-

fusión como un mecanismo principal para la migración primaria de los hidrocarburos a partir de las rocas madres y como un mecanismo de transporte en la zona no saturada cerca de la superficie. Esto no explica la rápida desaparición de las anomalías superficiales después de que la producción comienza en un reservorio. Como un mecanismo de la migración vertical, tampoco explicaría la resolución observada en las anomalías superficiales. El transporte con agua, ya sea en solución o como una fase de hidrocarburo separada, es importante en la migración secundaria. Sin embargo, los modelos computarizados del proceso al utilizar las técnicas de diferencias finitas no explican la resolución observada y la rápida desaparición de las anomalías superficiales. Los autores favorecen el mecanismo de migración vertical por el desplazamiento de agua de las burbujas de gas ascendente, es decir, la «flotación de microburbujas». El modelado por ordenador de este mecanismo explica las observaciones de superficie. La estrecha correspondencia de las anomalías superficiales con las proyecciones en superficie de un reservorio y las anomalías superficiales que desaparecen con rapidez, tras el inicio de la producción son previstas por este modelo.

En cuanto a las chimeneas, Price (1985) observó que estos son columnas de roca por encima de los depósitos de hidrocarburos que se cree han sido modificadas por la migración vertical de la SHC o por alguna otra asociación de especies reducidas. Debido a estas modificaciones, las rocas sobre los depósitos de hidrocarburos son vistas a asumir diferentes propiedades litológicas, en comparación con las rocas que las rodean fuera de la estructura a profundidades equivalentes. Aunque Pirson (1964) al parecer fue el primero en utilizar el término «chimeneas», el concepto se rastrearía más atrás. La creación de chimeneas mineralizadas sobre los depósitos de hidrocarburos se ha atribuido, en gran medida, a la SHC «compuestos reducidos químicamente». Según este pensamiento, a medida que la SHC migra hacia o a través de un entorno, la misma «se oxida» para crear un ambiente reductor, lo que conduce a cambios sustanciales en la mineralogía de los sedimentos encajantes. El principal producto de la oxidación microbiana de los hidrocarburos es CO_2 , que asocia al agua para formar especies de carbonato-bicarbonato, que cambian de forma drástica el pH del sistema. El cambio mineralógico más evidente a partir de un aumento significativo en las concentraciones de CO_2 , es la precipitación de diversos carbonatos, de modo especial en calcita. Las soluciones ácidas a partir de las altas concentraciones de CO_2 también alteran o descomponen las arcillas, por la neutralización de estas soluciones, lo que resulta en un aumento de las concentraciones de sílice y alúmina. Tal alteración de la arcilla es con mucha probabilidad la responsable de los mínimos de radiación o halos reportados en los sedimentos superficiales sobre los yaci-

mientos de petróleo. La descomposición o alteración de la arcilla liberarían el potasio de las arcillas, incluyendo el potasio-40, que, para muchos autores, es el principal contribuyente a la radiactividad del suelo. Si este elemento es transportado por completo del sistema resultarían un «agujero» o mínimo en las lecturas del Nivel de Fondo normales. Si el elemento es transportado a los bordes de la proyección vertical del depósito de hidrocarburos, donde se precipita de la solución, resultaría un «halo» o «rosquilla» de valores altos que rodean los valores bajos sobre la proyección superficial del depósito de hidrocarburos.

En cuanto a distribuciones anómalas de hierro y manganeso en los sedimentos superficiales sobre depósitos de hidrocarburos, Donovan y Dalziel (1977) señalaron que el paso de los hidrocarburos y compuestos asociados, como el sulfuro de hidrógeno a través de rocas de la superficie provoca un ambiente reductor que, a su vez, reduce el hierro y el manganeso a estados de valencia más bajos, lo que resulta en la movilización y la eliminación de los elementos o bien la precipitación de la magnetita/maghemita o la coprecipitación del hierro y/o el manganeso con calcita en los cementos carbonatados sobre los depósitos de hidrocarburos. Las formaciones de magnetita, así como otras anomalías de hierro y manganeso forman la base para un número de diferentes técnicas de exploración geofísica incluyendo la susceptibilidad magnética del suelo, el levantamiento aeromagnético y la polarización inducida.

En cuanto a la microfiltración a partir de las acumulaciones de gases biogénicos, Price (1985) observó que la misma resulta en varias anomalías como magnéticas, suelos carbonatados (incluyendo calcita con CO₂ ocluido) y mínimos de radiación idénticas a las anomalías creadas por la microfiltración de un depósito de hidrocarburos termogénico. La perforación de tal anomalía, dejaría de dar lugar a un descubrimiento comercial de petróleo. Por lo tanto, los exploradores siempre estarán alertas sobre la posibilidad de falsas anomalías causadas por depósitos de metano biogénico sobre los estratos estables normalmente contenedores de petróleo de las cuencas sedimentarias. Debido a esta posibilidad, sólo los Métodos Directos de Detección Geoquímica (DDG) que miden las concentraciones de hidrocarburos C₂₋₅ (no asociados con C₆ + SHC) sea de forma relativa o absoluta, son específicos para los depósitos de hidrocarburos termogénicos.

IV.4 Resumen sobre la actividad microbiana relacionada con la mineralización enterrada y los depósitos de hidrocarburos

En cuanto a los microorganismos, la movilidad del metal y el transporte, trabajos en medios porosos y sedimentos acuáticos han investigado los procesos

mediante los cuales los microbios, los gases y los gradientes de carga causan la migración de metales y elementos a través de diversos medios en el subsuelo (Edwards *et al.*, 2000). Por ejemplo, un número de asociaciones microbianas han sido implicadas en la generación de gases por encima de los depósitos meníferos enterrados (bacterias reductoras del azufre, bacterias reductoras del hierro, metanógenas y metanótrofas). Por lo tanto, más allá de la movilización electroquímica y difusiva de los metales por encima de los depósitos de minerales, es necesario empezar a examinar el efecto del ascenso de las burbujas de gas en la movilidad de los elementos (Piotrowicz *et al.*, 1979).

En cuanto a Lovley y Chapelle (1995) los procesos microbiológicos en el subsuelo profundo son responsables de la generación del metano así como del $\text{Fe}^{(\text{III})}$ y la reducción del sulfato. Evidencias isotópicas y microbiológicas sugieren que la producción microbiana de metano es un mecanismo importante para la formación de metano en algunos depósitos portadores de hidrocarburos. El metano biogénico se encuentra a menudo en reservorios inmaduros poco profundos (menor de 2000 m) (Schoell, 1983). La producción de metano activo en el subsuelo profundo sólo se ha reportado en ausencia de aceptores de electrones alternativos, como el sulfato o el $\text{Fe}^{(\text{III})}$ (Thorsten-son *et al.*, 1979). La reducción microbiana del $\text{Fe}^{(\text{III})}$ es uno de los catalizadores microbianos dominantes de los procesos Redox en muchos entornos del subsuelo (Chapelle, 1993). Aunque la reducción del $\text{Fe}^{(\text{III})}$ en ambientes sedimentarios es considerada con frecuencia como un proceso no enzimático, los estudios han demostrado que la mayor parte de la oxidación de la materia orgánica acoplada a la reducción del $\text{Fe}^{(\text{III})}$ es catalizada de forma enzimática (Lovley, 1991; Lovley *et al.*, 1991). La reducción del sulfato ha sido uno de los procesos microbianos del subsuelo profundo estudiados con más intensidad. La reducción del sulfato se indica por la acumulación de bicarbonato asociada a la generación de sulfuros disueltos y por la composición isotópica relativamente ligera de los sulfuros disueltos.

Según Price (1985) la interacción de las bacterias con la SHC que migran de forma vertical, no sólo representa la base fundamental de la mayoría de los métodos de EGS, sino también explica muchos de los misterios de la microfiltración de hidrocarburos, incluyendo: las anomalías en forma de «halo», «las anomalías que desaparecen», las chimeneas, los mínimos de radiación, las anomalías de hierro/manganeso y mucho más. Todas las bacterias responsables de la oxidación de los hidrocarburos (que se encuentran en todas las profundidades en la columna de sedimentos por encima de los depósitos de hidrocarburos y en las aguas de los bordes de los depósitos de petróleo) producen dióxido de carbono y ácidos orgánicos a partir de la oxidación de los hidrocarburos. Además, los sulfato reductores producen sul-

furo de hidrógeno y las desnitrificadoras producen nitrógeno libre y óxido nítrico.

La oxidación microbiana de la SHC que migran hacia o a través de un entorno al crear un ambiente de reducción, consume oxígeno libre (O_2) complejos químicamente oxigenados o SO_4^{2-} o NO_3^{-2} , por ejemplo. En cualquier caso, el potencial Redox (Eh) del sistema se ve afectado de manera significativa. Al ser el principal producto de la oxidación microbiana de los hidrocarburos el CO_2 , este se asocia con el agua para formar especies de carbonato-bicarbonato que cambian de modo drástico el pH del sistema. Además de CO_2 , las bacterias reductoras de azufre también producen H_2S , que también afecta de manera significativa el pH del sistema. Tales cambios en pH/Eh resultan en campos de estabilidad mineral nuevos en su totalidad. Algunos minerales se vuelven inestables y se disuelven y son movilizados, otros se precipitan de la solución.

Saunders *et al.* (1999) se centran en el consumo bacteriano de los hidrocarburos ligeros ascendentes que crean dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. Esto alterará los sedimentos en la columna de roca sobre los depósitos, al provocar modificaciones detectables en las propiedades geomorfológicas, sísmicas, magnéticas y radiométricas.

IV.5 Consideraciones finales y Conclusión

Muchos hechos son comunes a los procesos de movilización de metales, transporte vertical a la superficie y la acumulación resultante de estos metales, verticalmente transportados, en el medio superficial sobre cuerpos meníferos enterrados y depósitos de hidrocarburos:

- Las reacciones agua-roca a largo plazo y la actividad microbiana que participan en la oxidación de la fuente de metal, al liberar gases e iones con un carácter químicamente reducido.
- Una «chimenea reductora», que llega a la superficie, se forma por encima de los depósitos de mineral y de hidrocarburos a partir del ascenso vertical de ultra-pequeñas (tamaño coloidal) burbujas de gas reducidas (con iones reducidos adjuntos) a través de los sistemas de microfracturas en la zona saturada, al ser la causa de los efectos electroquímicos sugeridos por la teoría correspondiente. Como consecuencia, las columnas de roca por encima de fuentes de metales están modificadas de alguna manera en sus propiedades físicas y químicas, en comparación con las rocas encajantes circundantes a profundidades equivalentes. Los cambios mineralógicos más aparentes, debido a la presencia de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno son: la precipitación de diversos carbonatos, en particular

la calcita y la descomposición de las arcillas, que se traduce en un aumento de las concentraciones de sílice y alúmina («casquetes ácidos», en la zona no saturada). Estos cambios son responsables de los mínimos de radiación (debido a la liberación del potasio) y el incremento de la susceptibilidad magnética/cargabilidad (causadas bien por de la precipitación de magnetita/maghemita o por la coprecipitación de hierro y/o manganeso con calcita en cementos carbonatados sobre las fuentes de metal).

- Para la zona no saturada, con un carácter más fracturado y poroso, un mecanismo de transporte advectivo de gas como el bombeo barométrico, así como el apoyo del ascenso capilar al mover hacia arriba los iones y partículas metálicas sub-micra a la superficie.
- La redistribución de los iones en el ambiente cercano a la superficie por la percolación de las aguas subterráneas (después de la lluvia) así como por los efectos alcistas de la evaporación y el ascenso capilar que explican la acumulación de metales en el suelo en una muy poco profunda (10-30 cm) «zona de acreción metálica».

Como conclusión, se establecen los rasgos generales que caracterizan a los procesos de movilización de metales, transporte vertical a la superficie y la acumulación resultante de estos metales, verticalmente transportados, en el medio superficial sobre cuerpos meníferos enterrados y depósitos de hidrocarburos: la actividad microbiana y las reacciones agua-roca con generación de gas (hidrocarburos, N, CO₂, H₂ y otros) durante la oxidación del objetivo; ascenso de microburbujas (tamaño coloidal) de gas reducidas con iones metálicos reducidos adjuntos, que se traduce en «chimeneas reductoras» que llegan a la superficie; el bombeo barométrico y el ascenso capilar al mover los iones y las partículas sub-micras de metal hacia arriba en la zona no saturada; la redistribución de iones en el entorno cercano a la superficie por la percolación de las aguas subterráneas (después de la lluvia) así como por los efectos alcistas de la evaporación y el ascenso capilar, todos los cuales explican las acumulaciones de metal en el suelo en una muy poco profunda (10-30 cm) «zona de acreción metálica».

IV.6 Referencias Bibliográficas

- Cameron, E. M.; S. M. Hamilton; M. I. Leybourne; G. E. M. Hall; B. McClenaghan.** 2004. Finding deeply-buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4. pp. 7-32.
- Chapelle, F. H.** 1993. *Ground- Water Microbiology and Geochemistry*, 424 pp., John Wiley, New York.

- Coker, W. B.** 2007. Future Research Directions in Exploration Geochemistry: Is There A Future? In «Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration» edited by B. Milkerit. pp. 331-337.
- Donovan, T. J.; M. C. Dalziel.** 1977. Late diagenetic indicators of buried oil and gas: US Geological Survey Open-File Report, 77-817. pp. 44.
- Edwards, K. J.; P. L. Bond; G. K. Druschel; M. M. McGuire; R. J. Hamers; J. F. Banfield.** 2000. Geochemical and Biological Aspects of Sulphide Mineral Dissolution: Lessons from Iron Mountain, California: Chemical Geology, 169. pp. 383-397.
- Fabris, A. J.; J. L. Keeling.** 2006. Exploration through transported cover: summary of approaches and methods. Regolith 2006 - Consolidation and Dispersion of Ideas.
- Fedikow, M. A. F.; R. K. Bezys; M. P. B. Nicolas; P. Prince.** 2009. Preliminary results of soil geochemistry surveys in support of shallow gas exploration, Manitou area, Manitoba (NTS 62G2); in Report of Activities 2009, Manitoba Innovation, Energy and Mines, Manitoba Geological Survey. pp. 193-206.
- Fedikow, M. A. F.; R. K. Bezys; M. B. Nicolas; P. Prince.** 2010. Ligand-Based Partial Extraction of Near-Surface Soil Samples: An Innovative Geochemical Approach to Shallow Gas Exploration, Southwestern Manitoba. GeoCanada 2010 – Working with the Earth.
- Goldberg, I. S.** 1998. Vertical migration of elements from mineral deposits. Journal of Geochemical Exploration 61. pp. 191-202.
- Govett, G. J. S.** 1973. Differential secondary dispersion in transported soils and post-mineralization rocks; an electrochemical interpretation. In: JONES, MJ (Ed.) Geochemical Exploration 1972. Institute of Mining and Metallurgy, London. pp. 81-91.
- Hale, M.** (Ed), 2001. Geochemical Remote Sensing of the Sub-Surface. Google Books.htm
- Hall, G. E. M.; S. M. Hamilton; M. B. McClenaghan; E. M. Cameron.** 2004. Secondary Geochemical Signatures in Glaciated Terrain: SEG 2004, Perth.
- Hamilton, S. M.** 1998. Electrochemical mass-transport in overburden: a new model to account for the formation of selective leach geochemical anomalies in glacial terrain. Journal of Geochemical Exploration 63. pp. 155-172.
- Hamilton, S. M.** 2000. Spontaneous Potentials and Electrochemical Cells: In: Geochemical Remote Sensing of the Sub-surface, Hale. Elsevier, Amsterdam, vol. 7. pp. 421-426.

