XVIII Congreso Peruano de Geología

EL ATLAS GEOQUÍMICO DEL PERÚ Y SU RELEVANCIA EN EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL PAÍS

Luis VARGAS RODRÍGUEZ[1], Jorge CHIRA FERNÁNDEZ[2], Paul AGUILAR JULCA[3] y César DE LA CRUZ POMA[4]

[1] Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, Perú (lvargasr@ingemmet.gob.pe)
[2] Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, Perú (jchira@ingemmet.gob.pe)
[3] Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, Perú (paguilarj@ingemmet.gob.pe)
[4] Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, Perú (cdelacruz@ingemmet.gob.pe)

1. Introducción

En el año 2000 el INGEMMET inició la elaboración del Atlas Geoquímico del Perú, a partir de la información geoquímica de sedimentos de corriente, cuya primera versión fue culminada en el año 2015. Los objetivos trazados en el desarrollo de dicha versión fueron:

- ✓ Contribuir en el conocimiento geoquímico regional del territorio nacional, a partir del estudio de los sedimentos activos de corriente, mediante metodologías estandarizadas, formales y consistentes.
- ✓ Determinar los valores de fondo, umbrales, anomalías y patrones de distribución geoquímica secundaria de los principales elementos traza en sedimentos activos de corriente, en base a dominios geológicos regionales y su relación metalogenética.
- ✓ Identificar las principales asociaciones geoquímicas, producto de la dispersión geoquímica secundaria.
- ✓ Contar a nivel nacional con una base de datos geoquímica oportuna y de calidad, que coadyuve al desarrollo de nuevas investigaciones multidisciplinarias en el Perú.

El Atlas Geoquímico del Perú posee información de 22928 muestras de sedimentos fluviales, las cuales ofrecen concentraciones de 18 a 53 elementos químicos, entre los que destacan el Au, Ag, Cu, Mo, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni, V y Hg. Dicha información es de libre acceso desde el siguiente vínculo web: http://geocatminapp.ingemmet.gob.pe/apps/geocatmin/.

2. Contexto Geológico

A partir del mapa geológico del Perú a escala 1:1 000 000 se definieron quince ambientes de formación y litologías (Cuadro 1), en base a criterios litoestratigráficos y cronoestratigráficos, complementados con la tipología de las facies dominantes en cada contexto geológico regional (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 1995 y León et al., 2000). La discriminación de ambientes de formación y litologías permitió caracterizar el contexto geológico regional por el cual se dispersan los sedimentos fluviales, a fin de contrastar las abundancias geoquímicas de los principales elementos traza presentes en las redes hidrográficas.

Cuadro 1. Dominios geológicos a escala 1:1 000 000.

Nº	Ambiente de formación y litologías
1	Depósitos cuaternarios.
2	Volcánicos del Cuaternario.
3	Intrusivos del Paleógeno-Neógeno.
4	Sedimentarios continentales del Paleógeno-Neógeno.
5	Sedimentarios marinos del Paleógeno-Neógeno.
6	Volcánicos sedimentarios del Paleógeno-Neógeno.
7	Intrusivos del Mesozoico.
8	Sedimentarios continentales del Mesozoico.
9	Volcánicos sedimentarios del Mesozoico.

10	Sedimentarios marinos y continentales del Mesozoico.
11	Volcánicos sedimentarios del Paleozoico.
12	Sedimentarios continentales del Paleozoico.
13	Sedimentarios marinos del Paleozoico.
14	Metamórficos del Proterozoico-Paleozoico.
15	Intrusivos del Proterozoico-Paleozoico.

3. Metodología de trabajo

A lo largo de los dieciséis años que duró el desarrollo de la primera versión del Atlas Geoquímico del Perú, se siguieron estrictos protocolos de diseño de muestreo geoquímico, recolección de muestras, aseguramiento y control de la calidad, análisis químicos y procesamiento estadístico de la información obtenida (Chira et al., 2012). Dichos procedimientos corresponden a las diferentes etapas de los estudios geoquímicos realizados, los cuales se caracterizaron por haberse mantenido uniformes a lo largo del tiempo, a fin de evitar resultados discrepantes.

3.1. Diseño de muestreo geoquímico

Corresponde a un diseño de muestreo sistemático, con una densidad a escala regional, es decir una muestra por cada 10 Km^2 de área de influencia, en la cual se consideró el patrón de drenaje y las características geomorfológicas de la superficie a muestrear.

