

Caracterización geoquímica del perfil litológico del yacimiento laterítico de níquel “San Felipe”, Camagüey, Cuba

Alfonso-Chang-Rodríguez ^{(*)1}; Esperanza-Tauler ⁽²⁾; Waldo-Lavaut-Copa ⁽³⁾; Arturo-Rojas-Purón ⁽⁴⁾ y Joaquín-Proenza-Fernández ⁽²⁾

(1) Empresa Geominera Camagüey, Camagüey, Cuba. Email: alfonsochr@geocmg.co.cu,
alfonso.chang@reduc.edu.cu

(2) Departament de Cristallografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, España.

(3) Dirección de Prospección, IGP, La Habana, Cuba. Email: waldo@igp.minem.cu

(4) Departamento Geología, Facultad Minería y Geología, ISMM Moa, Holguín, Cuba.

Recibido: octubre 15, 2014	Aceptado: junio 23, 2015
----------------------------	--------------------------

Resumen

El yacimiento de San Felipe representa un excelente ejemplo del modelo laterítico-saprolítico arcilloso de depósitos de níquel supergénico. Mediante la combinación de métodos de fluorescencia de Rayos X (FRX) y de espectroscopia de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), se realizó la caracterización geoquímica del perfil litológico de meteorización de este yacimiento, lo que constituye el objetivo principal del trabajo y cuyos resultados se exponen en el presente artículo.

Palabras clave: Geoquímica, perfil litológico, lateritas, níquel supergénico, yacimiento San Felipe, Cuba

Geochemical characterization of the lithological profile of the “San Felipe” nickel laterite deposit, Camagüey, Cuba

Abstract

The San Felipe ore deposit represents an excellent example of the lateritic-saprolitic clay model of supergenic nickel deposits. In the basis of the combination of methods and instrumental techniques like X-ray fluorescence (XRF) and ICP-MS was achieved the geochemical characterization of the lithological weathering profile of this ore deposit, which is the main objective of this work and the results therein are shown in this paper.

Key words: Geochemistry, lithological profile, laterites, supergenic nickel, San Felipe deposit, Cuba.

1. Introducción

Buguelsky et al. (1967) y Formell Cortina (1979) indicaron la existencia de cortezas de meteorización lateríticas en Cuba. Los resultados producidos por estos investigadores poseen un valor práctico y sirvieron como referencia para el estudio geoquímico de las mismas.

Para los perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ultrabásicas serpentizadas, como ocurre en la región de Camagüey, es característica la existencia de determinadas regularidades en sus aspectos químicos como su zonalidad geoquímica vertical (Edelshtein 1982).

El yacimiento San Felipe se diferencia notablemente de los depósitos de lateritas ferroniquelíferas del resto del país. Por otra parte, tiene características similares a otros depósitos del mundo, localizadas en regiones de clima tropical y subtropical, como en Australia y Brasil (Golightly 1981).

Se parte de la necesidad de caracterizar geoquímicamente el horizonte saprolítico, ya que contiene el grueso del mineral útil (menas silicatadas) del yacimiento.

Debido a que la capa útil de San Felipe se concentra en las arcillas esmectíticas desarrolladas en la saprolita media y superior, Chang Rodríguez (2013a) propone que el depósito pertenece al tipo silicatado arcilloso, lo que se corresponde con el modelo laterítico-saprolítico arcilloso, según la clasificación metalogénica vigente en Cuba (Lavaut Copa 1983, 1984, 2001, 2004, 2005, 2008, 2014). De acuerdo a la clasificación aceptada a nivel mundial, correspondería con los depósitos tipo arcilla. Estos depósitos contienen alrededor del 10% de las reservas mundiales de Ni en lateritas. El níquel se acumula en esmectitas (nontronitas y saponitas), comúnmente en las partes altas de las saprolitas y en la parte inferior del horizonte limonítico (Proenza Fernández et al 2015).

Las arcillas esmectíticas y las serpentinas intemperizadas son las menas principales en el yacimiento San Felipe, Camagüey, Cuba. (Chang Rodríguez 2009 y Tauler et al 2011).

El objetivo fundamental del presente trabajo es la caracterización geoquímica del perfil litológico del yacimiento de níquel supergénico San Felipe, lo que contribuirá a un mayor conocimiento sobre la presencia y distribución de los elementos químicos que pueden ser suministrados al proceso metalúrgico del níquel en Cuba.

2. Materiales y métodos

2.1 Definición de la zona de estudio

Los resultados de Chang Rodríguez (2001, 2005) permitieron establecer los sectores noroeste (NW), este (E) y sureste (SE) como los más perspectivas y un sector centro-oeste (CW) como menos perspectivo (Fig. 1). Para la caracterización se seleccionaron dos sondeos: uno del sector E más enriquecido y otro del sector CW con los contenidos de níquel más bajos del depósito.