- Hamilton, S. M.** 2007. A prospector's guide to the use of selective leach and other deep penetrating geochemical techniques in mineral exploration; Ontario Geological Survey, Open File Report 6209, 39p.
- Klusman, R. W.; M. A. Saeed.** 1996. Comparison of light hydrocarbon microseepage mechanisms, in D. Schumacher and MA Abrams, eds., Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66, pp. 157-168.
- Klusman, R. W.** 2009. Transport of ultra-trace reduced gases and particulate, near-surface oxidation, metal deposition and adsorption. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 9. pp. 203-213.
- Lovley, D. R.** 1991. Dissimilatory Fe (III) and Mn (IV) reduction, *Microbiol. Rev.*, 55. pp. 259-287.
- Lovley, D. R.; E. J. P. Phillips; D. J. Lonergan.** 1991. Enzymatic versus non enzymatic mechanisms for Fe (III) reduction in aquatic sediments, *Environ. Ciencias Technol.*, 25. pp. 1062-1067.
- Lovley, D. R; F. H. Chapelle.** 1995. Deep subsurface microbial process. *Reviews of Geophysics*, 33, 3 / August 1995. pp. 365-381.
- Mac Elvain, R.** 1969. Mechanics of gaseous ascension through a sedimentary column, in Heroy, WB, ed., *Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas*: Dallas, Southern Methodist University Press. pp. 15-28.
- Malmqvist, L.; K. Kristiansson.** 1984. Experimental evidence for an ascending microflow of geogas in the ground. *Earth and Planetary Science Letters*, 70. pp. 407-416.
- Mann, A. W.; L. M. Gay; R. D. Birrell; J. G. Webster; K. L. Brown; A. T. Mann; D. B. Humphreys; J. L. Perdrix.** 1995. Mechanism of formation of mobile metal ion anomalies. Report 153. Minerals and Energy Research Institute of Western Australia.
- Mann, A. W.; A. T. Mann; D. B. Humphreys; S. E. Dowling; S. Staltari; L. Myers.** 1997. Soil geochemical anomalies - their dynamic nature and interpretation. Report 184, vol. 1. Minerals and Energy Research Institute of Western Australia.
- Mann, A. W.; R. D. Birrell; M. A. F. Fedikow; H. A. F de Souza.,** 2005. Vertical ionic migration: soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5. pp. 201-210.
- Mobile Metal Ion MMI Technology.** 2004. MMI Manual for Mobile Metal Ion Geochemical Soil Surveys, version 5.04.
- Pardo, M.; O. Rodríguez.** 2009. El Complejo Redox. Consideraciones Metodológicas y Empírico-Teóricas. Tercera Convención Cubana de Cien-

- cias de la Tierra GEOCIENCIAS 2009. Memorias. La Habana: Centro Nacional de Información Geológica. ISBN 978-959-7117-19-3.
- Pardo, M.; R. Stout y M. Mugía.** 2003. El Complejo Redox: Estado del Arte en el 2002. Memorias del V Congreso Cubano de Geología, La Habana.
- Piotrowicz, S. R.; R. A. Duce; J. L. Fasching; C. P. Weise.** 1979. Bursting Bubbles and Their Effect on the Sea-to-Air Transport of Fe, Cu and Zn: Marine Chemistry, 7. pp. 307-324.
- Pirson, S. J.** 1964. Projective well log interpretation, Part 1: World Oil, August. pp. 68-72.
- Price, L. C.** 1985. A critical overview of and proposed working model for hydrocarbon microseepage. US Department of the Interior Geological Survey. Open-File Report 85-271.
- Sato, M.; H. M. Mooney.** 1960. The electrochemical mechanism of sulphide self-potentials. Geophysics, 25. pp 226-249.
- Saunders, D. F.; K. R. Burson; C. K. Thompson.** 1999. Model for Hydrocarbon Microseepage and Related Near-Surface Alterations. AAPG Bulletin, vol. 83, No. 1 (January, 1999). pp. 170-185.
- Schoell, M.** 1983. Genetic characterization of natural gases, AAPG Bull., 67. pp. 2225-2238.
- Smee, B. W.** 1998. A new theory to explain the formation of soil geochemical responses over deeply covered gold mineralization in arid environments. Journal of Geochemical Exploration 61. pp. 149-172.
- Sutherland, D.** 2011. Soil Gas Hydrocarbons: An Organic Geochemistry that Detects Hydrocarbon Signatures in Surficial Samples to Locate and Identify Deeply Buried Targets. Search and Discovery Article #40684.
- Thorstenson, D. C.; D. W. Fisher; M. G. Croft.** 1979. The geochemistry of the Fox Hills-Basal Hell Creek aquifer in southwestern North Dakota and northwestern South Dakota, Water Resour. Res., 15. pp. 1479-1498.

V. Estrategia de aplicación del Complejo Redox.

V.1 Exploración de hidrocarburos

V.1.1 Premisas geólogo-geofísico-geoquímicas

Desde el punto de vista de la Geoquímica Superficial, según Price (1985), Schumacher (1996), Saunders *et. al.* (1999) y Pardo y Rodríguez (2016), las Premisas Geológicas que fundamentan la aplicación de los métodos geofísico-geoquímico-morfométricos no convencionales de exploración son:

A medida que los hidrocarburos ligeros ascienden desde la acumulación, la oxidación bacteriana produce como subproducto ácido carbónico y orgánico, así como sulfuro de hidrógeno. Por su parte, el ácido carbónico reacciona con los minerales arcillosos, destruyéndolos, al tiempo de crear mineralización carbonática secundaria y silicificación. Próximos a la superficie, ambos materiales resultan más densos y resistentes a la erosión, con un efecto en el aumento de la velocidad sísmica sobre la acumulación, así como en la formación de máximos topográficos erosionales. Sobre las acumulaciones de petróleo y gas la descomposición de las arcillas en los suelos producto de la microfiltración de los hidrocarburos ligeros es la responsable de los mínimos de radiación observados: el potasio es lixiviado del sistema hacia los bordes de la proyección vertical de la ocurrencia, donde precipita al resultar en un «halo» de valores altos.

El torio permanece fijo de forma relativa, en su distribución original dentro de los minerales pesados insolubles, de ahí que sean observados mínimos de la relación K/Th rodeados de máximos sobre estos depósitos. De modo mayoritario en la periferia de estas anomalías se observan también, incrementos locales del U(Ra). En ocasiones, la relación mencionada ofrece la oportunidad de eliminar una serie de efectos indeseables sobre las medicio-

nes espectrométricas (influencia de la litología, la humedad, la vegetación y la geometría de medición).

En cuanto al papel del sulfhídrico, su propia presencia condiciona la formación de una columna de ambiente reductor (mínimos del Potencial Redox) sobre la acumulación. Este ambiente reductor favorece, a su vez, la conversión de los minerales de hierro no magnéticos en variedades magnéticas (diagenéticas) más estables como la magnetita, la maghemita, la pirrotina y la griegita, todas responsables del incremento (máximos) de la Susceptibilidad Magnética de rocas y suelos sobre la acumulación, hecho que explica la observada correlación inversa entre ambos atributos (mínimos del Potencial Redox y máximos de la Susceptibilidad Magnética) y justifica la integración de los métodos.

El arribo a la superficie de los iones metálicos contenidos en los hidrocarburos (V, Ni, Fe, Pb y Zn, entre otros) condicionan la presencia de una sutil anomalía de estos elementos en el suelo y de un ligero cambio en la coloración del mismo (oscurecimiento), el cual es reflejado por anomalías de la Reflectancia Espectral, hechos que justifican también, la integración de estas técnicas (Pardo y Rodríguez, 2016).

V.1.2 Cartografía prospectiva integrada. Modelos Generalizados de Respuestas (MGR) y sectores perspectivos

La cartografía prospectiva integrada para hidrocarburos se realiza con el propósito de reducción de áreas, a partir de considerar una serie de criterios de evaluación (Pardo M., Rodríguez O. y Delgado O., 2019):

- Débiles máximos gravimétricos locales, los cuales reflejan estructuras positivas (por el levantamiento de los carbonatos y volcánicos, más densos), dentro de los límites de determinados valores del campo magnético reducido al polo
- Débiles máximos magnéticos residuales, relacionados con la presencia de óxidos y sulfuros de hierro diagenéticos
- Valores mínimos de la relación K/Th, con máximos locales de U(Ra), de forma mayoritaria en su periferia
- Anomalías de teledetección
- Anomalías geomórficas residuales positivas

La interpretación se centra en la cartografía de áreas favorables integradas por agrupaciones de posibles microfiltraciones de hidrocarburos, dentro de un determinado marco geólogo-estructural (cartografiado por gravi-magnetometría), las cuales han de ser reconocidas y evaluadas en tierra, posteriormente, por el Complejo Redox.

El cuadro anómalo total resultante se constata con los Modelos Generalizados de Respuestas (MGR) sobre las acumulaciones conocidas (yacimientos), determinados previamente, a fin de establecer los sectores perspectivas, sobre los cuales se realizará (en caso de no existir) la sísmica 2D definitiva, previo a la toma de decisiones para la perforación exploratoria.

Los MGR más completos disponibles hasta la fecha se presentan en las figuras V.1, V.2, V.3 y V.4.

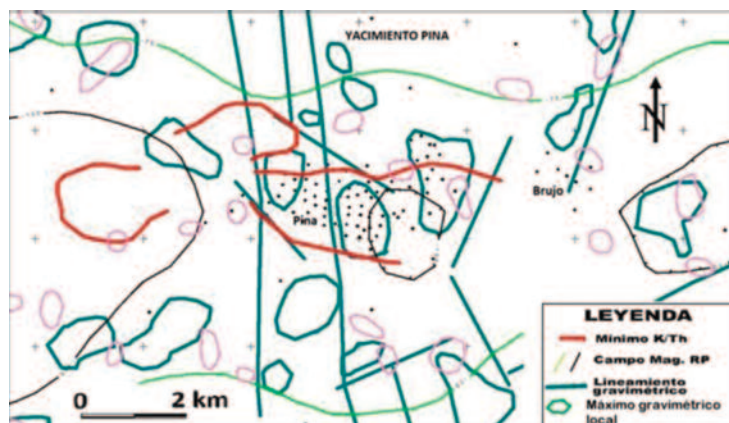


Figura V.1. MGR Patrón del yacimiento Pina, Cuenca Central. En rojo, mínimo de la Relación K/Th ; en rosa, máximos locales de $U(Ra)$; en negro y verde, isolíneas del campo aeromagnético RP; en gris-verde, alineamientos tectónicos (fallas) y máximos locales por gravimetría; los puntos negros corresponden a pozos de petróleo (Pardo M., Rodríguez O. y Delgado O., 2019):

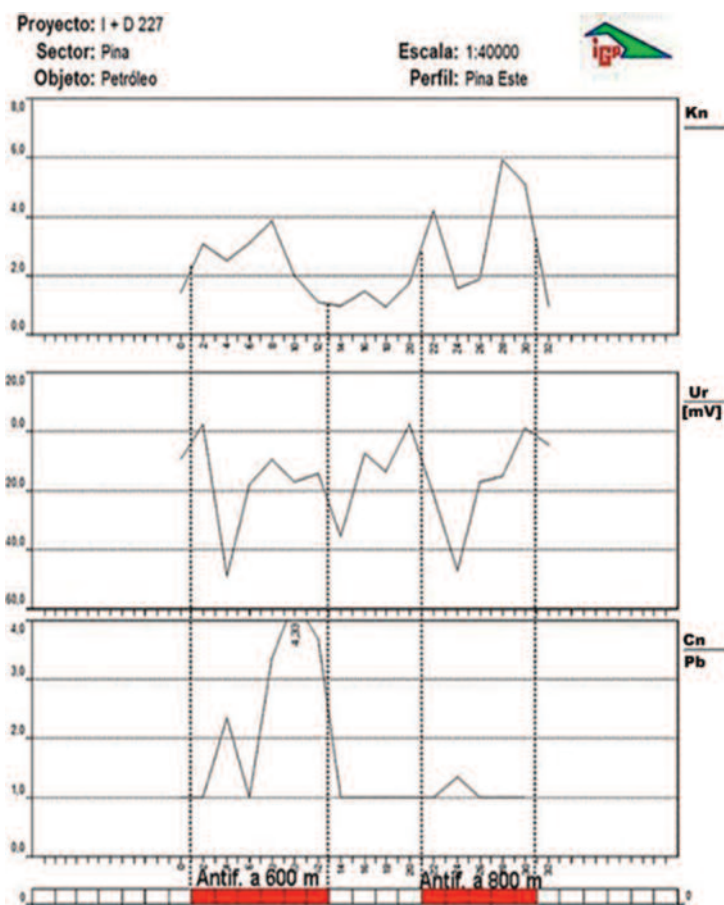


Figura V.2. Resultados del perfil de reconocimiento con el **Complejo Redox** en el yacimiento Pina. Resultados anómalos positivos de la Pedogeoquímica (barra en rojo) sobre el CA al evidenciar las dos estructuras antifórmicas presentes; la distancia entre puntos es indicativa (Pardo-Echarte, Rodríguez-Morán y Delgado-López, 2019).

Figura V.3. MGR Patrón del yacimiento Cristales, Cuenca Central. En rojo (línea gruesa), mínimo de la Relación K/Th; en rosa, máximos locales de U(Ra); en rojo, negro y verde, isolíneas del campo aeromagnético RP (Reducido al Polo); en gris-verdoso, alineamientos tectónicos (fallas) y máximos locales por gravimetría; los puntos negros corresponden a pozos de petróleo (Morales-González, Rodríguez-Morán y Pardo-Echar- te, 2020).

