



Atributos morfosedimentarios y uso de la tierra en la concentración de metales pesados en la cuenca del río Aroa, Venezuela

Morphosedimentary attributes and land use in the concentration of heavy metals in the Aroa River basin, Venezuela

Orlando José Cabrera Viña¹

¹ Universidad Central de Venezuela, Facultad de Humanidades y Educación, Escuela de Geografía, Laboratorio de Geomorfología y Suelos, Caracas – Venezuela
e-mail: orlando.cabrera@ucv.ve; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8587-832X>

Claudinei Tabora da Silveira²

² Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Geografia, Laboratório de Pesquisas Aplicadas Geomorfologia e Geotecnologia (LAGEO) - Curitiba – Paraná
e-mail: claudineits@ufpr.br; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6289-6306>

Resumen

La geomorfología estudia la configuración del espacio natural sobre el cual el hombre desarrolla o prevé usar la tierra. El objetivo principal fue determinar la relación entre los atributos morfosedimentarios fluviales con la concentración de metales pesados (MP) presentes en la cuenca del río Aroa, con énfasis en las características granulométricas de los sedimentos de fondo del río. Para ello, fue necesario caracterizar las condiciones geológicas, geomorfológicas y de uso de la tierra de la cuenca del río Aroa que favorecen la presencia de metales pesados (MP) en los sedimentos del fondo. En la mayoría de las áreas muestreadas el uso de la tierra tiene poca relevancia en las concentraciones MP, a excepción del cadmio, vanadio y níquel. Este estudio sirve como herramienta para la exploración minera en medios aluvionales, lo que reduciría significativamente el impacto ambiental.

Palabras-clave: Geomorfología, taxonomía de relieve; geoquímica, análisis multivariado.

Abstract

Geomorphology studies the natural space configuration on which man develops or plans to use the land. The main objective was to determine the relationship between fluvial morphosedimentary attributes with the concentration of heavy metals (HM) present in the Aroa River basin, with emphasis on the granulometric characteristics of the river bottom sediments. To do this, it was necessary to characterize the geological, geomorphological and land use conditions of the Aroa River basin that favor the presence of heavy metals in the bottom sediments. In most of the sampled areas, land use has little relevance to HM concentrations, with the exception of cadmium, vanadium and nickel. This study serves as a tool for mining exploration in alluvial environments, which would significantly reduce the environmental impact.

Keywords: Geomorphology, relief taxonomy; geochemistry, multivariate analysis.



1 Introducción

La aplicación de estudios geomorfológicos es cada vez más útil en la vida cotidiana, desde la planificación ambiental, agrícola y urbana. Para Blaszczynski (1997), la capacidad de analizar y cuantificar la morfología de la superficie de la tierra es esencial para la comprensión de los procesos físicos, químicos y biológicos en diversidad de escenarios comunes. Según Moresco (2012), el conocimiento más profundo de los procesos geomorfológicos (naturaleza, origen) y de los agentes involucrados (clima, tipo de suelo, ocupación) se han tornado esenciales para elaborar diagnósticos, especialmente cuando se refieren a la ocupación antrópica. De acuerdo con Bishop *et al* (2012), la cartografía geomorfológica desempeña un papel fundamental en la comprensión de los mecanismos de la superficie terrestre, recursos naturales, amenazas naturales y evolución del paisaje.

En este caso, la motivación para este estudio surge de la necesidad de predefinir y optimizar el uso de los recursos disponibles para definir áreas con mayor potencial de concentración de elementos químicos potencialmente contaminantes. Como hipótesis se plantea que las características morfosedimentarias de los canales fluviales inciden directamente en la retención de metales pesados. El objetivo del trabajo fue determinar la relación de los atributos morfosedimentarios de los canales fluviales con la concentración de metales pesados presentes en los sedimentos de fondo del río Aroa. Para cumplir este objetivo, el estudio inicia con la caracterización de la cuenca del río Aroa y de la clasificación de los tipos de canales según la metodología de Rogen (1994), con el debido análisis granulométrico de cada sitio, en los que Cuenca (2017), muestreo la concentración de MP.

En tal sentido, se cartografiaron las características geológicas e interpretaron los rasgos geomorfológicos de las áreas de captación de influencia directa de los sitios, en los que Cuenca (2017), colectó las muestras de sedimentos para determinar las concentraciones de cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), vanadio (V) y zinc (Zn). Basado en ello, fue posible estudiar las variaciones espaciales de las concentraciones de metales pesados en la cuenca del río Aroa e identificar las relaciones con los atributos morfosedimentarios de los canales fluviales. De igual manera se clasificó la cobertura vegetal y uso de la tierra de la cuenca con el resultado que el 48% de la cuenca alta se corresponde con bosque natural y la cuenca media y baja posee un 12% de bosque riverero y 40% restante de áreas agropecuarias.

Para correlacionar las relaciones entre los atributos geomorfológicos con la retención de metales pesados, se optó por aplicar técnicas estadísticas multivariadas de Análisis de Correspondencias (AC) y

Análisis de Componentes Principales (ACP), los cuales fueron utilizadas de dos maneras, en el primer caso para determinar las posibles relaciones entre las características geomorfológicas de las fuentes y las cantidades de metales pesados en los sedimentos de fondo del río y, en la segunda corrida se empleó para identificar la correlación de los tipos de canales fluviales y sus características granulométricas con las concentraciones de estos elementos químicos.