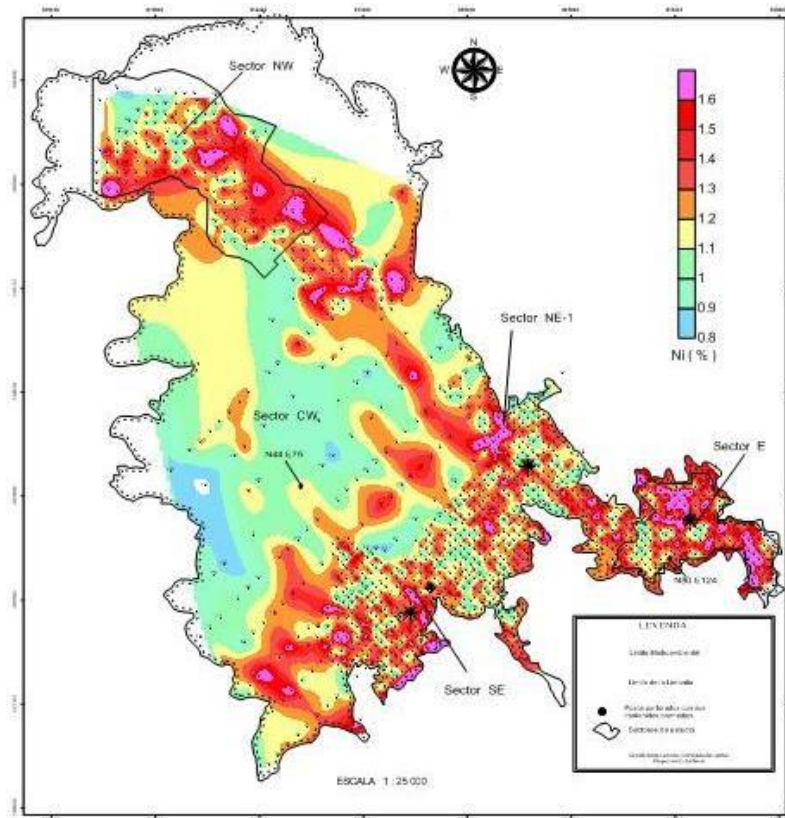


Fig. 1 Mapa geoquímico de distribución del Ni en la capa útil del yacimiento San Felipe

2.2 Muestreo y caracterización de los perfiles

Las muestras estudiadas provienen de dos sondeos representativos del perfil laterítico-saprolítico de San Felipe.

En total se dispone de 20 muestras de sondeo, 8 de las cuales pertenecen al sondeo 83 (N44 E75), que caracteriza todos los horizontes del perfil y las 12 restantes al sondeo 84 (N80 E 124), que caracteriza principalmente a la saprolita. En la fig. 2 se ilustra la relación de muestras junto con la profundidad a la que se han obtenido y el horizonte al que pertenecen (Marín 2011). Se observa que el espesor de los horizontes no se conserva lateralmente y que en el sondeo 84 la saprolita prácticamente aflora en la superficie (topográfica).

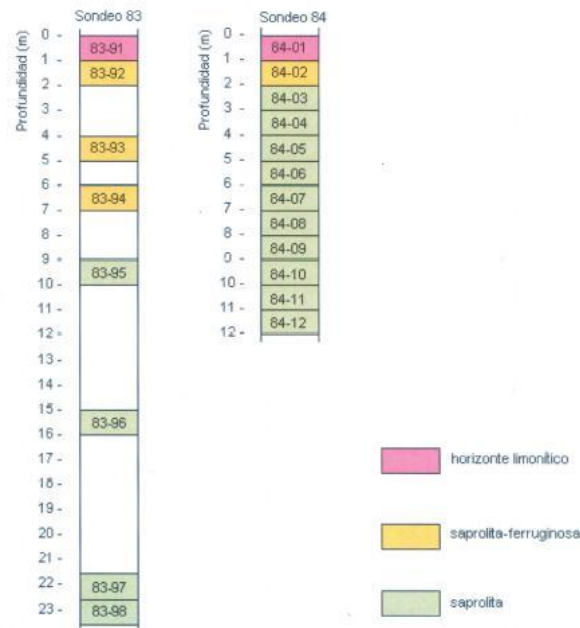


Fig. 2. Perfiles esquemáticos de los sondeos 83 (N44 E75) y 84 (N80 E124). Relación de muestras y profundidad a la que se han obtenido.

El perfil de meteorización de San Felipe (**fig. 2**) tiene un espesor medio de 20 metros y presenta, de techo a muro, las siguientes zonas litológicas (Gallardo et al 2010):

Zona de laterita: de poco espesor (aproximadamente 1 metro), muy terroso y de marcado color rojizo;

Zona de saprolita-ferruginosa: de color marrón. Tiene un espesor de 9 metros y las muestras, básicamente terrosas y muy poco compactas, contienen algún fragmento de roca madre superior a 2 centímetros de diámetro;

Zona de saprolita: Tiene un espesor aproximado de 10 metros y presenta un color verde, con tonalidades grises y marrones. Las muestras de dicho horizonte son terrosas, aunque hacia la parte inferior, contienen fragmentos más compactos;

Dentro de la saprolita se han establecido tres subzonas que son: la a) saprolita superior, b) media e c) inferior.

La saprolita superior tiene un espesor estimado de tres metros. Las muestras están caracterizadas por contener mucha esmectita y muy poca lizardita.

La saprolita media es ligeramente más potente que la saprolita superior (espesor estimado de 4 metros). La lizardita aparece en cantidades más elevadas que en la saprolita superior y la cantidad de esmectita ha disminuido.

La saprolita inferior tiene un espesor superior a 3 metros. Las muestras están caracterizadas por contener lizardita y muy poca esmectita.

La zona de la roca madre consiste predominantemente de harzburgitas y dunitas serpentinizadas, agrietadas, algo lixiviadas y localmente intruidas por gabros.

2.3 Técnicas analíticas

Los métodos y técnicas analíticas que se utilizaron para caracterizar el perfil laterítico de San Felipe son: Fluorescencia de Rayos X (FRX) y espectroscopía de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

Los análisis de los elementos mayoritarios se realizaron con un espectrómetro Philips PRO PW-2440 de fluorescencia de rayos X. Los elementos traza y los elementos de tierras raras (REE) se han determinado mediante espectroscopía ICP-MS. Ambos análisis se realizaron en el Centro de Investigación Científica de la Universidad de Granada (España).

Los análisis de elementos del grupo del platino (EGP) se realizaron mediante ICP-MS en “Genalysis Laboratory Services Pty. Ltd.” en Maddington (Australia), donde los límites de detección son 1 ppm para el Rh y 2 ppm para el Os, Ir, Ru, Pt y Pd.

Las características texturales se han estudiado a partir de las imágenes de microscopía. Para la obtención de imágenes de microscopía óptica se utilizó un microscopio óptico de polarización Nikon Eclipse LV100 POL del

Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales de la Facultad de Geología (Universidad de Barcelona).