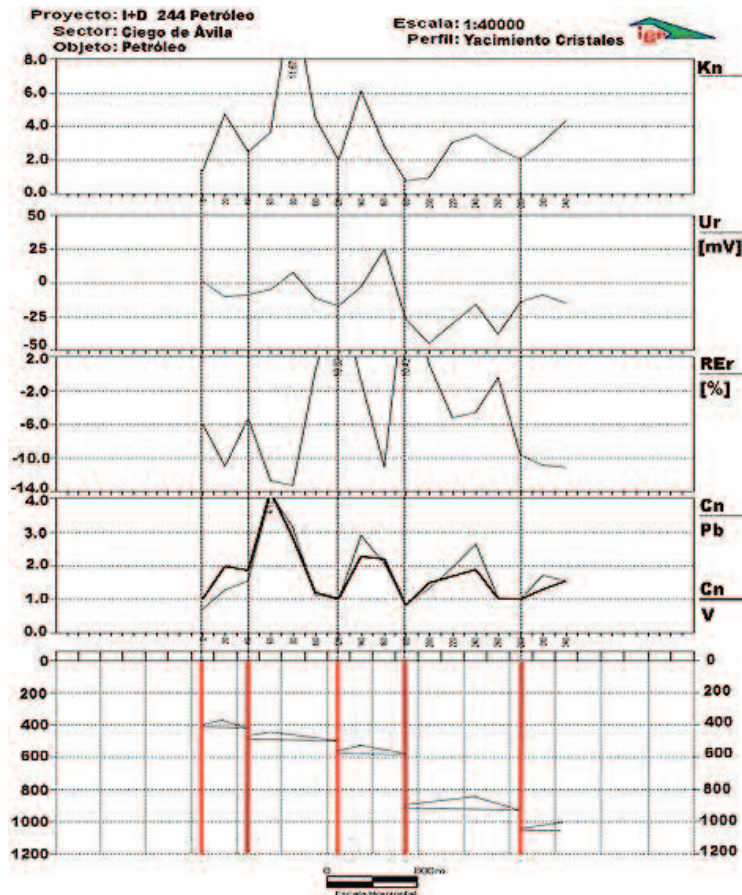
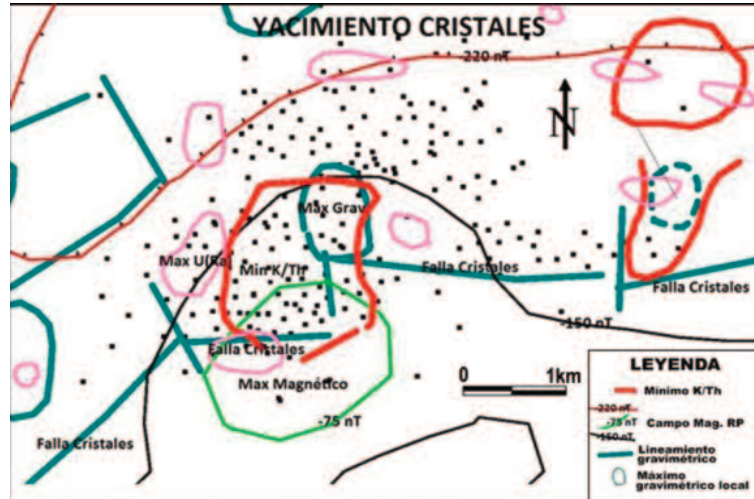


Figura V.4. Resultados del perfil de reconocimiento con el **Complejo Redox** en el yacimiento Cristales (interpretación cuantitativa). La distancia entre puntos es indicativa (Pardo-Echarte y Rodríguez-Morán, 2016).

V.2 Exploración de minerales

V.2.1 Premisas geólogo-geoquímico-geofísicas

Es reconocido (Birell, 1996; Mann, 1997) el proceso de Migración Vertical de Iones Metálicos, desde una ocurrencia (cuerpo menífero) en la profundidad

hasta la superficie, al condicionar la formación de una columna de ambiente reductor sobre ésta. El transporte metálico se supone vinculado a diferentes mecanismos de transporte, proceso que afecta también a coberturas recién transportadas (exóticas). Como en el caso de la exploración de hidrocarburos, el ambiente reductor favorece la conversión de los minerales de hierro no magnéticos en variedades magnéticas diagenéticas más estables.

V.2.2 Cartografía prospectiva integrada. Modelos Generalizados de Respuestas (MGR) y sectores perspectivas

La cartografía prospectiva integrada para minerales se realiza con el propósito de reducción de áreas, a partir de considerar una serie de criterios de evaluación los cuales varían en función de los tipos genéticos de depósitos buscados.

La interpretación se centra en la cartografía de áreas favorables integradas por agrupaciones de posibles objetivos, dentro de un determinado marco geólogo-estructural (cartografiado por gravi-magnetometría y/o métodos eléctricos), las cuales, al final, han de ser reconocidas y evaluadas en tierra por el Complejo Redox.

El cuadro anómalo total resultante se constata con los Modelos Generalizados de Respuestas (MGR) sobre los depósitos conocidos (yacimientos), determinados previamente, a fin de establecer los sectores perspectivas, sobre los cuales se realizarán (en caso de no existir) métodos eléctricos (o electromagnéticos) de detalle, definitorios, previo a la toma de decisiones para la perforación exploratoria.

V.3 Referencias Bibliográficas

- Birell, R.** 1996: MMI geochemistry: mapping the depths. *Mining Magazine* 174 (5). pp. 306-307.
- Mann, A. W.; R. D. Birrell; M. H. F. Fedikov; H. A. F. de Souza.** 2005. Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies and sampling depth for Mineral Exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment Analysis*, vol. 5, 3. pp. 201-210. Geological Society Publishing House.
- Morales, J.; O. Rodríguez; M. E. Pardo.** 2020. Possible gaso-petroleum occurrence from non-seismic and non-conventional exploration methods in the Central Basin, Cuba. *Boletín Ciencias de la Tierra*. No.47. pp. 15-20.
- Pardo, M.; O. Rodríguez.** 2016. *Unconventional Methods for Oil & Gas Exploration in Cuba*. Springer Briefs in Earth System Sciences, DOI 10.1007/978-3-319-28017-2.
- Pardo, M.; O. Rodríguez; O. Delgado.** 2019. Non-seismic and Non-Conven-

tional Exploration Methods for Oil and Gas in Cuba. Springer Briefs in Earth System Sciences, DOI 10.1007/978-3-030-15824-8.

Price, L. C. 1985. A critical overview of and proposed working model for hydrocarbon microseepage. US Department of the Interior Geological Survey. Open-File Report 85-271.

Saunders, D. F.; K. R. Burson; C. K. Thompson. 1999, Model for Hydrocarbon Microseepage and Related Near-Surface Alterations. AAPG Bulletin, vol. 83 (1999), No. 1 (January 1999). pp. 170-185.

Schumacher, D. 1996, Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments; in D. Schumacher and M. A. Abrams, eds., Hydrocarbon migration and its near-surface expression: AAPG Memoir 66. pp. 71-89.

VI. Casos de estudio del Complejo Redox.

VI.1 Exploración petrolera

La historia del desarrollo gasopetrolífero de la Cuenca Central de Cuba, en una época (1950-1970), la principal región productora de petróleo del país, es la historia del empleo de diferentes criterios geológicos de exploración (directos, tectono-estructurales y estratigráficos), complementados por un complejo convencional de geofísica de prospección (gravimetría, magnetometría y sísmica) han tenido éxitos parciales. Aún no se cuenta con un conjunto de criterios efectivos (geólogo-geofísico-geoquímicos) que expliquen, de manera integral, los mecanismos que determinaron la (dis)migración, desde las rocas madre del Margen Continental Norteamericano, con el posterior entrapamiento de los hidrocarburos en niveles superiores para diferentes áreas de la Cuenca Central. Para ejemplificar esto, baste señalar que en los últimos 55 años solo se han revelado como yacimientos, las áreas de Jatibonico, Catalina, Cristales y Pina-Brujo (**Figura VI.1**).

Esto hace que se mantengan y complejicen las investigaciones en esta región, con la aplicación de los métodos no convencionales de exploración como el Complejo Redox, pues, en buena lógica, no es comprensible que en un área tan extensa y con un alto potencial solo se localicen cuatro yacimientos.

VI.1.1 Yacimiento Pina

El yacimiento Pina de petróleo ligero, se separa por sus elementos, en varios pisos tectónicos (Linares et al., 2011):

- Cubierta, Piso postorogénico: que incluye las formaciones Tamarindo, Güines, Arroyo Blanco y Marroquí, con una edad desde el Eoceno Medio hasta el Neógeno.

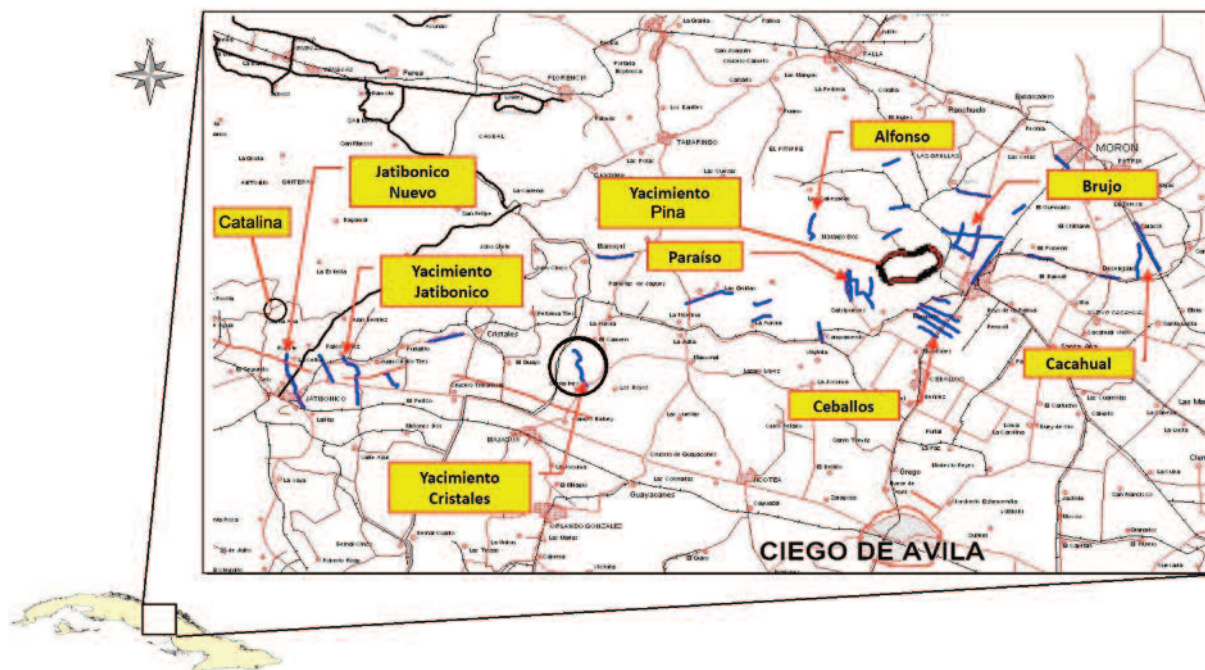


Figura VI.1. Ubicación de los perfiles del Complejo Redox, realizados en Cuenca Central.

- Sello, Piso orogénico: formaciones Zaza y Loma Iguará, con edad Eoceno Inferior hasta el Eoceno Medio (parte inferior).
- Reservorio principal, Piso preorogénico: formaciones Eloísa, Dagmal, Bruja y Caliza Provincial. Complejo vulcano clástico de granulometría variable, con abundante fracturación y que contacta discordantemente con el Maastrichtiano.
- Reservorio subordinado, Piso preorogénico: Formación Mataguá donde se describen lentes de calizas tobáceas que tipifican el final del ciclo volcánico y ocurren lavas mezcladas con rocas vulcano clásicas de una edad Cretácico inferior Albiano hasta Cretácico Superior Coniaciano.

El yacimiento Pina se caracteriza por un conjunto de anomalías indicadoras que consideran los siguientes atributos no sísmicos (**Figura VI.1**) (Pardo M., Rodríguez O. y Delgado O., 2019):

- Máximos gravimétricos locales (a partir de la residual a 500 m y la primera derivada vertical) reflejan estructuras positivas debidas al levantamiento de los volcánicos, más densos.
- El yacimiento se encuentra dentro de los límites de las isolíneas del campo magnético reducido al polo, en el intervalo entre -150nT y -115nT, en una anomalía tipo «silla de montar», define una zona con características geólogo-estructurales similares desde el punto de vista local (levantamiento de las rocas volcánicas).

- Mínimo de la relación K/Th, con máximos locales de U(Ra) en su interior y periferia
- Ausencia de anomalías geomórficas
- Indicaciones anómalas por el Complejo Redox

Resultados del Complejo Redox

En el yacimiento Pina (Perfil Oeste) se observa la correspondencia espacial de un mínimo de la relación K/eTh, con un máximo de la Susceptibilidad Magnética y un campo desarticulado de valores disminuidos en el Potencial Redox Reducido, vinculados a la parte apical de la estructura productora. No se determinó la Reflectancia Espectral (Figura VI.2a).

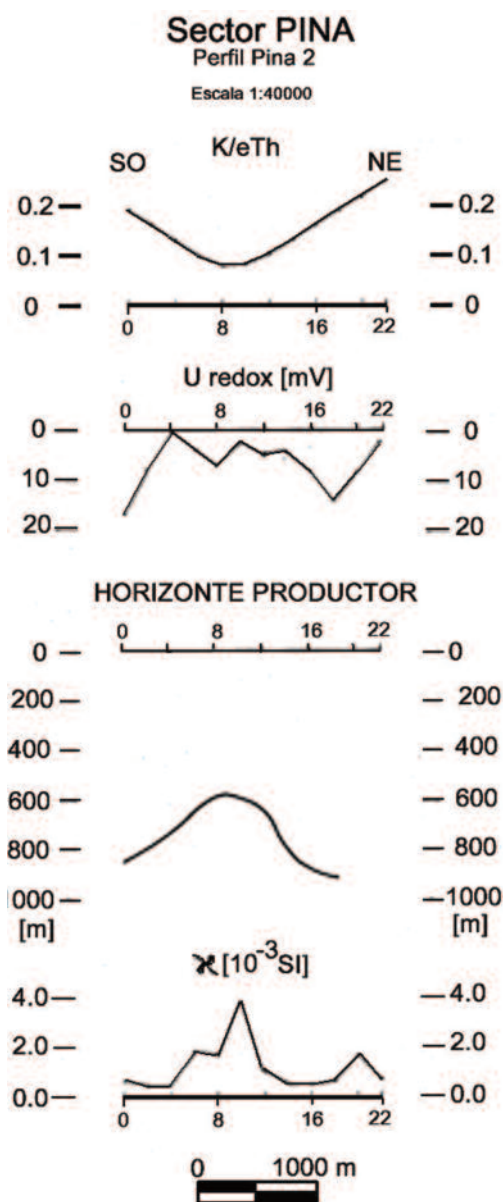


Figura VI.2a. Resultados del Complejo Redox en el yacimiento Pina (Perfil Oeste).

En el yacimiento Pina (Perfil Este) se observa la correspondencia espacial de máximos de la Susceptibilidad Magnética con mínimos (20-40 mV) del Potencial Redox Reducido y máximos del contenido de Pb, vinculados a la parte apical de las estructuras productoras (dos antiformas). No se determinó la Reflectancia Espectral (**Figura VI.2b**, correspondiente a la **Figura V.2**).