3.2. Registro de la información de campo

Para tal fin se empleó una ficha de campo estandarizada en la cual se consignó información relevante sobre la ubicación de la muestra, entorno geológico regional, naturaleza, grado de mineralización y alteración de los sedimentos de corriente. Así mismo se tomaron lecturas de los principales parámetros fisicoquímicos del agua superficial, para dicho propósito se emplearon equipos de medición portátil de última generación.

3.3. Muestreo geoquímico

Se realizó de acuerdo al instructivo de muestreo de sedimentos del sistema de gestión de calidad del INGEMMET. Los sedimentos activos de corriente fueron recolectados a malla -30, en drenajes de primer a quinto orden, manteniendo la representatividad y proporcionalidad de su distribución en el cauce fluvial.

3.4. Análisis químicos

Fue analizada la fracción granulométrica menor a 74 µm (malla -200), empleándose una digestión de "agua regia" más ICP-MS (determinación multielemental); mientras que para la cuantificación del oro, se aplicó el ensayo al fuego y la espectroscopía de absorción atómica (AAS).

3.5. Aseguramiento y control de la calidad

Este componente constituye uno de los principales pilares de los estudios geoquímicos a cargo del INGEMMET, es así que fueron considerados como parámetros de calidad la precisión, exactitud y ausencia de contaminación. Para tal fin se utilizaron tres tipos de muestras de control: duplicados, estándares y blancos.

3.6. Base de datos

Provee información de 32 a 53 elementos químicos en los 22928 registros, la cual se encuentra a libre disponibilidad en el sistema de información geográfica GEOCATMIN, accesible desde el siguiente *link*: http://geocatminapp.ingemmet.gob.pe/apps/geocatmin/.

4. Análisis y procesamiento estadístico de la información geoquímica

En esta etapa se exploró la estructura de los datos geoquímicos haciendo uso de los fundamentos estadísticos, los cuales se dividieron en tres niveles: univariado, bivariado y multivariado (Vargas et al., 2008).

4.1. Determinación de poblaciones estadísticas

Las poblaciones estadísticas se definieron mediante criterios lito-cronológicos, es así que dichas poblaciones estadísticas corresponden a los ambientes de formación y litologías presentados en el Cuadro 1.

4.2. Niveles de fondo y umbrales geoquímicos

Los cálculos se basaron en los estadígrafos de tendencia central y de dispersión, según el ambiente de formación y litologías (Cuadro 2).

Cuadro 2. Niveles de fondo y umbrales geoquímicos de Au, Ag y Cu en sedimentos.

Ambientes litoestratigráficos	Au (ppm)		Ag (ppm)		Cu (ppm)	
	B	T	B	T	B	T
Intrusivos del Paleógeno-Neógeno.	10.9	137	0.3	0.8	42.2	135
Volcánicos sedimentarios del Paleógeno-Neógeno.	8.5	97.6	0.3	0.9	26.1	73.9
Intrusivos del Mesozoico.	*	49	*	0.5	23.4	101
Volcánicos sedimentarios del Mesozoico.	10.1	76.3	0.2	0.8	55.6	143
Volcánicos sedimentarios del Paleozoico.	9	91.5	0.1	0.3	29.8	158
Metamórficos del Proterozoico-Paleozoico.	10.1	50	0.2	0.5	37	82.7
Intrusivos del Proterozoico-Paleozoico.	34.7	138	0.2	0.8	19.9	53.4

B: Background. T: Threshold. (*): Más del 90% de datos por debajo del límite de detección inferior.

A partir de los niveles de fondo y umbrales geoquímicos obtenidos en los diferentes ambientes litoestratigráficos (Cuadro 2), se determinaron los valores globales del nivel de fondo y el umbral geoquímico de los elementos traza, considerando para ello las frecuencias relativas en cada uno de los ambientes antes mencionados.

En el oro se determinó un nivel de fondo global de 10 ppb y un umbral geoquímico global igual a 81 ppb; para el caso de la plata, el nivel de fondo global es del orden de 0.2 ppm y el umbral geoquímico global es 0.8 ppm. El cobre posee un nivel de fondo global de 28 ppm y un umbral geoquímico global de 84 ppm.

5. Dispersión geoquímica secundaria

A continuación se describen los principales contrastes regionales y anomalías geoquímicas de oro y cobre, definidos a partir de la caracterización de los sedimentos de corriente del Orógeno Peruano.