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización geoquímica

La distribución de los elementos químicos mayoritarios y minoritarios en el perfil vertical del manto de meteorización de San Felipe, a partir de los datos de FRX e ICP-MS de las muestras analizadas de los sondeos 83 (N44 E75) y 84 (N80 E124), se muestra en las tablas I y II, que permite caracterizar el comportamiento geoquímico de estos en la laterita y saprolita de San Felipe.

Además, el estudio estadístico de dichos datos (matriz de correlaciones y regresiones) ha permitido establecer series de elementos que tienen un comportamiento similar, esto es, que se acumulan en los mismos horizontes.

Tabla I. Composición química del perfil laterítico del yacimiento San Felipe. Resultados de los análisis por FRX

Muestra		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Zr	LOI	SUMA
Ref. CIC	Ref. Usuario	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(%)	(%)
192/10	84-12	44.46	1.19	11.94	0.19	29.86	0.28	LLD	LLD	0.01	0.01	3.8	11.02	98.95
191/10	84-11	44.73	1.82	16.89	0.19	22.79	0.15	LLD	0.01	0.02	0.01	5.9	9.96	96.56
190/10	84-10	43.97	1.51	17.56	0.22	23.23	0.12	LLD	0.01	0.07	0.01	5.5	9.99	96.68
189/10	84-09	46.35	2.16	21.84	0.45	14.95	0.15	LLD	0.01	0.03	0.01	5.6	8.81	94.75
188/10	84-08	47.57	2.27	24.18	0.42	11.49	0.19	LLD	0.02	0.06	0.01	5.8	7.91	94.12
187/10	84-07	46.30	2.17	22.65	0.35	13.62	0.18	LLD	0.01	0.05	0.01	5.7	8.36	93.70
186/10	84-06	45.25	2.41	25.87	0.34	10.89	0.20	LLD	0.02	0.04	0.01	5.4	8.00	93.03
185/10	84-05	45.83	3.27	30.47	0.58	5.65	0.33	LLD	0.02	0.06	0.01	6.1	6.90	93.12
184/10	84-04	45.03	4.23	29.85	0.95	5.62	0.25	LLD	0.02	0.05	0.01	6.2	7.24	93.25
183/10	84-03	49.56	3.40	30.88	0.76	4.23	0.24	LLD	0.02	0.03	0.01	5.9	6.45	95.58
182/10	84-02	32.15	7.73	32.01	0.21	4.77	0.20	LLD	0.01	0.08	0.02	7.2	5.15	82.33
180/10	83-99	45.35	2.73	24.14	0.43	15.66	0.08	LLD	LLD	0.03	0.01	6.0	8.58	97.00
179/10	83-98	48.82	3.09	31.43	0.18	7.02	0.09	LLD	LLD	0.02	0.01	6.8	6.37	97.03
178/10	83-97	46.74	3.19	30.61	0.18	7.13	0.15	LLD	LLD	0.06	0.01	5.2	7.51	95.58
177/10	83-96	84.21	1.09	8.95	0.05	1.34	0.03	LLD	LLD	0.06	0.01	5.5	2.34	98.08
176/10	83-95	48.88	3.16	33.57	0.32	3.90	0.13	LLD	LLD	0.03	0.01	8.8	7.10	97.11
175/10	83-94	31.34	4.70	47.83	0.11	2.83	0.11	LLD	LLD	0.04	0.02	7.9	8.79	95.77
174/10	83-93	36.30	4.43	44.46	0.14	2.56	0.13	LLD	LLD	0.06	0.01	6.4	8.66	96.75
173/10	83-92	41.79	7.42	34.40	0.21	4.16	0.11	LLD	0.03	0.20	0.05	38.5	9.54	97.91
172/10	83-91	8.84	13.00	63.25	0.42	0.21	0.03	LLD	0.04	0.48	0.20	98.2	11.29	97.75

Tabla II. Composición química del perfil laterítico del yacimiento San Felipe. Resultados de los análisis por ICP-MS (en ppm)