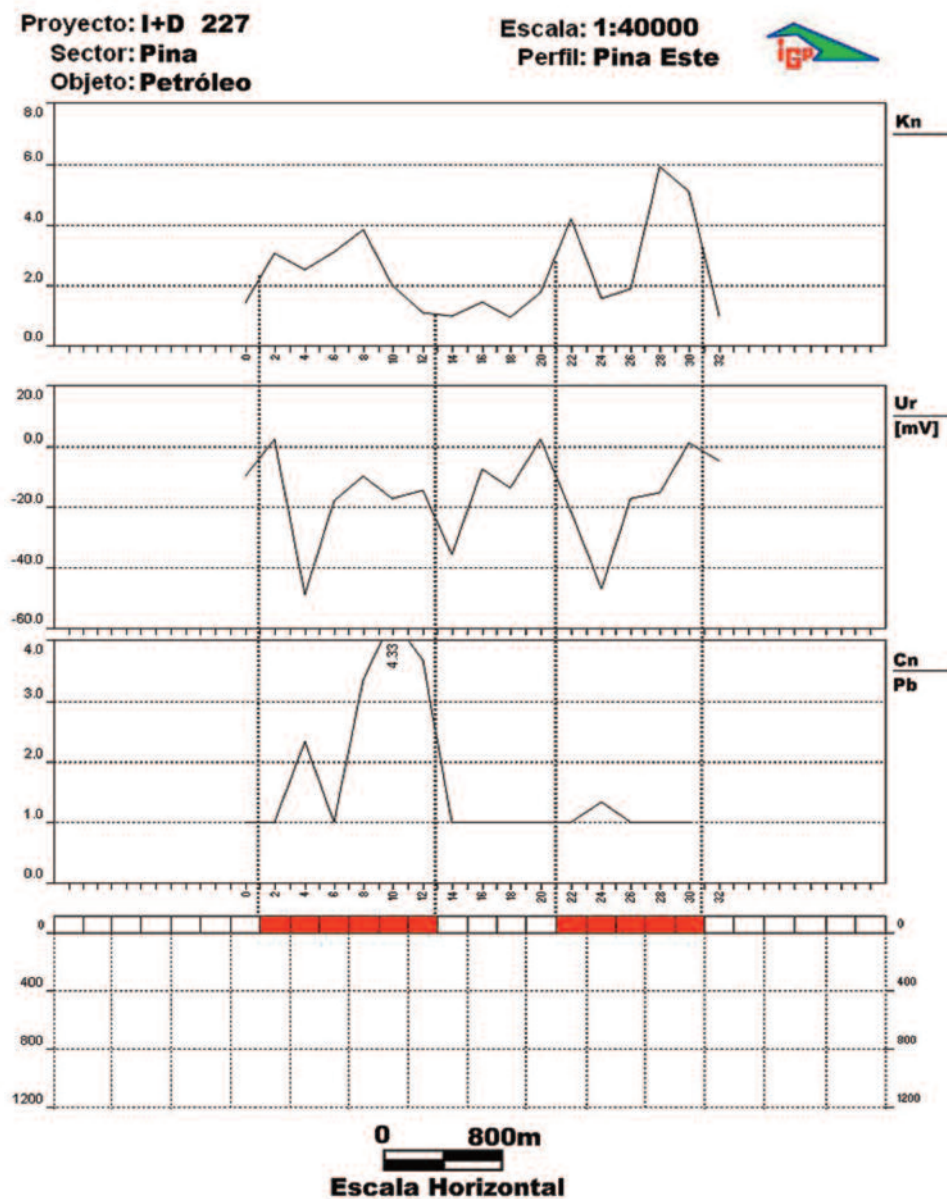


Figura VI.2b Resultados del Complejo Redox en el yacimiento Pina (Perfil Este).

VI.1.2 Área de Ceballos

El centro del sector Ceballos (**Figura VI.1**) se encuentra ubicado a 3.5 km al SO del poblado Ciro Redondo, provincia de Ciego de Ávila. Desde el punto de vista geomorfológico, el área de Ceballos se identifica por una morfoestructura positiva de dirección sublatitudinal ($Az=80^\circ$) y dimensiones 3.6×1.65

km, cuyos límites Sur y Norte coinciden con cañadas, que parecen ser el reflejo de fallas regionales.

En este sector se parte de un escenario estructural de la Sísmica de Reflexión 2D, con información limitada. Este fue el elemento que guio, junto con la geomorfología, la ubicación de los perfiles del Complejo Redox dentro del sector (Figura VI.3).

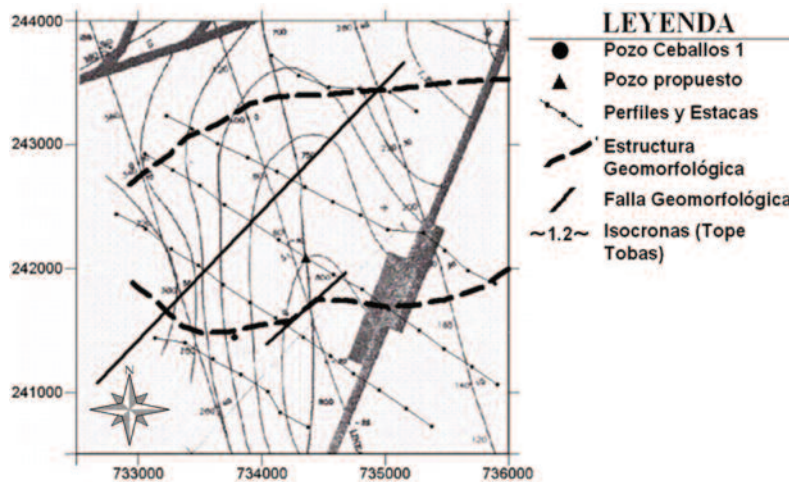


Figura VI.3. Escenario estructural de la Sísmica de Reflexión 2D del sector de los trabajos

Interpretación geomorfológica del sector de los trabajos

Desde el punto de vista geomorfológico, el área se identifica por una morfoestructura positiva de dirección sublatitudinal ($Az=80^\circ$) y dimensiones 3.6 x 1.65 km, cuyos límites sur y norte coinciden con cañadas, las cuales parecen ser el reflejo de fallas regionales. La geomorfología fue el sustento del diseño del sistema de perfiles del Complejo Redox que se muestran con las líneas quebradas (Figura VI.4).

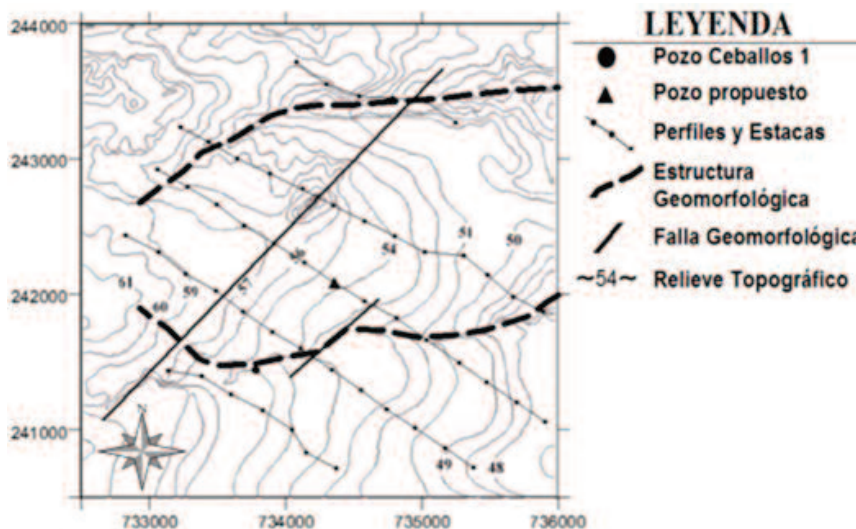


Figura VI.4. Interpretación geomorfológica del sector de los trabajos y el sistema de perfiles del Complejo Redox.

El Escenario Satelital Redox (Imagen Landsat TM) arroja una anomalía tonal residual negativa (propia de hidrocarburos con naturaleza pesada) con dimensiones aproximada 0.95 x 1.1 km. En su centro exhibe una anomalía positiva atribuible a un escape gaseoso (**Figura VI.5**).

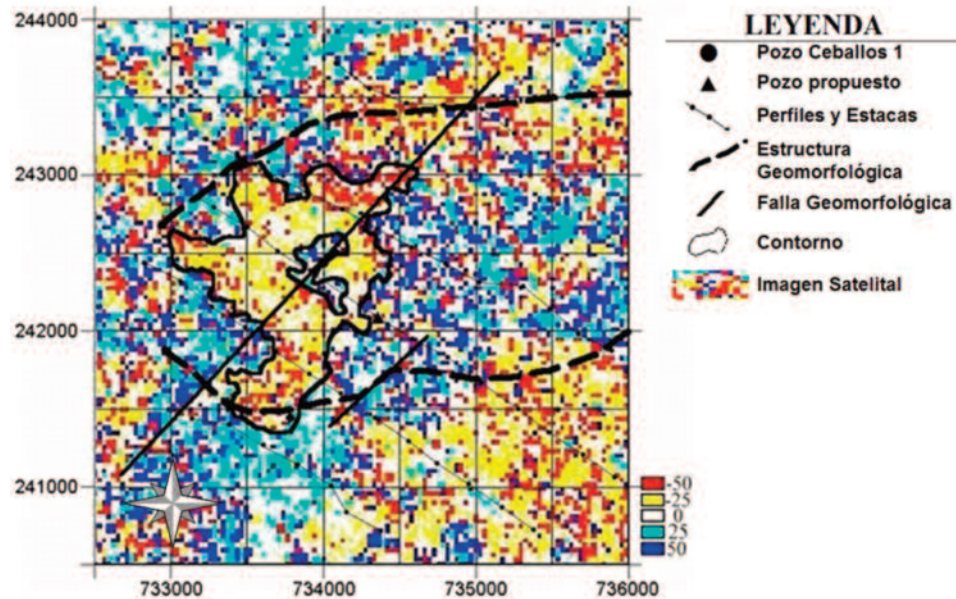


Figura VI.5. Escenario Satelital Redox (Imagen Landsat TM) arroja una anomalía tonal residual negativa, propia de hidrocarburos.

El escenario de espectrometría gamma muestra un cuadro anómalo en el que se destaca, en el límite norte del sector, un amplio mínimo de la relación K/eTh de dirección latitudinal y dimensiones 4.8x1.2 km, cuya naturaleza, a juzgar por sus características espaciales y de contorno, parece ser litológica (probablemente, suelos ferruginosos) (**Figura VI.6**).

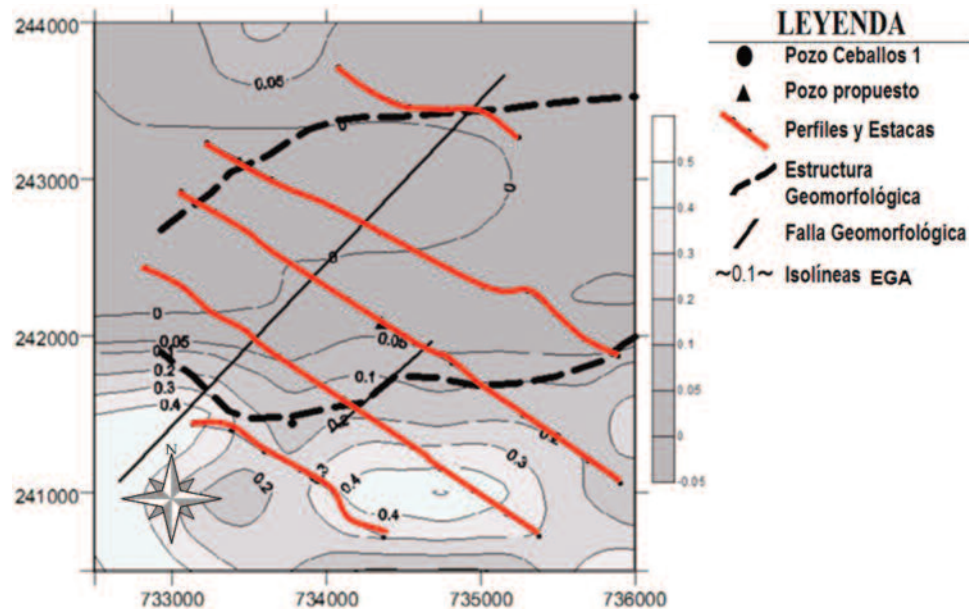


Figura VI.6. Escenario de espectrometría gamma del sector de los trabajos.

Resultados del Complejo Redox

La Susceptibilidad Magnética Normalizada, exhibe un campo anómalo complicado, caracterizado por incrementos del orden de 2.0-2.5, típicos, según la experiencia, de hidrocarburos con naturaleza entre pesada y pesada/ligera. La anomalía areal de Susceptibilidad Magnética Normalizada, ubicada dentro de la porción centro-occidental de la morfoestructura, con igual rumbo y dimensiones de 1.9x1.2 km, define, con buena aproximación, la cartografía de la posible acumulación (**Figura VI.7**).

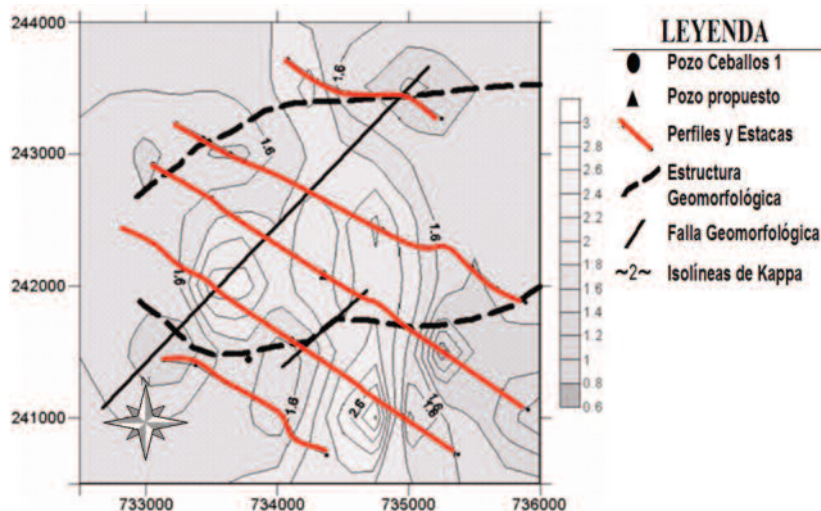


Figura VI.7. Susceptibilidad Magnética Normalizada (exhibe un campo anómalo complicado).

El Potencial Redox Reducido (Ur) presenta un campo en extremo complicado, caracterizado por su desarticulación (carácter de serrucho) y existencia de valores máximos locales, como los que identifican la parte central más elevada de la presunta acumulación, indicativo de la presencia de un hidrocarburo de naturaleza ligera o probablemente, de un posible casquete de gas (**Figura VI.8**).

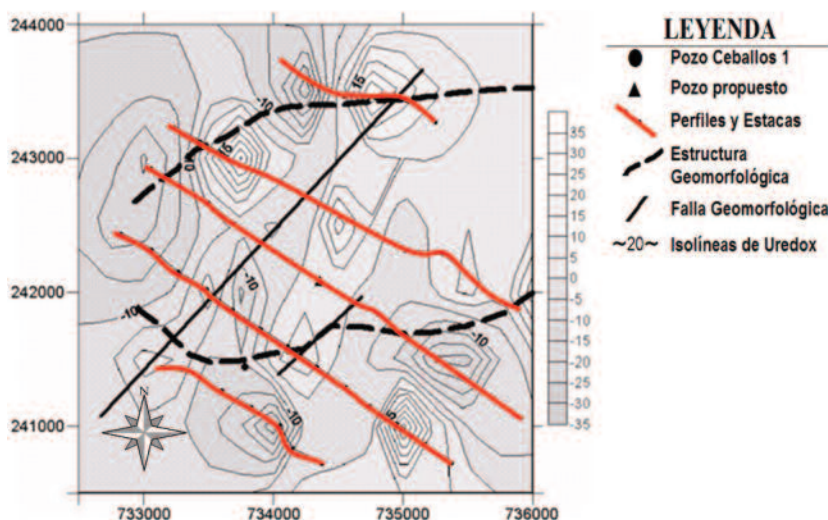


Figura VI.8. Potencial Redox Reducido (Ur) (Presenta un campo en extremo complicado, caracterizado por su desarticulación).

Según la interpretación cuantitativa del Complejo Redox del perfil central 2T, hay un intervalo simultáneo donde coinciden valores altos de Susceptibilidad Magnética normalizada, valores altos de Potencial Redox y valores altos, además, del contenido de los elementos químicos de plomo y vanadio. La estimación de la profundidad de la ocurrencia fue de 950 m (**Figura VI.9**).