5.1. Dispersión geoquímica secundaria del oro

La dispersión geoquímica secundaria del oro en el Orógeno Peruano denota importantes anomalías auríferas, específicamente en las cuencas de los ríos Pachachaca, Cotaruse y Apurímac (Figura 1). Dichas anomalías definen un intervalo de 83 ppb a 5330 ppb, relacionado a la franja de epitermales de Au-Ag hospedados en rocas sedimentarias y la franja de pórfidos-skarn de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe relacionados con intrusivos del Eoceno-Oligoceno. Es importante mencionar que en este contexto se sitúan los epitermales de oro de baja sulfuración de Santa Rosa y Selene.

En la franja de pórfidos de Cu-Mo (Au), skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con intrusivos del Mioceno, específicamente en la naciente del río Chillón (límite entre los departamentos de Lima y Junín), se define un importante contraste de oro, donde la máxima concentración de este metal es del orden de 1067 ppb. A este contexto pertenece el epitermal de baja sulfuración Coricancha (Au).

El río Tablachaca se ubica en el límite de los departamentos de Ancash y La Libertad (Figura 1), dicho drenaje pone de manifiesto anomalías de oro que van de 90 ppb a más de 5000 ppb, asociadas a tres franjas metalogenéticas: franja de pórfidos de Cu-Mo (Au), skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con intrusivos del Mioceno; franja de epitermales de Au-Ag hospedados en rocas volcánicas; y la franja de depósitos de W-Mo-Cu relacionados con intrusivos del Mioceno superior.

Al norte del Perú, en el río Marañón (límite entre Cajamarca y Amazonas), a siete kilómetros aguas abajo de la confluencia con el río Chumuch se evidenció una anomalía de oro mayor a 5000 ppb, esta anomalía guarda correspondencia con los placeres auríferos presentes en el río Marañón.

Similar situación ocurre en el río Chinchipe, a once kilómetros al sureste de la frontera Perú (Cajamarca)-Ecuador, en dicho sector se registra una anomalía superior a 5000 ppb, también relacionada a placeres auríferos (Figura 1).

5.2. Dispersión geoquímica secundaria del cobre

La máxima concentración de cobre en los sedimentos de corriente del Orógeno Peruano se ubica en la naciente del río Tablachaca (quebrada Pelagatos), correspondiente a la provincia de Pallasca en el departamento de Ancash. Dicho contenido metálico es mayor a 10000 ppm (1%) y se circunscribe a la franja de pórfidos de Cu-Mo (Au), skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con intrusivos del Mioceno.

A 62 Km al norte del lago Titicaca, en el curso superior del río Crucero (quebrada Huancarane del departamento de Puno), se determinó el segundo máximo contenido de cobre (8894 ppm). Dicha anomalía pertenece a la franja de depósitos de Sn-Cu-W relacionados con intrusivos del Oligoceno-Mioceno y epitermales de Ag-Pb-Zn (Au).

Una muestra de sedimentos de corriente ubicada a un kilómetro al oeste del prospecto Pashpap (pórfido Cu-Mo), determinó una anomalía de 7786 ppm de cobre, cuyo halo de dispersión es del orden de 10 Km. Dicho halo de dispersión se desarrolló en la quebrada Bronce, afluente del río Santa (departamento de Ancash) y llega a su fin con una concentración de 453.6 ppm de cobre. El contexto metalogenético de esta anomalía corresponde a la franja de pórfidos de Cu-Mo (Au), skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con intrusivos del Mioceno.

La costa del departamento de Arequipa denota 29 anomalías de cobre que definen un rango de 85.6 ppm a 589 ppm, dichos contenidos anómalos se localizan en la franja de depósitos de Au-Pb-Zn-Cu relacionados con intrusivos del Cretáceo superior.

Los pórfidos de cobre-oro Utupara, Antilla y Los Chancas definen un importante clúster minero, situado en la subcuenca del río Antabamba, dichos depósitos constituyen la fuente de 17 anomalías de cobre en sedimentos de corriente, cuyas concentraciones oscilan entre 88.3 ppm y 965 ppm.

6. Mapas de dispersión geoquímica secundaria

La distribución espacial de las muestras recolectadas y la dinámica de los procesos fluviales permitieron representar la dispersión geoquímica secundaria en los sedimentos de corriente, a través de mapas isovalóricos. Dichos mapas han sido elaborados mediante métodos geoestadísticos, tomando en cuenta la sensibilidad de los análisis químicos, las distancias de muestreo y la tipología de las distribuciones estadísticas.