Ref. Usuario	Li	Rb	Cs	Be	Sr	Ba	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Y	Nb	Ta	Zr	Hf
83-91	15.062	4.171	0.701	1.707	8.344	64.451	50.91	351.206	19290	362.614	3471.628	107.894	203.252	18.895	8.194	6.695	0.482	63.373	1.754
83-92	5.295	2.049	0.398	1.224	11.984	81.498	34.997	161.282	6245.881	338.695	7221.628	122.692	100.283	7.192	13.433	3.113	0.225	25.524	0.726
83-93	0.462	0.441	0.059	0.23	11.975	89.106	43.745	157.082	6872.52	173.313	8709.474	79.62	140.154	3.54	8.064	0.189	0.036	1.54	0.054
83-94	0.567	0.482	0.031	0.116	9.193	0	45.093	155.056	7197.445	111.085	7437.816	78.415	142.218	3.712	4.406	0.111	0.02	1.068	0.03
83-95	0.877	0.41	0.032	0.123	16.978	129.891	26.829	89.616	4501.756	288.542	7813.568	79.656	132.842	2.933	3.503	0.087	0.025	2.129	0.044
83-96	2.857	0.276	0.031	0	2.721	2.901	8.094	21.935	1260.646	88.736	2890.229	36.07	35.547	1.119	0.663	0.126	0.202	0.58	0.023
83-97	0.968	0.294	0.029	0	5.846	0	30.086	41.151	6339.94	245.304	8850.495	34.498	126.288	2.961	0.556	0.078	0.028	0.446	0.013
83-98	0.732	0.316	0	0	6.631	42.536	31.061	52.845	4614.964	274.074	8651.019	41.278	118.716	3.508	0.579	0.303	0.033	0.913	0.018
83-99	1.137	0.181	0	0	5.984	23.33	25.786	38.376	4065.677	300.723	6513.55	34.05	70.048	2.679	0.679	0.126	0.024	0.696	0
84-01	15.681	3.315	0.583	1.026	6.508	26.374	60.73	213.478	17070	395.694	3358.045	96.405	149.596	13.606	5.785	4.319	0.314	41.95	1.232
84-02	20.866	1.171	0.025	0	20.683	36.44	25.784	246.872	48710	223.35	7182.858	70.888	938.878	5.721	0.984	0.321	0.043	2.312	0.043
84-03	2.66	0.832	0	0	37.761	497.114	31.314	57.272	6336.059	1392.387	10020	65.927	137.599	3.126	0.899	0.094	0	0.841	0
84-04	0.822	0.858	0	0.151	28.858	493.232	28.048	44.73	5772.298	1057.317	15340	80.231	147.772	3.399	2.379	0.136	0.008	0.756	0.002
84-05	0.909	0.918	0	0.101	26.575	81.592	29.605	42.633	6582.965	793.146	19360	63.989	156.872	2.912	3.791	0.051	0	0.634	0
84-06	2.133	0.582	0	0.158	21.415	32.514	22.876	35.596	3920.17	363.164	24020	31.379	173.558	1.743	10.876	0.01	0	0.231	0
84-07	2.113	0.604	0	0	19.823	171.834	21.051	32.222	3255.35	290.317	21630	26.346	89.429	1.785	15.141	0.026	0	1.182	0.043
84-08	1.805	0.628	0	0	19.858	112.456	22.055	31.329	3052.497	309.497	19090	21.763	82.323	1.898	11.119	0.012	0.002	0.1	0
84-09	1.543	0.491	0	0	26.641	289.106	17.958	32.645	2425.159	257.286	18440	14.359	69.591	1.631	12.836	0.016	0.003	0.07	0
84-10	1.442	0.379	0	0	12.248	27.286	15.244	33.111	2329.668	208.796	8554.458	18.225	52.362	1.112	3.462	0.024	0.019	0.107	0
84-11	2.206	0.427	0	0	12.227	34.434	16.519	38.947	2802.192	215.938	8539.387	21.783	60.471	1.333	3.884	0.083	0.039	0.724	0
84-12	1.729	0.248	0	0	7.89	10.053	11.459	39.864	1561.433	128.962	2587.776	39.911	27.203	0.776	0.246	0.004	0	0	0

Ref. Usuario	Mo	Sn	Ti	Pb	U	Th	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
83-91	5.761	1.202	0.153	14.741	3.259	6.076	9.222	57.258	2.528	9.946	2.342	0.533	1.861	0.305	1.794	0.366	1.059	0.173	1.229	0.167
83-92	2.162	0.412	0.072	4.585	0.897	2.244	8.324	25.206	2.81	11.233	2.724	0.621	2.44	0.419	2.463	0.521	1.476	0.232	1.537	0.24
83-93	1.06	0	0.018	0.33	0.053	0.115	5.096	1.321	1.544	5.88	1.38	0.312	1.31	0.201	1.207	0.237	0.659	0.101	0.577	0.113
83-94	1.057	0	0.005	0.348	0.061	0.063	2.49	0.562	0.73	2.805	0.628	0.13	0.624	0.093	0.541	0.126	0.338	0.058	0.37	0.06
83-95	0.807	0	0.018	0.112	0.029	0.041	2.819	0.878	0.497	2.123	0.233	0.072	0.239	0.044	0.293	0.076	0.226	0.034	0.256	0.048
83-96	9.56	0	0.008	0	0.021	0.005	0.311	0.455	0.061	0.19	0.016	0.01	0.02	0.004	0.036	0.009	0.043	0.009	0.061	0.011
83-97	0.91	0	0.011	0.312	0.019	0.032	0.288	0.274	0.066	0.261	0.047	0.018	0.043	0.008	0.059	0.015	0.05	0.012	0.082	0.013
83-98	0.761	0.179	0.009	0.108	0.025	0.35	0.347	0.333	0.089	0.285	0.053	0.018	0.062	0.009	0.054	0.01	0.023	0.006	0.042	0.007
83-99	0.651	0.131	0.021	0.541	0.021	0.047	0.404	0.527	0.082	0.208	0.052	0.006	0.04	0.006	0.044	0.013	0.039	0.007	0.06	0.007
84-01	3.993	1.037	0.159	11.177	2.576	4.379	7.471	30.398	1.924	7.377	1.556	0.359	1.279	0.233	1.314	0.265	0.698	0.115	0.786	0.105
84-02	1.171	0.145	0.009	0.741	0.143	0.221	1.158	2.379	0.271	1.02	0.224	0.055	0.156	0.027	0.182	0.039	0.077	0.011	0.074	0.007
84-03	0.251	0.232	0.021	0.371	0.022	0.067	1.227	4.934	0.263	1.038	0.169	0.079	0.176	0.025	0.153	0.025	0.057	0.008	0.061	0.012
84-04	0.304	0.117	0.028	0.397	0.02	0.034	3.446	1.908	0.796	2.999	0.527	0.199	0.589	0.081	0.475	0.104	0.27	0.051	0.429	0.061
84-05	0.192	0.168	0.001	0	0.024	0	1.64	9.068	0.557	2.079	0.606	0.174	0.627	0.12	0.913	0.208	0.643	0.137	1.086	0.163
84-06	0.288	0.121	0	0	0.025	0	1.467	5.244	0.73	3.139	1.039	0.327	1.32	0.261	1.828	0.436	1.314	0.238	1.635	0.28
84-07	0.297	0.164	0.001	0	0.039	0.007	2.055	0.9	0.997	4.298	1.302	0.425	1.616	0.288	1.942	0.485	1.451	0.244	1.61	0.265
84-08	0.171	0.133	0	0	0.015	0	2.835	0.163	1.087	4.492	0.907	0.266	0.919	0.132	0.962	0.22	0.59	0.093	0.547	0.076
84-09	0.4	0.05	0.005	0	0.025	0	3.043	0.16	1.2	5.553	0.905	0.282	0.827	0.122	0.792	0.195	0.488	0.055	0.349	0.045
84-10	0.584	0.069	0	0	0.013	0	2.213	0.293	0.369	1.608	0.192	0.036	0.121	0.017	0.119	0.027	0.075	0.01	0.054	0.007
84-11	0.438	0.092	0	0.245	0.045	0.049	1.792	0.754	0.401	1.628	0.225	0.056	0.209	0.036	0.217	0.054	0.152	0.025	0.132	0.023
84-12	0.088	0	0	0	0.008	0	0.102	0.057	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.016	0.002

3.1.1 Elementos mayoritarios

Los contenidos de MgO en el perfil laterítico aumentan con la profundidad (fig. 3). Los contenidos varían del 29,86% en peso en la base del perfil al 0,21% en peso en la parte alta, poniendo de manifiesto que aquí se ha lixiviado casi completamente.