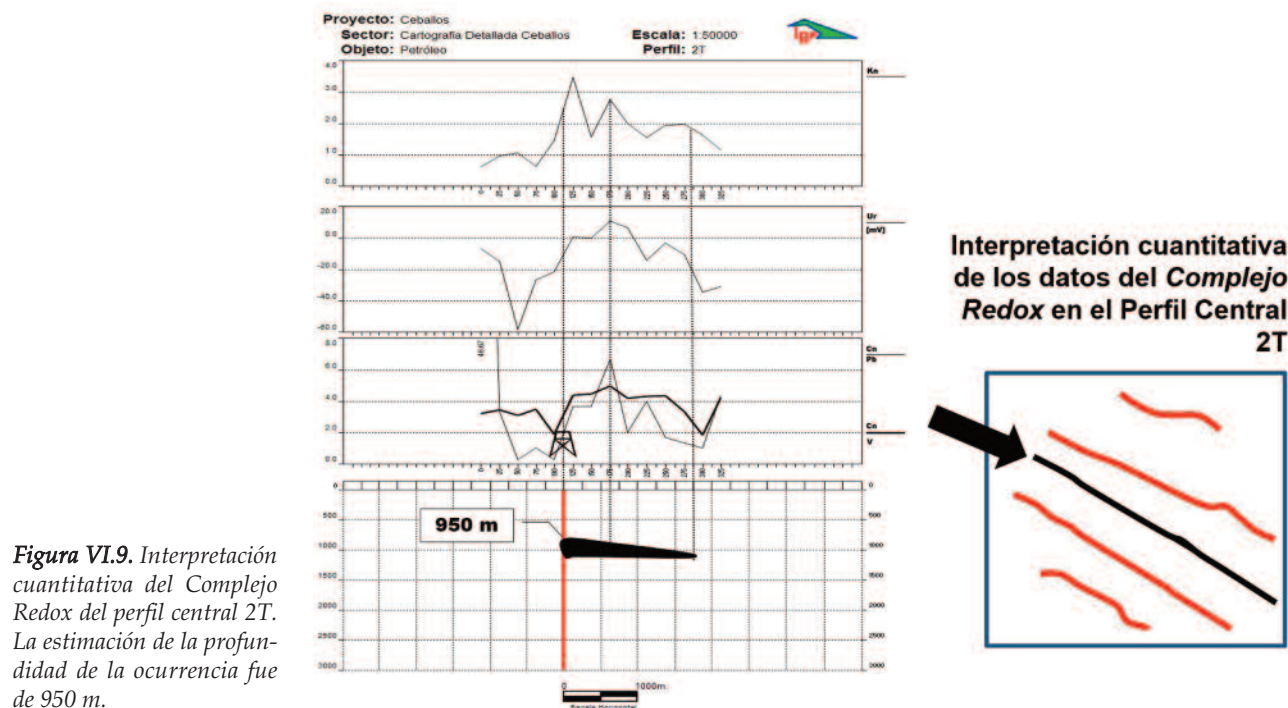


Figura VI.9. Interpretación cuantitativa del Complejo Redox del perfil central 2T. La estimación de la profundidad de la ocurrencia fue de 950 m.

Con posterioridad a estas investigaciones se realizó una campaña sísmica, que corroboró los resultados de los métodos no-convencionales anteriores y mostró una estructura exacta donde fue propuesta por el método del Complejo Redox, incluso, la parte superior de la estructura se encuentra a 1000 m, a solo 50 metros de la propuesta por los métodos no convencionales (**Figura VI.10**).

VI.2 Exploración de minerales

VI.2.1 Little Golden Hill

En el depósito aurífero epitermal de alta sulfidación Little Golden Hill, provincia de Ciego de Ávila, por los resultados del Complejo Redox, se observa la correspondencia espacial de un máximo de la Susceptibilidad Magnética y un mínimo de la Reflectancia Espectral Reducida (oscurecimiento del suelo) con la zona de oxidación del depósito. El mínimo de Potencial Redox Reducido se corresponde con la zona de sulfuros masivos en la profundidad (por debajo del gossan) (**Figura VI.11**).

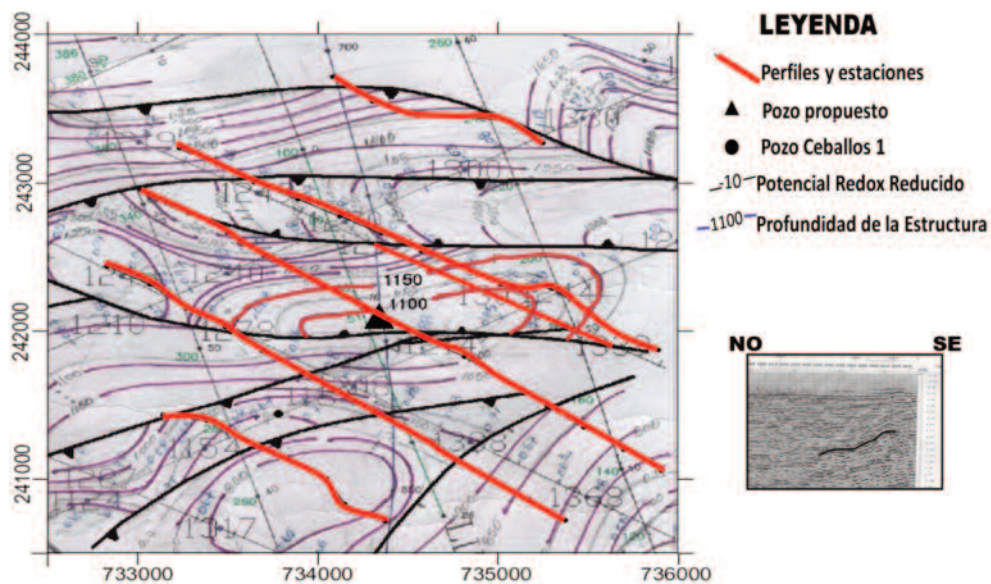


Figura VI.10. Coincidencia de los resultados del Complejo Redox con los resultados de un levantamiento sísmico ulterior (Tomado del Informe de Digicupet, 2006).

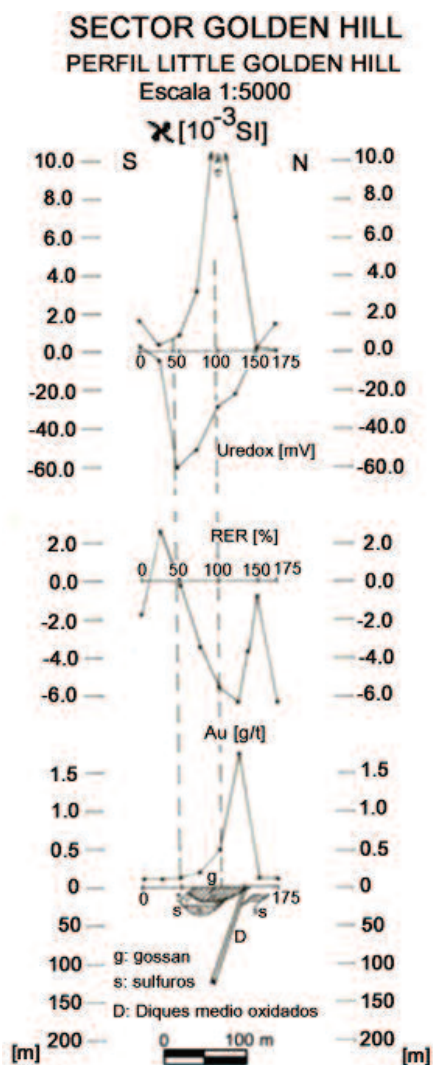


Figura VI.11. Resultados del Complejo Redox en el depósito aurífero epitermal de alta sulfidación Little Golden Hill.

VI.2.2 Yacimiento Antonio

En el depósito polimetálico de sulfuros masivos vulcanogénico tipo Kuroko Antonio, provincia de Villa Clara, por los resultados del Complejo Redox, se observa la correspondencia espacial de máximos de la Susceptibilidad Magnética con mínimos del Potencial Redox Reducido y mínimos de la Reflectancia Espectral Reducida vinculados con los incrementos del Pb en el suelo (proveniente de la profundidad) (Figura VI.12).

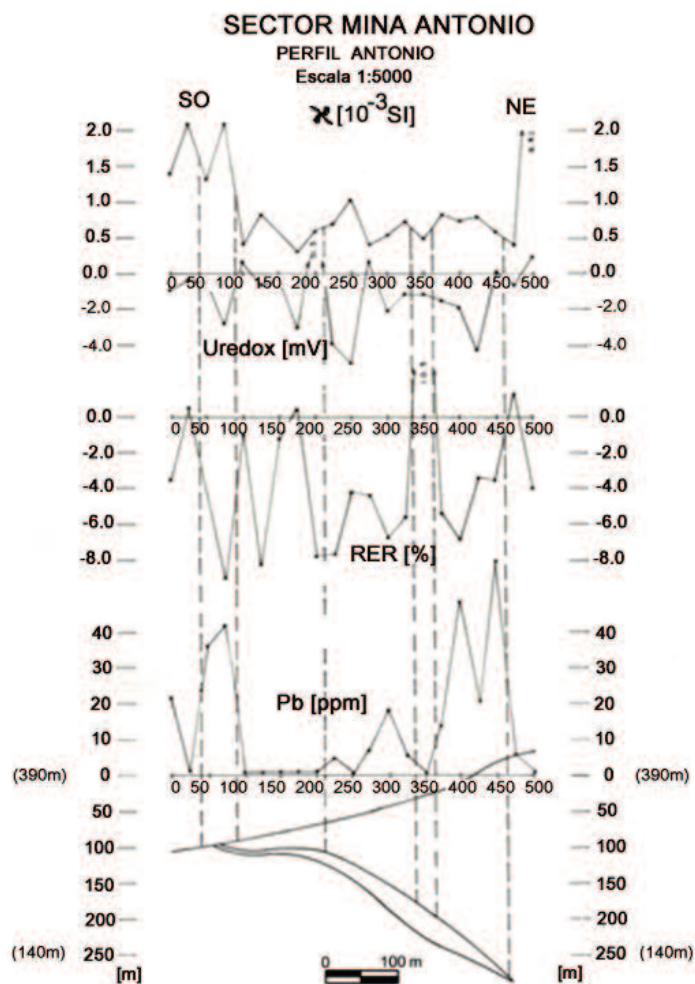


Figura VI.12. Resultados del Complejo Redox en el depósito polimetálico de sulfuros masivos vulcanogénico tipo Kuroko Antonio.

VI.3 Investigaciones medioambientales

VI.3.1 Distribuidora de hidrocarburos Güines

En la Distribuidora de Hidrocarburos Güines, provincia de Mayabeque, la contaminación superficial no es observable y presumiblemente, tiene lugar a nivel del manto freático (a partir de los 100 m en el perfil), expresada según los resultados del Complejo Redox, por la correspondencia espacial de máximos de la Susceptibilidad Magnética Normalizada, mínimos del Potencial Redox Reducido, máximos y mínimos de la Reflectancia Espectral Reducida

y los correspondientes incrementos (normalizados) de los elementos metálicos indicadores de hidrocarburos ligeros (Pb) y pesados (V) (Figura VI.13).

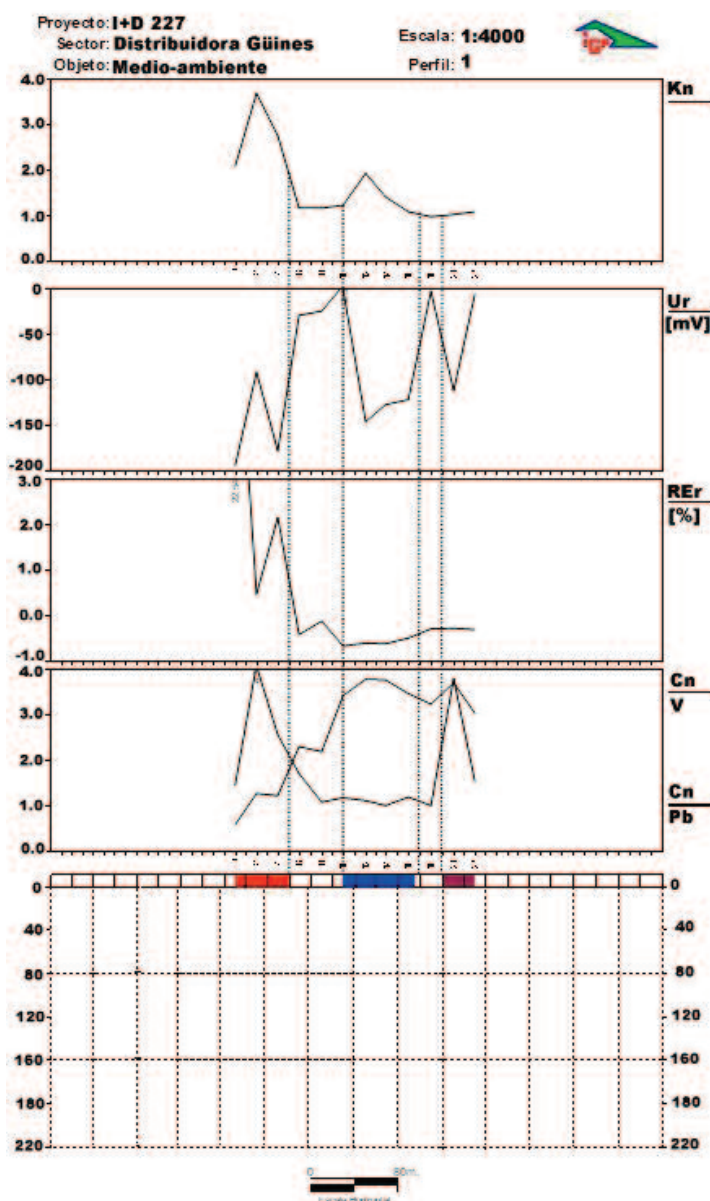


Figura VI.13. Resultados del Complejo Redox en la Distribuidora de Hidrocarburos Güines

VI.3.2 Fábrica de Baterías Secas «Yara»

La Fábrica de Baterías Secas «Yara», en la provincia La Habana, involucró en una etapa de su producción a un grupo de metales pesados -dañinos a la salud en general- como el manganeso, plomo, zinc, mercurio y cadmio. Se conocía, por datos experimentales, que el nivel de contaminación de manganeso en los suelos de la periferia de la fábrica, era superior a los 6000 gramos por tonelada y que la extensión de la zona contaminada podía extenderse más allá de los 200 metros.

Esta industria (**Figura VI.14**), que está enclavada en la Cuenca del Río Almendares, constituyó un foco de contaminación del suelo y las aguas, tal y como lo ponen de manifiesto los resultados de las investigaciones geoquímico-geofísicas desarrolladas por el Instituto de Geología y Paleontología (IGP) durante el Estudio Geólogo Ambiental Integral del Municipio Arroyo Naranjo (Correa *et al.*, 1998).

A partir de esta problemática se propuso como objetivo, determinar la afectación de la contaminación metálica en los suelos del entorno de la fábrica. Se aplicó el Complejo Redox de forma experimental para la solución del problema y la aplicación de algunas herramientas estadísticas para correlacionar los atributos. Se determinó la intensidad y extensión superficial de la contaminación en los alrededores de la fábrica. La correlación entre los atributos medidos indicó que los más importantes son: el manganeso, el cadmio, la Susceptibilidad Magnética Normalizada y el Potencial Redox Reducido. Se propuso un plan para remediar este impacto ambiental y se propusieron dos variantes para la mitigación de estas afectaciones (Rodríguez y Pardo, 2017).