Considerando lo anteriormente mencionado se generaron superficies de estimación ponderada (mapas isovalóricos), denominadas mapas de dispersión geoquímica, los que resaltan las tendencias de distribución geoquímica y sus contrastes regionales a lo largo del Orógeno Peruano, tal como se muestra en el mapa de oro adjunto (Figura 1).

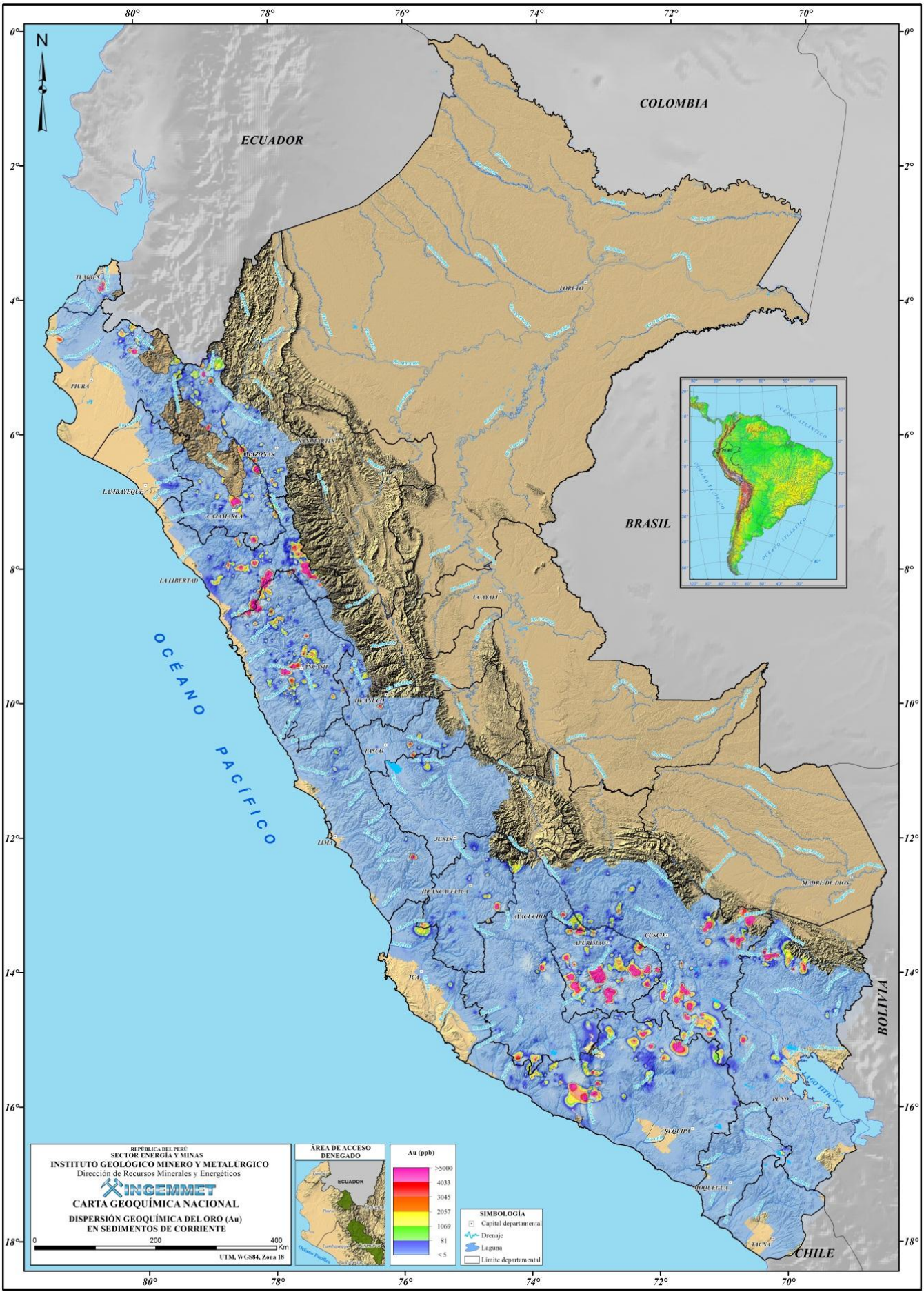

Figura 1. Dispersión geoquímica del oro en sedimentos de corriente.