La distribución del contenido de magnesio en el manto de meteorización de San Felipe muestra fuertes contrastes en sus diferentes secciones, denotando una compleja estructura litológica interna, según se muestra a continuación: (en % de peso) laterita (limonita) <0,3%, saprolita ferruginosa 2,5%-4,8%, saprolita superior 4,2%-5,6%, saprolita media

~12% y saprolita inferior >22% en peso MgO (fig. 3). Los cambios más importantes en la concentración de MgO se observan a 12,5 metros y 16,5 metros, definiendo el límite entre la saprolita superior y la saprolita media e inferior.

El SiO₂ presenta valores cercanos al 40% en buena parte del perfil, poniendo de manifiesto que la sílice ha sido sólo parcialmente lixiviada (Formell Cortina 2003). En la laterita, donde los valores altos de Fe₂O₃ son los máximos, la concentración de SiO₂ es menor.

El Al₂O₃ presenta valores bajos (inferiores al 5% en peso) en prácticamente todo el perfil. Hacia la parte alta del perfil las concentraciones aumentan ligeramente, y en la laterita presenta valores que alcanzan el 13% en peso.

El contenido de Fe₂O₃ disminuye con la profundidad. Los valores oscilan entre el 11,94% (saprolita inferior) y el 63,25% en peso (laterita).

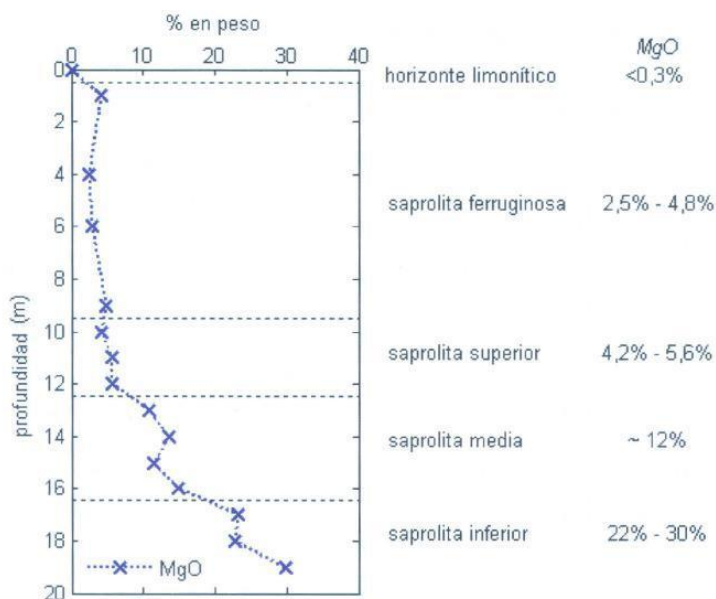


Fig. 3 Variación del contenido de MgO a lo largo del perfil y valores característicos de cada horizonte

3.1.2 Elementos minoritarios

Aquí se incluyen los elementos que tienen concentraciones iguales ó superiores a 1000 ppm (0,1% en peso) en alguna de las muestras. Estos son: Ni, Mn, Ca, Ti, P, Cr y Co.

El Cr₂O₃ presenta valores bajos (inferiores al 1% en peso) en prácticamente todo el perfil con una ligera tendencia a aumentar en superficie (en la laterita, la concentración es del 2,82% en peso). A 9 metros de profundidad (muestra 84-02; saprolita-ferruginosa) se observa un máximo de 7,2%.

Las concentraciones de MnO oscilan entre 0,11 % (saprolita-ferruginosa) y 0,95% en peso (saprolita superior). El horizonte que concentra más MnO es la saprolita superior (concentraciones superiores al 0,7 % en peso), seguido de la saprolita media y el horizonte limonítico, ambos con concentraciones que rondan el 0,4% en peso. En los otros horizontes las concentraciones son inferiores a 0,2% en peso.

Las concentraciones de NiO (fig. 4a) se mantienen, en buena parte del perfil, constantes, con valores que se sitúan alrededor del 1% en peso. El horizonte que más concentra el níquel es la saprolita y, especialmente la saprolita media, donde el contenido promedio en NiO es del 2,65% en peso.

Las concentraciones de CoO (fig. 4b) son más ó menos constantes y bajas (inferiores a 0,05% en peso) en todo el perfil, exceptuando la saprolita superior donde se observa un máximo que alcanza el 0,13% en peso.