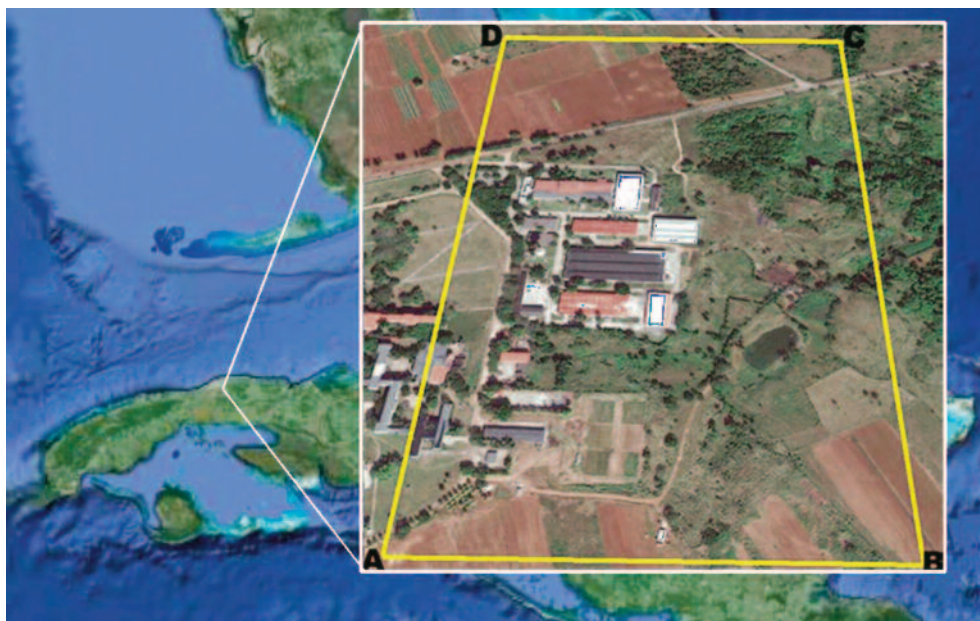


Figura VI.14. Imagen satelital del enclave de fábrica de Baterías Secas «Yara».

En la Fábrica de Baterías Secas «Yara» la contaminación superficial no observable de manganeso y otros metales, se expresa, según los resultados del Complejo Redox, por la correspondencia espacial de máximos de la Susceptibilidad Magnética Normalizada, máximo del Potencial Redox Reducido (zonas de oxidación), un carácter indiferenciable de la Reflectancia Espectral Reducida y el correspondiente incremento (normalizado) del contaminante principal (Mn) (**Figura VI.15**).

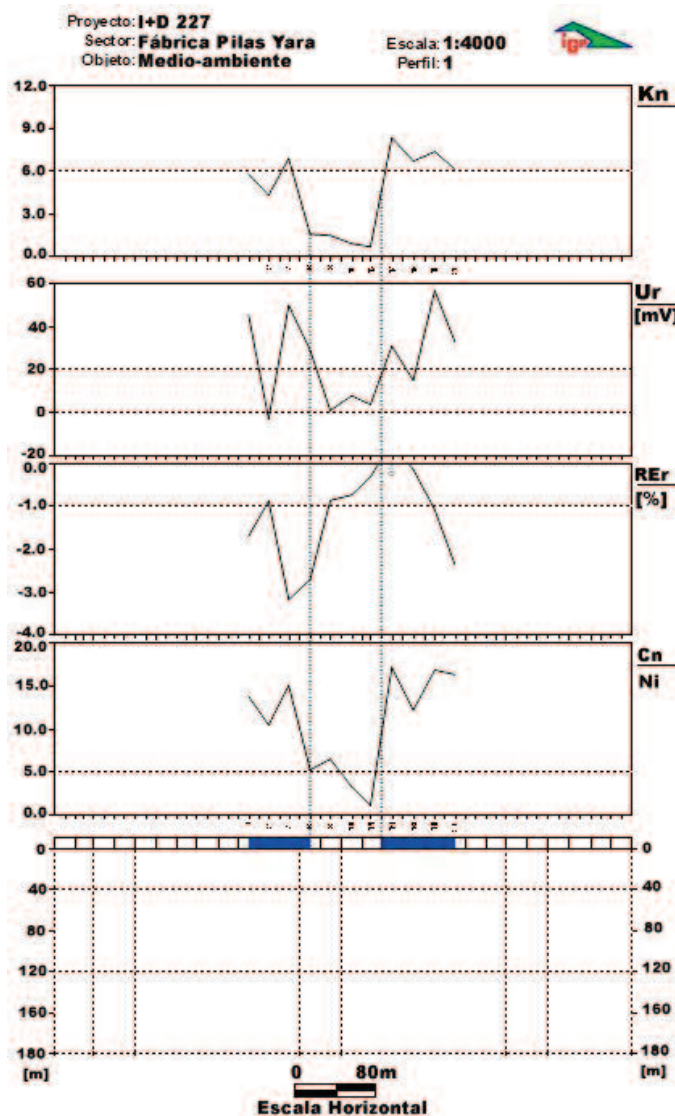


Figura VI.15. Resultados del Complejo Redox en un perfil transversal a la pared exterior de la Fábrica de Baterías Secas «Yara» (Rodríguez y Pardo, 2017).

VI.4 Investigaciones arqueológicas

VI.4.1 Valle de los Ingenios, Guáimaro

El Valle de los Ingenios, nombrado oficialmente como «Valle de San Luis» se localiza en Trinidad (**Figura VI.16**), al centro sur de la isla de Cuba, se extiende por 250 kilómetros cuadrados en la provincia de Sancti Spíritus. El área de producción del Ingenio Guáimaro (Valle de los Ingenios, Trinidad, Cuba) se encuentra enterrada, desde hace más de 50 años, bajo una capa de escombros de espesor variable, entre 0.5 y 1 m, que impide identificar las antiguas estructuras fabriles: trenes de pailas de hierro donde se hervía el guaparo (Trenes Jamaquinos) (**Figuras VI.16 y VI.17**) que son el objeto de descubrimiento y restauración.

Figura VI.16. Ciudad de Trinidad y esquema del objetivo de localización.

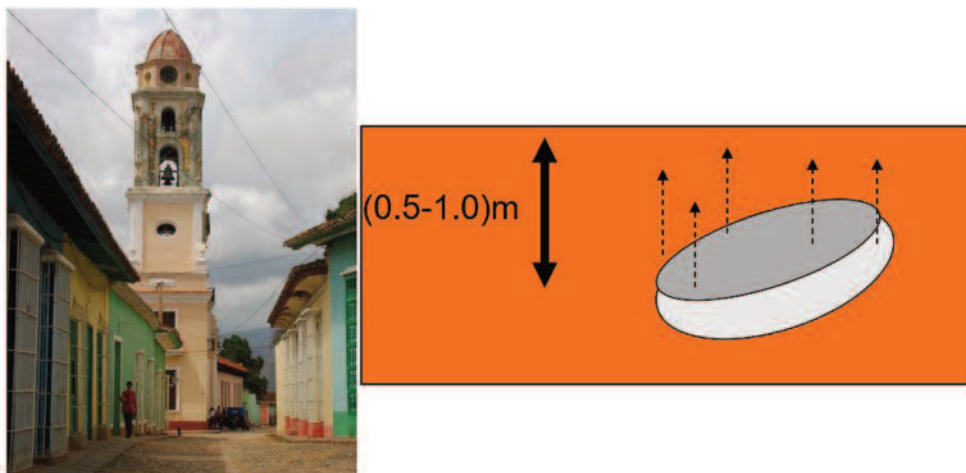


Figura VI.17. Museo del Azúcar. Uno de los sitios más visitados del Valle de los Ingenios. Representa la exploración de un sitio arqueológico con enterramientos de naturaleza metálica (Foto tomada de: <https://www.inspirock.com/cuba/trinidad/ruinas-de-ingenio-san-isidro-de-los-des-tiladeros-a2451779075>).



Resultados del Complejo Redox

El comportamiento de los diferentes atributos medidos revela una única anomalía en el intervalo $[-1, 1]$ (2 m de ancho) parece identificar una estructura fabril:

- La Susceptibilidad Magnética Normalizada exhibe un débil incremento (1.5 veces el Nivel de Fondo local)
- El Potencial Redox Reducido es del orden de 35–60 mV

Los resultados evidencian un claro ambiente de oxidación, típico de contaminaciones metálicas en condiciones superficiales. Se observa, también la correspondencia de:

- Un mínimo de la Reflectancia Espectral Reducida del orden de -2 %, debido al sutil oscurecimiento del material superficial
- Un débil incremento del Contenido Normalizado de hierro (1.2-1.5 veces el Nivel de Fondo local), proveniente de la estructura fabril enterrada, responsable del comportamiento anómalo de todos los atributos medidos (Figura VI.18)

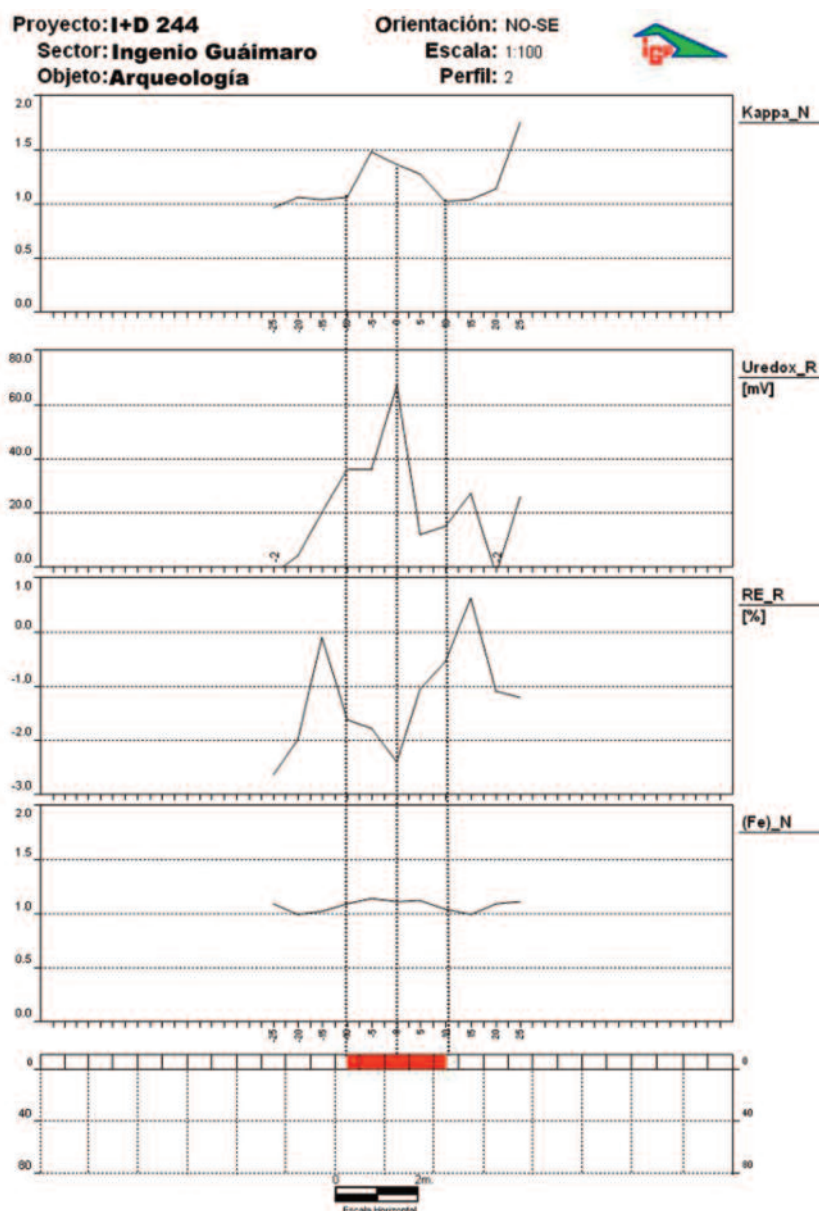


Figura VI.18. Resultados del Complejo Redox sobre una supuesta estructura fabril enterrada.

VI.5 Referencias Bibliográficas

Correa, G. J., L. Comesañas. 1998. Estudio Geológico Ambiental Integral del Municipio Arroyo Naranjo. Informe Administrativo (Inédito). Instituto de Paleología y Paleontología (IGP).

- Linares, E.; D. García-Delgado; O. Delgado-López; J. G. López-Rivera; V. Strazhevich.** 2011. Yacimientos y manifestaciones de hidrocarburos de la República de Cuba. Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, 480 p.
- Rodríguez, O.; Pardo, M.** 2017. Aplicación del Complejo Redox en el monitoreo de la contaminación de suelos con metales pesados: revista Geociencias UO, año 1, v. 1, núm. 1, octubre 2017-marzo 2018, pp. 5-15.

Consideraciones finales

En la exploración geológica, se establecen los rasgos generales que caracterizan a los procesos de movilización de metales, transporte vertical a la superficie y la acumulación resultante de estos metales, verticalmente transportados, en el medio superficial sobre cuerpos meníferos enterrados y depósitos de hidrocarburos: la actividad microbiana y las reacciones agua-roca con generación de gas (hidrocarburos, N, CO₂, H₂ y otros) durante la oxidación del objetivo; ascenso de microburbujas (tamaño coloidal) de gas reducidas con iones metálicos reducidos adjuntos, que se traduce en «chimeneas reductoras» que llegan a la superficie; el bombeo barométrico y el ascenso capilar al mover los iones y las partículas sub-micras de metal hacia arriba en la zona no saturada; la redistribución de iones en el entorno cercano a la superficie por la percolación de las aguas subterráneas (después de la lluvia) así como por los efectos alcistas de la evaporación y el ascenso capilar. Todos explican las acumulaciones de metal en el suelo en una muy poco profunda (10-30 cm) «zona de acreción metálica».

El Complejo Redox (Potencial Redox, Susceptibilidad Magnética, Reflectancia Espectral y Geoquímica de Suelos/lixiviación total) es un complejo de técnicas de exploración no convencionales utilizado con carácter complementario dentro del complejo convencional de exploración para la detección directa o indirecta y evaluación de los diversos objetivos de naturaleza metálica. Se basa en el Principio Geoquímico de la Migración Vertical de Iones Metálicos Móviles (iones liberados de objetivos metálicos en profundidad), al ofrecer información sobre las modificaciones del terreno que tienen lugar en su parte más alta (10-30 cm del perfil del suelo) sobre el objetivo. Este complejo ha sido aplicado con éxito, en diferentes ámbitos: la exploración de hi-

drocarburos y minerales metálicos, los estudios de contaminación metálica y de hidrocarburos en suelos y subsuelo y la búsqueda de enterramientos arqueológicos metálicos. El Complejo Redox mejora la probabilidad de éxito en la exploración, pues cada método detecta un aspecto físico o químico diferentes resultado de un único proceso microbiano/geoquímico a gran escala que ocurre sobre los depósitos de mineralización y de hidrocarburos enterrados: «chimeneas reductoras» que llegan a la superficie; cambio de la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral del suelo y metales que se acumulan a muy poca profundidad en los suelos (10-30 cm) en una «zona de acreción metálica». A pesar de su potencial, hay muchas fuentes posibles de error cuando se utiliza el Complejo Redox: atributos físicos, como la Susceptibilidad Magnética y la Reflectancia Espectral del suelo son de alguna manera litólogo-dependientes; el Potencial Redox depende de las zonas superficiales reductoras u oxidantes de diferente naturaleza y la señal geoquímica de suelos proveniente del objetivo de mineralización o hidrocarburos es generalmente sutil y algunos procesos superficiales pueden producir respuestas equivalentes o más fuertes. El Complejo Redox es apropiado para la discriminación (priorización) de numerosos objetivos geólogo-geofísico-geoquímicos, elevando así la efectividad de las investigaciones geológicas a un costo reducido y optimizando la toma de decisiones para la perforación exploratoria. Sin embargo, es menos adecuado para la cartografía de objetivos, es decir, la observación de grandes redes, debido a su baja productividad y a que es fuente de variadas «falsas anomalías» relacionadas con las condiciones superficiales variables. En general, los observadores conscientes, las buenas notas de campo y un conocimiento básico de los procesos geólogo-geofísico-geoquímicos superficiales durante el estadio de interpretación, son los factores críticos de éxito.