7. Conclusiones

- El Atlas Geoquímico del Perú contribuye al desarrollo sostenible del Perú a través de cuatro ejes de crecimiento:
  - ✓ **Económico,** mediante la identificación de nuevos targets de exploración y áreas de no admisión de petitorios, los que a futuro podrían convertirse en operaciones mineras, generando importes por derechos de vigencia y penalidad, canon minero, regalías, fuentes de trabajo directo e indirecto, entre los más importantes.
  - ✓ **Ambiental**, a través del aporte de información oportuna, confiable y de calidad a las líneas de base geoambiental.
  - ✓ **Social,** gracias a la libre accesibilidad y transparencia de la información geoquímica generada.
  - ✓ **Socioambiental,** mediante la caracterización de la calidad química de los sedimentos fluviales, contribuyendo así en la resolución y prevención de conflictos socioambientales.
- El Atlas Geoquímico del Perú constituye un instrumento de gestión para la prospección minera, líneas base geoambiental, geología médica, agricultura, procesos de zonificación ecológica económica y ordenamiento territorial.
- La gestión moderna de los recursos naturales requiere del conocimiento geológico, en particular de información geoquímica actualizada y confiable de las cuencas hidrográficas.
- La dispersión geoquímica secundaria del oro en el Orógeno Peruano demuestra que las principales anomalías de este metal en sedimentos de corriente, se ubican en las cuencas de los ríos Pachachaca, Cotaruse y Apurímac. Dichas anomalías ocurren en un contexto metalogenético de epitermales de Au-Ag, pórfidos-skarn de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe. Así mismo, es importante mencionar los contrastes auríferos presentes en el río Tablachaca, asociados principalmente a dominios metalogenéticos de tipo pórfido Cu-Mo (Au) y epitermales de Au-Ag. Además de los halos dispersión aurífera (dispersión geoquímica secundaria) observados en los ríos Marañón y Chinchipe, asociados a depósitos tipo placer.
- La máxima concentración de cobre en sedimentos de corriente se determinó en la naciente del río Tablachaca (quebrada Pelagatos), correspondiente a la provincia de Pallasca en el departamento de Ancash. Dicho contenido metálico es mayor a 10000 ppm (>1%) y se circunscribe a la franja de pórfidos de Cu-Mo (Au), skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con intrusivos del Mioceno.
- Existen regiones del país donde no ha sido posible realizar los trabajos geoquímicos de campo, debido a la oposición recalcitrante de determinados actores sociales, que no conciben que el desarrollo sostenible de su región va de la mano con el conocimiento geológico de su territorio. Es el caso de las provincias de Chota, Cutervo, Jaén, Hualgayoc y San Ignacio en Cajamarca y las provincias de Huancabamba y Ayabaca ubicadas en Piura, por lo que se espera que en algún momento se den las condiciones para cubrir el área faltante.
- Es evidente que la actualización del Atlas Geoquímico del Perú corresponde a una actividad permanente y dinámica, por lo que se tiene previsto la publicación de nuevas versiones, las cuales incluirán información y estudios de otras matrices de muestreo complementarias, es el caso de rocas, aguas, suelos, entre otros.

Agradecimientos

Mg. Ing. Hugo Rivera Mantilla, por ser el principal gestor e impulsor de lo que hoy es El Atlas Geoquímico del Perú.

Ing. Manuel Paz Maidana y Dr. Humberto Chirif Rivera, por su apoyo y soporte a la continuidad de esta investigación.

A las decenas de geólogos que participaron de los estudios de prospección geoquímica regional en los últimos dieciséis años.

Para todos ellos, nuestro reconocimiento y agradecimiento por su invalorable aporte.

Referencias

Chira, J.E., Vargas, L.E., Vásquez, R.L., Palomino, C.G. 2012. Prospección geoquímica regional al norte del paralelo 8°00' sur, cuencas de la vertiente atlántica. Boletín. Serie B: Geología Económica, n. 28, 130 p.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.1995. Geología del Perú. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n. 55, 161p.

León, W., Palacios, O., Vargas, L. & Sánchez, A.W. 2000. Memoria explicativa del mapa geológico del Perú, Escala 1:1000 000. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n. 136, 73p.

Vargas, L.E., Chira, J.E. & Chero, D.R. 2008. Caracterización de la dispersión y distribución geoquímica del Hf, Nb, Ni, Zr y V en sedimentos activos de la cuenca Huaura – Lima. En: Congreso Peruano de Geología, 14, Congreso Latinoamericano de Geología, 13, Lima, PE, 20 setiembre - 3 octubre 2008, Resúmenes. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2008, 7 p.