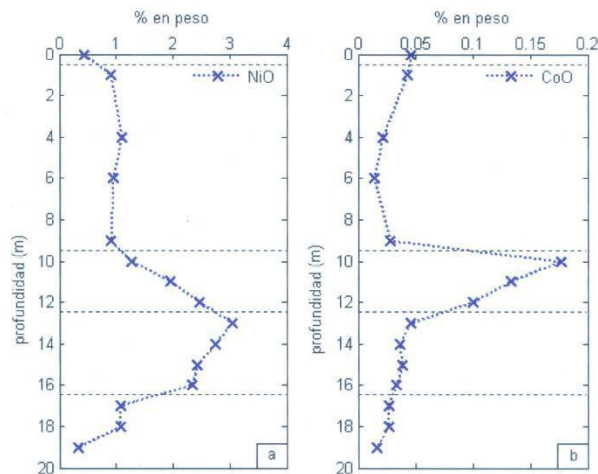


Fig. 4 (a) Variación del contenido de NiO a lo largo del perfil. (b) Variación del contenido de CoO a lo largo del perfil

Se ha estudiado la correlación lineal entre CoO y NiO y entre CoO y MnO. El coeficiente de correlación lineal del CoO y NiO es $r=0,23$, y el coeficiente de determinación $R^2=0,05$, de modo que no están correlacionados linealmente. El diagrama de dispersión tampoco sugiere una correlación logarítmica. Sin embargo, sí existe una correlación lineal directa entre el Mn y el Co ($r=0,896$ y $R^2=0,788$).

Como se ha visto, el CoO y el MnO se concentran en la saprolita superior y el NiO en la saprolita media. En perfiles lateríticos tipo silicato hidratado de la República Dominicana (Loma Ortega) (Tauler et al. 2009) se ha observado que el NiO se acumula mayoritariamente en silicatos hidratados y el cobalto, en cambio, en fases minerales tipo óxidos ó hidróxidos como las asbolanas, hecho que apunta que en el perfil de San Felipe el cobalto también estará en fases tipo óxidos de hierro.

El TiO_2 y el P_2O_5 tienen un comportamiento parecido en el perfil: las concentraciones son relativamente bajas, aumentando considerablemente hacia la parte superior del perfil (horizonte limonítico y parte superior de la saprolita-ferruginosa).

Las concentraciones de CaO son muy variables y aleatorias en el perfil (oscilan entre 0,03% y 0,33% en peso), y no se detecta una tendencia clara a concentrarse en algún horizonte.

3.1.3 Tierras raras (REE)

Los elementos de la fig. 5, lutecio (Lu), iterbio (Yb), tulio (Tm), erbio (Er), holmio (Ho), disprosio (Dy) y terbio (Tb), tienen un comportamiento similar en el perfil: se acumulan entre 12 y 15 metros de profundidad (saprolita media) y en la parte alta del perfil (horizonte limonítico y parte superior de la saprolita-ferruginosa). Los coeficientes de correlación lineal, r , entre los distintos elementos son todos superiores a 0,9. (ver matriz en tabla III).

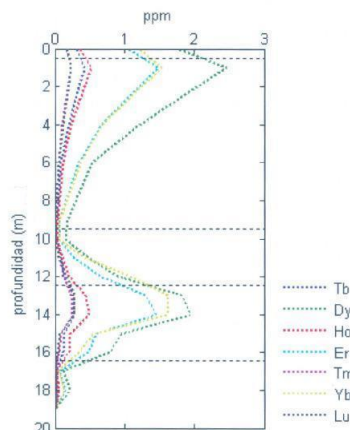


Fig. 5 Variación del contenido de elementos del grupo REE a lo largo del perfil.

Tabla III. Matriz de coeficientes de correlación lineal.

Asociación de elementos REE							
	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Tb	1.000						
Dy	0.992	1.000					
Ho	0.971	0.992	1.000				
Er	0.962	0.987	0.998	1.000			
Tm	0.929	0.964	0.980	0.989	1.000		
Yb	0.913	0.949	0.963	0.975	0.995	1.000	
Lu	0.892	0.933	0.953	0.969	0.992	0.994	1.000

Asociación de otros elementos traza															
	Rb	Cs	Be	Ga	Nb	Ta	Zr	Hf	Mo	Sn	Tl	Pb	U	Th	Ce
Rb	1.00														
Cs	0.96	1.00													
Be	0.93	0.99	1.00												
Ga	0.98	0.94	0.90	1.00											
Nb	0.98	0.99	0.97	0.96	1.00										
Ta	0.97	0.99	0.96	0.96	1.00	1.00									
Zr	0.98	0.99	0.96	0.96	1.00	0.99	1.00								
Hf	0.97	0.99	0.96	0.96	1.00	0.99	1.00	1.00							
Mo	0.95	0.96	0.92	0.98	0.97	0.98	0.97	0.97	1.00						
Sn	0.98	0.93	0.89	0.95	0.96	0.95	0.97	0.96	0.93	1.00					
Tl	0.97	0.97	0.96	0.96	0.98	0.97	0.98	0.98	0.95	0.95	1.00				
Pb	0.97	0.97	0.93	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	1.00			
U	0.96	0.95	0.90	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.97	0.97	0.95	0.99	1.00		
Th	0.97	0.98	0.95	0.96	1.00	0.99	1.00	1.00	0.98	0.97	0.98	1.00	0.99	1.00	
Ce	0.98	0.96	0.95	0.95	0.97	0.96	0.97	0.97	0.93	0.97	0.98	0.96	0.95	0.97	1.00

Los patrones normalizados a los valores condriticos muestran que la saprolita y la limonita de San Felipe están similarmente enriquecidas en REE (más de 68 ppm y 50 ppm respectivamente) mientras que la coraza ferruginosa superior muestra un marcado enriquecimiento en Ce (75-98 ppm) (Aiglsperger et al 2013).

El Ce (III) podría haber sido oxidado en estos suelos hasta el altamente inmóvil Ce (IV).

El solape de los patrones de REE de varias muestras de saprolita, limonita y coraza indica un enriquecimiento bastante moderado durante el proceso de laterización.

El escandio, frecuentemente considerado un REE por sus propiedades físicas y químicas similares, presenta un contenido máximo de 61 ppm (fig. 6). Se aprecia de forma general una fuerte correlación entre el Sc y el Fe_2O_3 . Esta correlación entre los contenidos de Sc y los de Fe también ha sido encontrada en perfiles lateríticos tipo óxido y silicatos hidratados (Proenza Fernández 2015; Aiglsperger et al 2016).

De manera general se observa un enriquecimiento desde la saprolita, hacia la limonita y coraza.