Anexos

Anexo I.1. Certificado de Invención de autor


REPÚBLICA DE CUBA

OFICINA CUBANA
CC
PI
DE LA PROPIEDAD
INDUSTRIAL

La Directora General de la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial
en uso de sus facultades y de acuerdo con lo establecido
en las disposiciones legales vigentes,
concede el presente:

**CERTIFICADO DE AUTOR
DE INVENCION**

(72) Autor (es) o coautor (es):

MANUEL ENRIQUE PARDO ECHARTE

(71) Solicitante(s):

INSTITUTO DE GEOLOGIA Y PALEONTOLOGIA, con domicilio legal en
Calle Vía Blanca s/n y Calzada de Guinea, San Miguel del Padrón, Ciudad de La
Habana, República de Cuba.

(11) Certificado Nro. : 22 635

Concedido por Resolución No. 475/2000.

(54) Título: **METODO DE MEDICION DEL POTENCIAL REDOX EN SUELOS,
Y SU APLICACION COMBINADA CON LA KAPPAMETRIA A LOS
FINES DE PROSPECCION GEOLOGICA.**

Dado en la Ciudad de La Habana, a 14 de marzo de 2000.


Lic. América N. Santos Riveras
Directora General

Anexo I.1 Certificado de Invención de autor (continuación)



(19) CU

(21) No. de la solicitud: 1998/175

(22) Fecha de la solicitud: 1998.11.17

(31) No. de la solicitud de prioridad :

(32) Fecha de la solicitud de prioridad:

(33) País de la solicitud de prioridad:

(43) Fecha de publicación como solicitud:

(51)⁷ Clasificación Internacional de Patentes: G01V 3/00

(74) Agente Oficial o Representante Legal: Yalily Tielez López. CU

(Se inscribe el presente certificado bajo el No.: 22 635 Tomo: 001; Folio: 011 del libro correspondiente al año 2000 del Departamento de Invenciones, Dibujos y Modelos Industriales, de la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial.)

Anexo I.1 Certificado de Invención de autor (continuación)

RESOLUCION No. 475/2000

POR CUANTO: El Decreto-Ley No. 68 de 14 de mayo de 1983, denominado Decreto-Ley de Invenciones, Descubrimientos Científicos, Modelos Industriales, Marcas y Denominaciones de Origen establece que la Oficina Nacional de Invenciones, Información Técnica y Marcas es la institución encargada de realizar las actividades que en el mismo se disponen.

POR CUANTO: El referido Decreto-Ley faculta al Director de la Oficina Nacional de Invenciones, Información Técnica y Marcas a dictar las resoluciones correspondientes para cumplimentar lo expresado en el **POR CUANTO** anterior.

POR CUANTO: Mediante la Resolución No. 29 de 26 de marzo de 1997 de la Ministra de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente se dispuso la modificación de la denominación de la Oficina Nacional de Invenciones, Información Técnica y Marcas, por el de **OFICINA CUBANA DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL**, identificándose con las siglas **OCPI**, a todos los efectos legales.

POR CUANTO: En fecha 17 de noviembre de 1998, fue presentada ante la Oficina la Solicitud de Certificado de Autor de Invención, No. 1998/175, titulada **METODO DE MEDICION DEL POTENCIAL REDOX EN SUELOS, Y SU APLICACION COMBINADA CON LA KAPPAMETRIA A LOS FINES DE PROSPECCION GEOLOGICA**, por Yalily Tielez López, Representante, a nombre y en representación del **INSTITUTO DE GEOLOGIA Y PALEONTOLOGIA**, con domicilio legal en Calle Vía Blanca s/n y Calzada de Guinea, San Miguel del Padrón, Ciudad de La Habana, República de Cuba, de cuya invención es autor Manuel Enrique Pardo Echarte.

POR CUANTO: El Artículo 22 del mencionado Decreto-Ley establece que como invención susceptible de ser protegida se reconoce la solución técnica de un problema de cualquier rama de la economía, la defensa, la ciencia o la técnica que posea novedad, actividad inventiva y aplicabilidad industrial.

POR CUANTO: El Artículo 16 establece que la Oficina otorgará el certificado correspondiente cuando las solicitudes presentadas se ajusten a lo preceptuado en el propio Decreto Ley. Visto el fondo de documentación técnica que obra en nuestro poder, se ha llegado a la conclusión de que la citada solicitud se refiere a un objeto de invención de los establecidos en el Artículo 37 y que la solución técnica posee novedad, actividad inventiva y aplicabilidad industrial, por lo que debe **CONCEDERSE**.

POR TANTO: En uso de las facultades que me están conferidas,

RESUELVO

PRIMERO: **CONCEDER** a Manuel Enrique Pardo Echarte, el Registro de la Solicitud de Certificado de Autor de Invención No. 1998/175, titulada **METODO DE MEDICION DEL POTENCIAL REDOX EN SUELOS, Y SU APLICACION COMBINADA CON LA**

Anexo I.1 Certificado de Invención de autor (continuación)

KAPPAMETRIA A LOS FINES DE PROSPECCION GEOLOGICA, presentado ante la Oficina en fecha 17 de noviembre de 1998, por Yalily Tiele López, Representante, a nombre y en representación del INSTITUTO DE GEOLOGIA Y PALEONTOLOGIA, con domicilio legal en Calle Vía Blanca s/n y Calzada de Guinea, San Miguel del Padrón, Ciudad de La Habana, República de Cuba, en correspondencia con la Clasificación Internacional de Patentes de la Séptima Edición G01V 3/00.

SEGUNDO: NOTIFÍQUESE la presente resolución a los interesados, para su conocimiento y efectos pertinentes.

TERCERO: PUBLÍQUESE referencia de lo resuelto en el Boletín Oficial correspondiente.

CUARTO: ARCHÍVESE el original de esta Resolución en el expediente que obra en el fondo documental de la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial.

DADA, en la Ciudad de la Habana, a los catorce días del mes de marzo de dos mil.


Lic. América N. Santos Riveras
Directora General

Con esta fecha me doy por NOTIFICADO de la presente Resolución con copia íntegra de la misma.		
15 de	9	de 00
Raúl Flores Cód		
Nombres y Apellidos		
Raúl Flores Cód		
Firma		
Cód		

Anexo I.2 Certificado de Depósito Legal Facultativo de obras Protegidas



CENDA

Centro Nacional de Derecho de Autor

Registro: 1589- 2005

CERTIFICACION DE DEPOSITO LEGAL FACULTATIVO DE OBRAS PROTEGIDAS.

La que suscribe, Lic. Ibiánka Alfonso González, Asesora Jurídica de Registro de Obras del Centro Nacional de Derecho de Autor, CENDA deja constancia de que, previa comprobación, ha sido admitida en el área de depósito legal de esta Institución la obra, protegida por la legislación vigente de Derecho de Autor en la República de Cuba cuyos pormenores se describen a continuación:

Título: "Sistema Redox".

Autor /es: Osvaldo Rodríguez Morán.

Titular: Instituto de Geología y Paleontología.

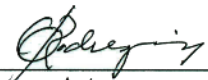
Tipo de Obra: Software.

Característica: Es un Software que modela la experiencia de un experto en la aplicación de un complejo de métodos no convencionales geofísico-geoquímico para la búsqueda de hidrocarburos y minerales metálicos, así como estudios medio ambientales y arqueológicos. Está concebido para adquirir, almacenar, manipular, generar reportes, efectuar la elaboración primaria los atributos observados e interpretar finalmente los datos.

El presente documento que otorga la fe pública del acto de creación. La existencia y la titularidad originaria en esta fecha de la obra descrita, sólo constituiría prueba de primera vista ante cualquier litigio respecto a la autoría y explotación de la misma.

Dado en Ciudad de La Habana, a los 15 días del mes de julio de 2005.



P/O: 
Autor

Para proteger la creación

Calle 15 N° 604 e/ B y C, Vedado, Apartado Postal 4133, Zona 4, Ciudad de La Habana, Cuba.
Teléfono: (53-7) 832 3571 – 73 Fax: (53-7) 66 2030 E-mail: cenda@oscharte.cult.cu
<http://www.cenda.cu>

Anexo II.1. Hoja Excel para el almacenamiento de los datos (BaseDatos).

A		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		BASE DE DATOS																	
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9	Objetivo	Sector-Línea	Estacas	Atribut		REIR	EQ 1	EQ 2	K	U	RE	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4
10	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	0	2.62	8.40	0.00	2.13	1.05	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
11	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	30	3.33	-12.60	-1.76	2.08	1.20	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
12	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	60	2.82	0.40	-13.03	4.73	2.52	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
13	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	80	1.63	-7.60	0.31	2.18	1.24	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
14	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	100	1.63	-10.60	-4.01	1.19	2.02	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
15	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	120	1.63	0.40	-20.82	5.82	2.45	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
16	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	140	1.35	-9.60	-18.03	4.52	2.49	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
17	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	160	1.15	-4.60	-12.71	3.12	2.64	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
18	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	180	2.30	-6.60	-19.29	6.08	3.18	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
19	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	200	0.95	-19.60	-17.74	4.97	2.06	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
20	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	220	1.75	-18.60	-17.83	4.83	3.81	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
21	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	240	1.87	-6.60	-19.42	5.25	3.15	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
22	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	260	1.47	-19.60	-17.22	4.94	3.03	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
23	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	280	0.79	-4.60	-0.74	1.77	2.41	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
24	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	300	2.46	-24.60	0.44	0.73	0.82	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
25	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	320	1.98	-26.60	-1.23	1.25	1.44	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
26	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	340	0.75	-12.60	-1.55	1.09	1.13	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
27	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	360	3.25	-14.60	-8.17	1.61	2.33	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
28	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	380	2.10	-9.60	-2.01	0.99	1.01	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
29	Petróleo	Jatibonico-Jatibonico Nuevo	400	2.46	-10.60	-16.18	3.84	2.56	0.252	189.6	32.593	19.25	25.75			Ni	V		
30	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	0	2.96	-15.70	0.10	0.68	0.76	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
31	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	20	1.62	-13.70	-3.71	1.24	1.28	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
32	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	40	3.90	0.30	-5.62	2.00	1.91	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
33	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	60	1.48	1.30	-1.72	1.18	1.51	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
34	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	80	1.55	-13.70	1.28	1.13	1.16	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
35	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	100	10.14	-16.70	-2.03	1.21	1.25	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
36	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	120	3.00	-16.70	8.59	2.50	0.59	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
37	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	140	1.95	-16.70	-1.37	1.24	1.61	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
38	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	160	1.84	-4.70	-6.19	1.61	1.98	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
39	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	180	0.76	24.30	-5.41	1.61	1.84	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
40	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	200	0.83	-16.70	-4.44	1.47	1.32	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
41	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	220	1.41	28.30	-5.53	1.68	1.89	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
42	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	240	2.17	-1.70	-3.17	1.68	2.20	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
43	Petróleo	Jatibonico-Yacimiento Jatibonico	260	1.91	-14.70	-1.87	1.97	1.84	0.277	215.67	13.913	38	42.333			Ni	V		
44		BaseDatos / SeleDatos / IRAA_IRA_PS / DatosDependAtrib / Dependencias / Profundit																	

Anexo II. Hoja Excel para la seleccion de los datos (SeleDatos).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Selección de datos																
2	OBJETIVOS																
3		Petróleo	x														
4		Minerales															
5		Medio Ambiente															
6																	
7	Estacas	Kn	Ur	REr	Ni	V	K	U	RE	Ni	V						
8																	
9																	
10	0	1.05	0.75	-5.96	0.81	1.04	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
11	20	3.78	-10.25	-11.04	1.44	2.08	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
12	40	1.99	-9.25	-5.34	1.75	1.95	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
13	60	2.92	-5.25	-12.74	4.72	4.41	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
14	80	9.37	7.75	-13.25	3.55	2.96	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
15	100	3.59	-11.25	0.30	1.26	1.26	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
16	120	1.58	-17.25	10.34	1.12	1.07	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
17	140	4.88	-3.25	-0.86	3.28	2.39	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
18	160	2.25	24.75	-11.11	2.34	2.30	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
19	180	0.61	-27.25	10.43	0.94	0.85	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
20	200	0.76	-45.25	1.09	1.48	1.57	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
21	220	2.45	-30.25	-5.26	2.20	1.76	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
22	240	2.80	-16.25	-4.62	3.01	1.98	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
23	260	2.15	-38.25	-0.52	1.17	1.07	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
24	280	1.64	-14.25	-9.73	1.12	1.04	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
25	310	2.44	-9.25	-10.87	1.93	1.35	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
26	340	3.49	-15.25	-11.18	1.75	1.64	0.69	195.25	17.99	22.25	31.75						
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
		BaseDatos	SeleDatos	IRAA	IRA	PS	DatosDependAtrib	Dependencias	Profundit								

Anexo II.3. Hoja Excel para la estimación de los IRAA, IRA y los PS de la Línea (PS_IRAA_IRA_PARA).

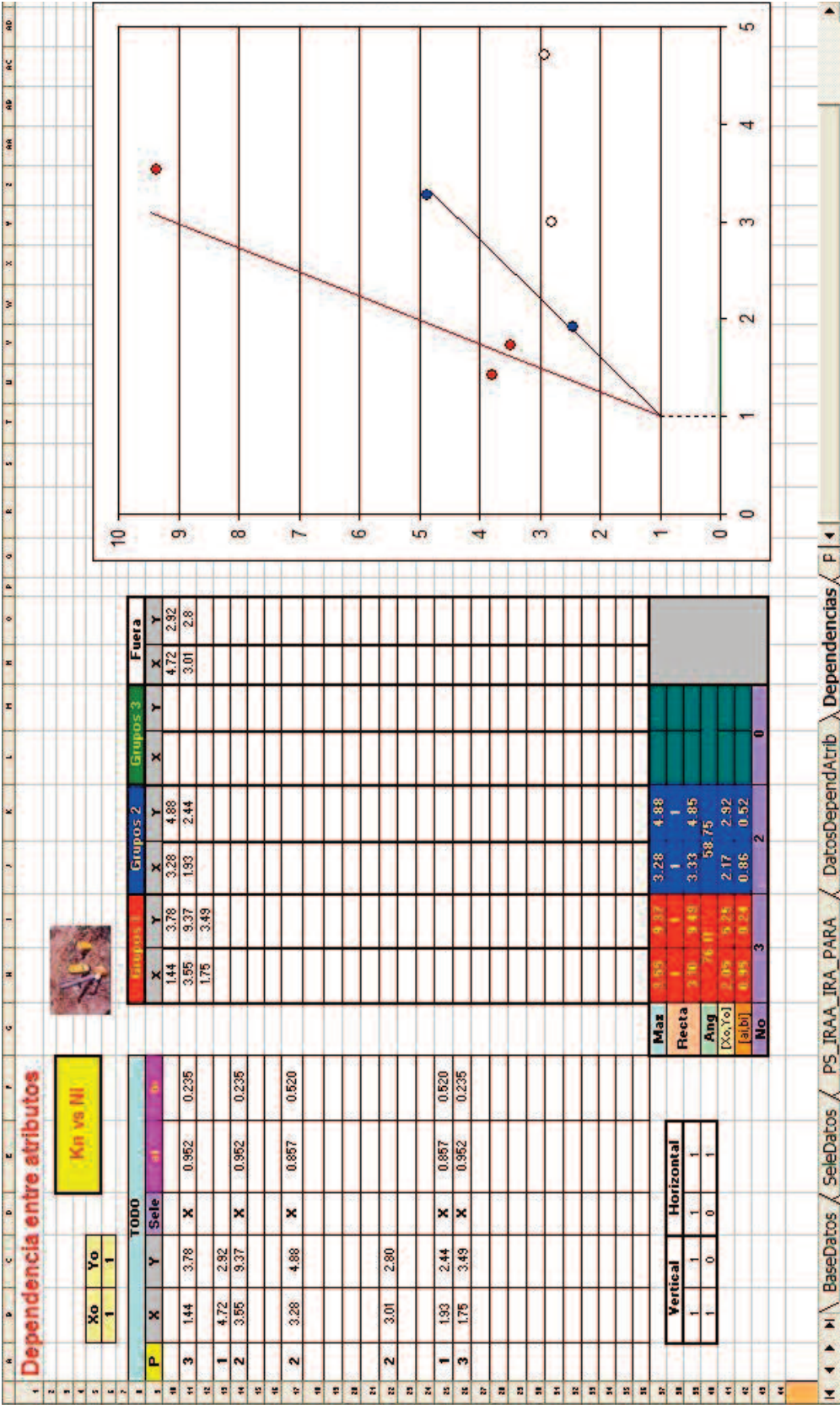
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AG
1	Ciego de Avila-Yacimiento Cristales																															
2																																
3																																
4																																
5																																
6																																
7																																
8	Estacas		PARA	PS	IRA																											
9																																
10	0		-60																													
11	20		36	3	1																											
12	40		100																													
13	60		100																													
14	80		52	2	1																											
15	100		-4																													
16	120		-4																													
17	140		60	2	1																											
18	160		52																													
19	180		-52																													
20	200		12																													
21	220		100																													
22	240		100	2	1																											
23	260		-4																													
24	280		36																													
25	310		100																													
26	340		100	3	1																											
27																																
28																																
29																																
30																																
31																																
32																																
33																																
34																																
35																																
36																																
37																																
38																																

BaseDatos / SeleDatos / PS_IRAA_IRA_PARA / DatosDependAtrib / Dependencias / P | < | > |

Anexo II.4. Hoja Excel para la seleccion de los pares de las dependencias (DatosDependAtrib).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	Datos para las Dependencias entre Atributos																				
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8	Estacas	PS	Ni	Kn	PS	Ni	REr	PS	Ni	Ur											
9																					
10	0																				
11	20	3	1.44	3.78	3	1.44	-11.04	3	1.44	-10.25											
12	40																				
13	60	1	4.72	2.92	1	4.72	-12.74	1	4.72	-5.25											
14	80	2	3.55	9.37	2	3.55	-13.25	2	3.55	7.75											
15	100																				
16	120																				
17	140	2	3.28	4.88	2	3.28	-0.86	2	3.28	-3.25											
18	160																				
19	180																				
20	200																				
21	220																				
22	240	2	3.01	2.8	2	3.01	-4.62	2	3.01	-16.25											
23	260																				
24	280																				
25	310	1	1.93	2.44	1	1.93	-10.87	1	1.93	-9.25											
26	340	3	1.75	3.49	3	1.75	-11.18	3	1.75	-15.25											
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					

Anexo II.5. Hoja Excel para la resolución de las dependencias (Dependencias).



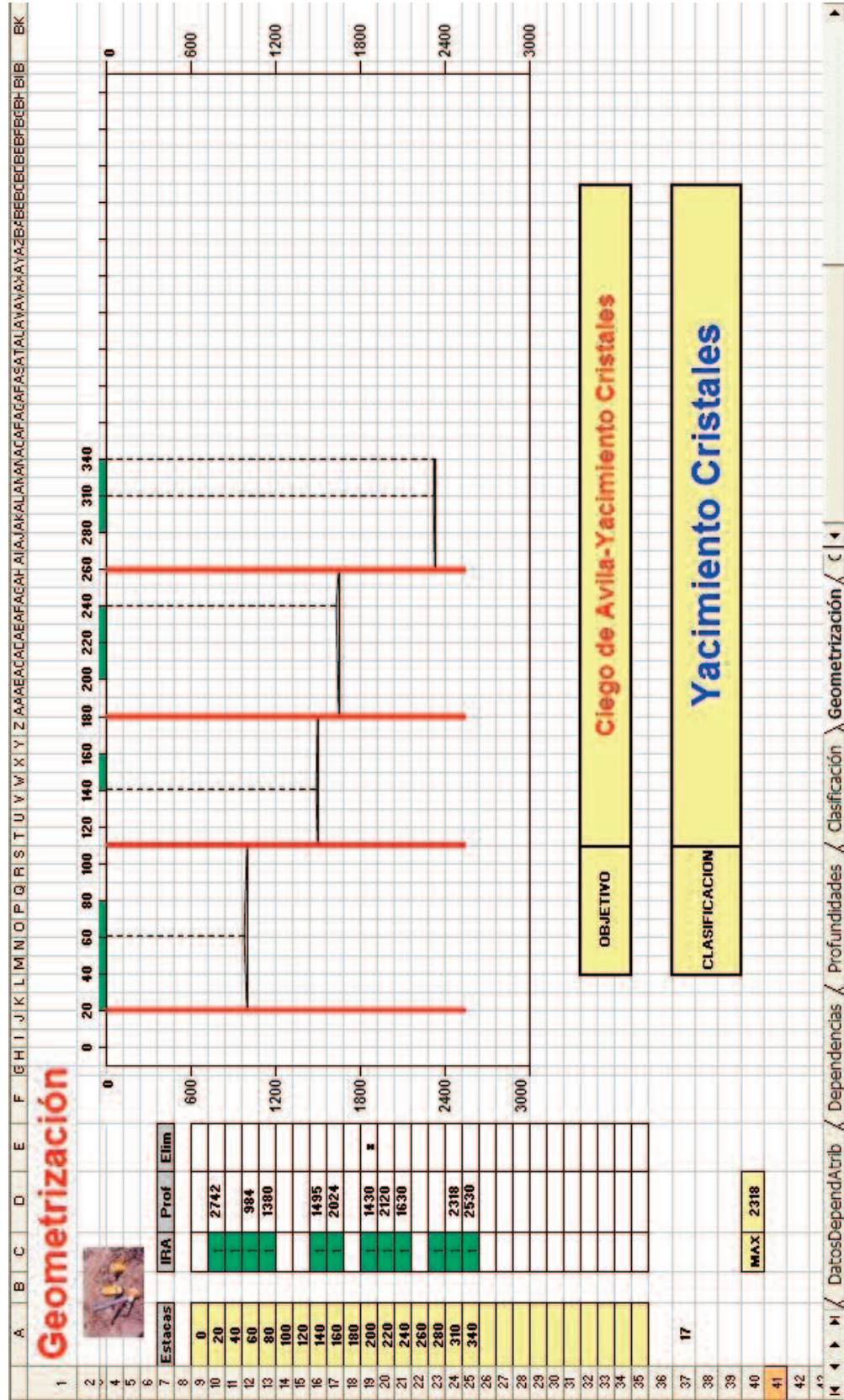
Anexo II.6. Hoja Excel para el cálculo y depuración de las profundidades (Profundidades).

Profundidades																																				
																																				
Ciego de Avila-Yacimiento Cristales																																				
1	Perfil	Estacas	IRA	Kn			Ur			Rer			Cn			PROF. FINAL	± ERROR	% ERROR	Peso																	
2		0		Ps	Valor	ai	bi	Prof		Ps	Valor	ai	bi	Prof	Ps	Valor	ai	bi	Prof		Ps	Valor	ai	bi	Prof	Ps	Valor	ai	bi	Prof		Ps	Valor	ai	bi	Prof
3		20		3	3.78	0.95	0.24	2560		3	10.25	0.82	0.04	2700	3	11.04	1.21	0.14	2050		3	1.44	2830		2742	± 270	10		0.80							
4		40																																		
5		60		1						1	5.25	0.54	0.38	990	1	12.74	1.21	0.14	1910		1	4.72	980		984	± 9	1		0.56							
6		80		2	9.37	0.95	0.24	1600		2					2	13.25	1.21	0.14	1880		2	3.55	1380		1380	± 0	0		0.32							
7		100																																		
8		120		1						1	17.25	0.82	0.04	2340	1						1	1.12	3260		2340	± 0	0		0.24							
9		140		2	4.88	0.86	0.52	1470		2	3.25	0.54	0.38	1500	2						2	3.28	1500		1495	± 30	2		0.80							
10		160								1					1	11.11	1.21	0.14	2040		1	2.34	2020		2024	± 19	1		0.52							
11		180																																		
12		200								1	45.25	0.82	0.04	1430	1						1	1.48	2760		1430	± 0	0		0.24							
13		220													1	5.26	1.21	0.14	2630		1	2.20	2120		2120	± 0	0		0.32							
14		240								2	16.25	0.82	0.04	2390	2						2	3.01	1630		1630	± 0	0		0.32							
15		260								1	38.25	0.82	0.04	1610	1						1	1.17	3180		1610	± 0	0		0.24							
16		280																																		
17		300		1	2.44	0.86	0.52	2390		1	9.25	0.82	0.04	2760	1	10.87	1.21	0.14	2080		1	1.93	2340		2318	± 330	14		0.76							
18		340		3	3.49	0.95	0.24	2630		3	15.25	0.82	0.04	2430	3	11.18	1.21	0.14	2040		3	1.75	2500		2530	± 200	8		0.80							
19																																				
20																																				
21																																				
22																																				
23																																				
24																																				
25																																				
26																																				
27																																				
28																																				
29																																				
30																																				
31																																				
32																																				
33																																				
34																																				
35																																				
36																																				
37																																				

Anexo II.7. Hoja Excel para la clasificación del objetivo a partir de los patrones (Clasificación).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Clasificación															
2																
3																
4																
5																
6																
7		Selección		x		x		x	x	x	x	x	x			
8		Atributos	Kn		Ur		REr		Ni		Fe		Zn		Similitud	
9			F	VM	F	VM	F	VM	F	VM	F	VM	F	VM		
10		Yacimiento Cristales	0.69	3.24	195.30	-18.03	17.99	-9.20	22.30	2.60	0.94	33.25	31.75			
11		Jatibonico Oeste	0.22	2.52	271.70	-42.55	12.22	-3.96	43.00	1.77	1.81	85.50	55.80			
12		Jatibonico Nuevo	0.25	2.22	189.60	-12.90	32.59	-11.9	19.3	3.67	0.90	52.00	25.75			
13		Yacimiento Jatibonico	0.28	2.92	215.70	-13.10	13.91	-3.73	38	1.82	1.30	45.00	42.33			
14																
15																
16																
17																
18		Objeto	0.69	3.24	195.25	-18.04	17.99	-9.19	22.25	2.60	31.75					
19																
20																
21																
22		Clasificación	Yacimiento Cristales													30.81
23																
24																
25																
26																
27																

Anexo II.8. Hoja Excel para el graficado del modelo propuesto (Geometrización).



137

Anexo II.10. Hoja Excel auxiliar para variables globales de trabajo (Definiciones).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Atributos		Min	Max	Interv	Peso	Peso [fracc]			Prioridad de los EQ			
1										1	Ni		
2	Kappa Normalizada	Kn	0.5	12	0.5	24	0.240			2	V		
3	Potencial Redox Reducido	Ur	-75.5	90	15	24	0.240			3	Fe		
4	Reflectancia Espectral Reducida	Rer	-20.1	10	1	20	0.200			4	Zn		
5	Elemento Químico	Cn	0.5	7.5	0.5	32	0.320			5	Pb		
6						100				6	Co		
7										7	SEQ		
8													
9													
10													
11	Atributos												
12	Kappa Normalizada	Kn	≥ 1.45	≤ 1.45		≤ 0.55	Medio Amb.						
13	Potencial Redox Reducido	Ur	≤ 0										
14	Reflectancia Espectral Reducida	Rer	≤ -1										
15	Elemento Químico	Cn	≥ 1.45										
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													

Complejo Redox.
Métodos no convencionales de exploración

de Manuel Enrique Pardo Echarte y
Osvaldo Rodríguez Morán

Fue editado por la
Universidad Olmeca, A.C.

Se concluyó en la ciudad de
Villahermosa, Tabasco, México
en diciembre de 2021.

Para la composición de los textos se utilizó la fuente Book Antiqua.



Osvaldo Rodríguez Morán

Ingeniero geofísico (1980). Investigador titular y profesor titular de la Universidad Tecnológica de La Habana; máster en Geología Petrolera y doctor en Ciencias Técnicas. Ha participado en cerca de veinte cursos sobre temas como interpretación compleja de los datos geofísicos; principios del cálculo de reservas; análisis de prospectos; cartografía digital; teoría de los campos potenciales; análisis de riesgo en la producción; dirección integrada de proyectos; manejo de datos en la industria petrolera; minería de datos y métodos matemáticos aplicados a las geociencias, y ha sido ponente en más de ochenta eventos nacionales e internacionales). Posee más de cincuenta informes en el Archivo Técnico del Centro de Investigación del Petróleo; publicaciones internacionales en *Proceeding* de IBERAMIA'92; *Revista Geofísica Internacional*; *AAPG'94 Convention Abstracts*; *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* y *Boletín de Ciencias de la Tierra* de la Escuela de Geociencias y Medioambiente de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Posee además treinta publicaciones internacionales presentadas en: V Congreso Cubano de Geología y Minería; AAPG International Conference and Exhibition September 1996; Informática 2004; X Convención Internacional y Feria Informática 2004; GEOINFO'2004; Geociencias de 2005 a 2017; Informática 2007; XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Es coautor del libro *Unconventional Methods for Oil & Gas Exploration in Cuba: The Redox Complex* de la editora Springer International Publishing. Ha sido tutor de varias tesis de licenciatura y de maestría. Ha impartido cursos, postgrados para maestrantes y doctorandos en universidades mexicanas en los estados de Nayarit y Tabasco. Ha recibido varios reconocimientos, recientemente le fue otorgado por la Sociedad Geológica de Cuba el Premio Antonio Calvache y Dorado, por haber resultado sobresaliente el conjunto de actividades científicas durante el año 2016.



UNIVERSIDAD OLMECA
Raíz de sabiduría



Centro de Desarrollo de Competencias
Energéticas y Sustentabilidad
(CEDECES)

ISBN: 978-607-99709-1-8



9 786079 970918
Versión impresa

ISBN: 978-607-99709-2-5



9 786079 970925
Versión digital