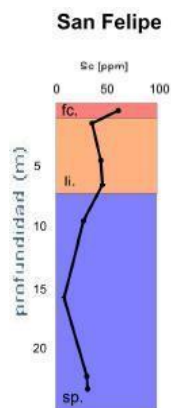


Fig. 6. Distribución de Sc dentro de los perfiles de laterita niquelífera investigados. sp. = saprolita; li. = limonita; fc. = coraza de hierro.

La fuerte correlación entre el Sc y el Fe_2O_3 para la mayoría de las muestras indica un cierto grado de movilidad del Sc durante la laterización con la subsiguiente incorporación de este elemento en los oxihidróxidos de Fe secundarios.

3.1.4 Asociación de otros elementos trazas

Finalmente, también se ha identificado un conjunto de elementos y óxidos, que se localizan en la parte superior del perfil. Estos son: Hf, Zr, Rb, Cs, Be, Ga, Nb, Ta, Mo, Sn, Ti, Pb, U, Th y Ce.

Los coeficientes de correlación lineal son todos superiores a $r=0,91$ (ver matriz en tabla III).

3.1.5 Elementos del grupo del platino (EGP)

Sólo muestras de saprolita fueron analizadas para elementos del grupo del platino (fig. 7). Los patrones de EGP normalizados a los valores condriticos tienen una morfología relativamente plana, con ligeras anomalías positivas en Ru y Pd.

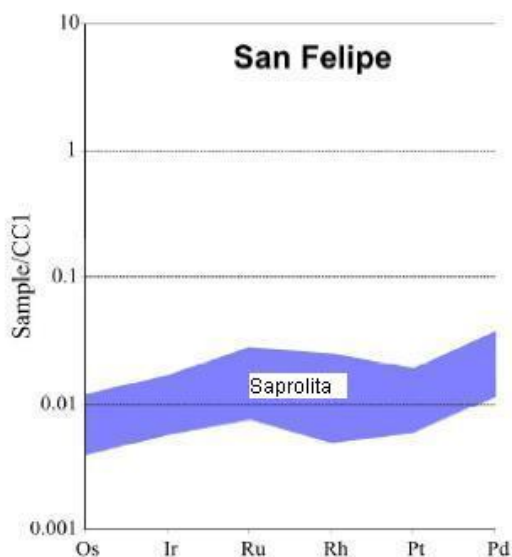


Fig. 7 Patrones de EGP normalizados a los condritos C1 de las lateritas investigadas de San Felipe. La normalización se realizó tomando los valores de Naldrett y Duke (1980).

Los valores totales más elevados de EGP (78 ppb) se obtuvieron en muestras de saprolita: (6 ppb Os, 9 ppb Ir, 19 ppb Ru, 5 ppb Rh, 19 ppb Pt, 20 ppb Pd).

De acuerdo a estudios experimentales, los procesos supergénicos pueden influenciar la redistribución de algunos EGP, especialmente Pt y Pd. Estos procesos (cambios del nivel freático, pH, Eh, actividad biógena) pudieron haber causado enriquecimiento local en los niveles superiores del perfil laterítico (Aiglsperger et al 2015).

Conclusiones

1. El depósito San Felipe se clasifica dentro del modelo laterítico-saprolítico arcilloso de depósitos de níquel supergénico, siendo su masa mineral de tipo arcilloso-silicatado.
2. La distribución del contenido de magnesio en el manto de meteorización muestra fuertes contrastes en sus diferentes horizontes, denotando una compleja estructura litológica interna con laterita (limonita) superficial y varias sub-zonas infrayacentes de saprolitas.
3. El magnesio está prácticamente lixiviado en la parte alta del perfil y las concentraciones en los horizontes superiores tienden a cero.
4. La sílice ha sido sólo parcialmente lixiviada del perfil, y el Fe_2O_3 y Al_2O_3 se concentran en la parte alta del corte, como resultado del enriquecimiento residual. El Mn y Co, que son más móviles, se concentran más abajo en el perfil, en la saprolita superior.
5. Junto con el Fe y Al se concentran muchos elementos minoritarios como el Ti, P; y trazas como el Hf, Zr, Ga, Sc y otros que pudieran ser aprovechados como producción secundaria en una futura industria.
6. Los contenidos de Sc aumentan hacia la parte alta del perfil y se correlacionan con los contenidos de Fe_2O_3 .

Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por los proyectos CGL2009-10924 y CGL2012-36263, así como por los proyectos 2009-SGR-444 y 2014-SGR-1661 de la Generalitat de Catalunya.

Referencias

- Aiglsperger, T., Proenza, J.A., Zaccarini, F., Lewis, J.F., Garuti, G., Labrador, M., Longo, F., 2015. Platinum group minerals (PGM) in the Falcondo Ni-laterite deposit, Loma Caribe peridotite (Dominican Republic). *Mineralium Deposita*, 50, 105-123.
- Aiglsperger, T., Proenza, J.A., Lewis, J.F., Labrador, M., Svojtka, M., Rojas-Purón, A., Longo, F., Ďurišová, J., 2016. Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni-laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*, 73, 127–147.
- Aiglsperger, T., Proenza, J., Lewis, J., Zaccarini, F., Garuti, G., Rojas, A., Longo, F., Chang, A. 2013. Rare Earth Elements, Scandium and Platinum Group Elements in different types of Ni-laterite profiles from the northern Caribbean: a geochemical comparison. V Convención cubana de ciencias de la tierra, 1 -- 5 Abril, La Habana, Cuba. ISSN 2307-499X.
- Bugelsky, Y.; Formell Cortina, F. 1967: Geoquímica e hidrogeoquímica de la corteza de intemperismo ferroniquelífera de Cuba. Serie Geológica No. 3. AC Cuba, 43 pp.
- Chang Rodríguez, A. 2001. Reports on distribution of chemical elements, geological controls, tectonics and morphology of San Felipe Plateau. San Felipe Mining Limited: 47p. Inédito.
- Chang Rodríguez, A. 2005. Características geólogo-geoquímicas y mineralógicas del yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe, Camagüey, Cuba. Convención cubana de ciencias de la tierra (1) (geociencias 2005). Congreso de Minería (1). Palacio de las Convenciones, Ciudad de la Habana, Cuba, 5-8 abril. (Memorias) 1, 587-601. ISBN 978-959-7117-03-7.
- Chang Rodríguez, A. 2009. Características geoquímicas del yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe, Cuba. V Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales (Cinarem). ISMM, Moa, Holguín. Memorias en CD-Rom.
- Chang Rodríguez, A. 2013. Esmeclitas nontroníticas portadoras de la mineralización niquelífera del yacimiento laterítico-saprolítico San Felipe. V Convención cubana de ciencias de la tierra, 1 -- 5 Abril, La Habana, Cuba. ISSN 2307-499X.
- Edelshtein, I. I. 1982. Contribución a la geoquímica del proceso de intemperismo de los minerales formadores de corteza en las rocas ultrabásicas. *Geoquímica*, No. 2, pp. 263-270.
- Elías, M. 2002. Nickel laterite deposits- a geological overview, resources and exploitation. University of Tasmania, Centre for Ore Deposit, Research Special Publication 4, p. 205-220.
- Formell Cortina, F. 1979. Clasificación morfogenética de las cortezas de intemperismo niquelíferas sobre las rocas ultrabásicas de Cuba. *Ciencias de la Tierra y del Espacio* 1, pp. 33–49.
- Formell Cortina, F. 2003. Diferencias en el desarrollo morfoestructural de las regiones metalogénicas exógenas de Oriente Septentrional y Camagüey Central y su influencia en la formación de las cortezas de intemperismo niquelíferas, Taller Internacional de la Geología y Minería del Níquel Cubano, TGMNI 02, V Congreso cubano de Geología y Minería, 24 – 28 marzo, Ciudad de La Habana, Cuba.
- Gallardo, T., Chang, A., Tauler, E., Proenza, J., 2010. El yacimiento San Felipe (Camaguey, Cuba): un ejemplo de lateritas niquelíferas tipo arcilla. *Macla*, v. 13, p. 87-88. ISSN 1885-7264.
- Golightly, J. P., 1981: "Nickeliferous laterite deposits". *Econ. Geol.* 75th An. Vol., pp. 710-735.
- Lavaut Copa, W. 2004. Evaluación perspectiva de las presas de rechazo de la Moa Nickel. Ponencia inédita. XV Fórum de Ciencia y Técnica, PPM-Santiago de Cuba.
- Lavaut Copa, W. 1984. Grado de estudio de los yacimientos ferroniquelíferos de la parte nororiental de Cuba y perspectivas futuras en su prospección. Ponencia inédita. Filial Santiago-Granma-Guantánamo de la SCG. Guantánamo.
- Lavaut Copa, W. 1983. Importancia de la inclusión del contenido de cobalto en las condiciones de cálculo de reservas de las menas lateríticas. Ponencia inédita. Segundo Encuentro Científico-técnico del Níquel, ISMM, Moa.
- Lavaut Copa, W. 2005. Problemática del estudio geológico de los Principales yacimientos lateríticos de Cuba Oriental. En: Memorias del I Congreso de Minería y Geología, La Habana.
- Lavaut Copa, W. 2008. Reflexiones geológicas sobre la explotación racional de las lateritas. Ponencia inédita. XII Jornada de las Geociencias, SCG-Filial Santiago de Cuba.
- Lavaut Copa, W. 2014. Retos de la Química cubana frente al desarrollo sostenible del Níquel. En: Memorias de la 21 Conferencia Internacional de Química, Santiago de Cuba.
- Lavaut Copa, W. 2001. Vías de incremento de la base de materia prima mineral para la ECRRL-Nicaró. En: Memorias del IV Congreso de Minería y Geología, La Habana.

- Marín, P. 2011. Caracterización del perfil laterítico rico en níquel de San Felipe (Cuba) y separación de fases minerales mediante caída de partículas en un fluido viscoso. Treball fi de carrera. Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. 61pp.
- Naldrett, A. J., Duke, J. M. 1980. Platinum metals in magmatic sulfide ores: Science 208: 1417-1428.
- Proenza Fernández, J.A., 2015. Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en Yacimientos Lateríticos. Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla, 20, 1-7, ISSN 1885-7264.
- Tauler, E., Proenza, J., Galí, S., Lewis, J., Labrador, M., García, E., Suarez, M., Longo, F., Bloise, G., 2009. Ni-sepiolite-falcondite in garnierite mineralization from the falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic. Clay Minerals, 44, 435-454.
- Tauler, E.; et al. 2011. Caracterización Mineralógica de las Esmectitas Niquelíferas del Yacimiento de San Felipe (Camagüey, Cuba). Revista de la sociedad española de mineralogía, macla No. 15, pp. 89-90. ISSN 1885-7264.

Acerca de los autores:

Alfonso Chang-Rodríguez: Máster en Ciencias geológicas desde 2002, obtenido en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Ingeniero geoquímico, graduado de la Universidad Estatal de L'vov, Ucrania. Especialista "A" en geología en la Empresa Geominera Camagüey. Profesor Auxiliar de la Universidad Camagüey. Investigador Auxiliar del IGP y CIPIMM.

Esperanza Tauler: Doctora en Ciencias, obtenido en España. Profesora del Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, España.

Waldo Damián Lavaut-Copa: Doctor en Ciencias Geológicas desde 1987, obtenido en Rusia. Especialista geólogo en el Instituto de Geología y Paleontología.

Arturo Luis Rojas-Purón: Doctor en Ciencias Geológicas desde 1993, obtenido en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Profesor Auxiliar en la Facultad de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Joaquín Antonio Proenza-Hernández: Doctor en Ciencias Geológicas desde 1997, obtenido en España. Profesor Titular del Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, España.