La importancia de este trabajo radica en que puede ser usado en la determinación de concentraciones de elementos químicos potencialmente contaminantes en áreas fluviales con poca disponibilidad de información. De igual manera, este tipo de estudio constituye una herramienta aplicada a la exploración de minerales metálicos en medios aluvionales, lo que reduciría significativamente el impacto ambiental que genera la minería, así como los efectos sociales derivados de las actividades extractivas en los lechos fluviales, siendo relevante para el manejo y planificación del uso de la tierra en las cuencas hidrográficas.

2 Materiales y Métodos

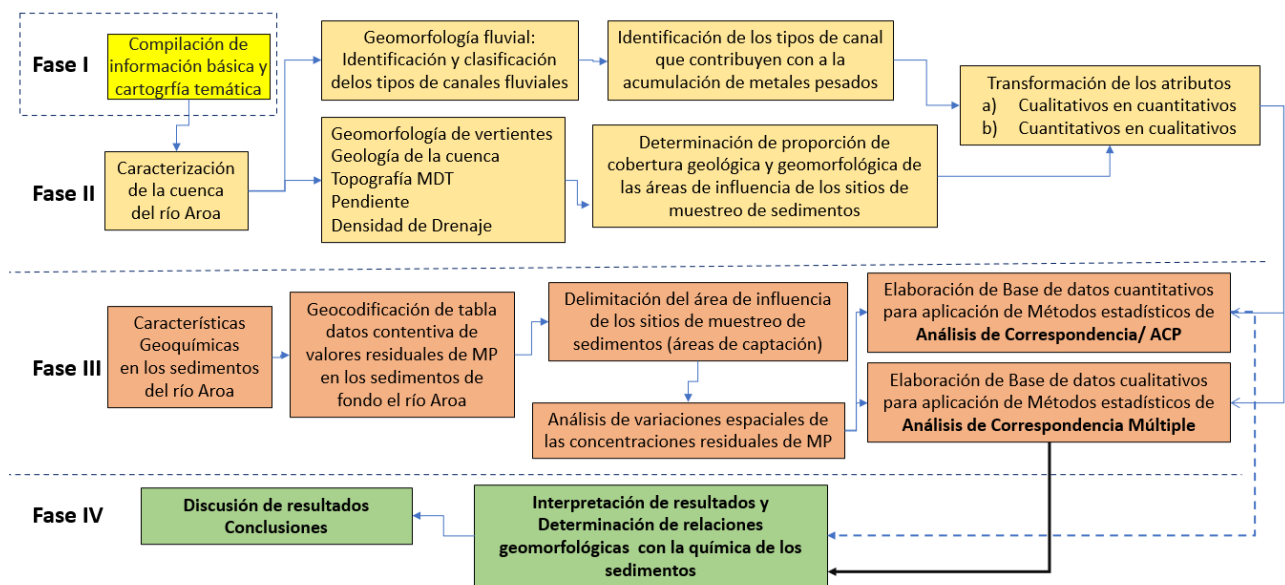
Entre los materiales empleados en el desarrollo de esta investigación, destaca el trabajo de Cuenca (2017), quien realizó el estudio de la distribución de metales pesados contenidos en los sedimentos de fondo del río Aroa, a fin de establecer las relaciones inter- elementares y así determinar el grado de contaminación que esas especies geoquímicas ofrecen, todo ello con el cálculo de parámetros como el Factor de Enriquecimiento (FE) y el Índice de Geoacumulación (Igeo). Para ello, Cuenca (2017) utilizó el proceso de extracción química secuencial certificada, siguiendo la metodología del Gabinete de Referencia de la Comunidad Europea (BCR), cuyos resultados se indican en el Cuadro 1. Con el empleo de estos datos se efectuaron los análisis comparativos presentados en esta investigación.

Cuadro 1 – Concentraciones residuales de metales pesados, expresado en (mg/kg)

Muestras	Norte	Este	Pb	Cd	Cr	Zn	Ni	Mn	Cu	V	Fe
PH-001	1141770	488446	14	7,5	34,6	83,8	49	78	24,8	7,1	25.348
PH-002	1143402	500810	13	7,9	8,9	76,7	35	69	28,2	5,2	26.155
PH-003	1152519	501441	11	6,5	9,3	72,8	30	80	24,3	6,3	22.759
PH-012	1160804	508751	8	5,5	17,8	65,4	30	91	22,7	9,1	13.922
PH-013	1160993	508590	9	6,9	10,6	114,9	31	72	24,4	7	19.848
PH-015	1150109	513760	9	7,1	18,9	78,3	35	115	36,6	12,4	24.222
PH-018	1161954	512974	10	7,2	10,8	79,9	29	88	46,3	6,6	24.813
PH-020	1167799	541028	-2,5	4,3	29,9	69,5	16	125	14,8	23,8	15.265
PH-026	1168033	528533	-2,5	5,9	18,5	49,6	19	101	25,99	14,3	21.344
PH-028	1168458	529667	-2,5	7,5	54,5	58,4	29	158	41,4	43	24.700
PH-029	1173003	534608	3	5,9	25,7	114,9	29	110	28,3	19,8	21.590
PH-030	1171532	535938	-2,5	5,7	49,7	57,4	26	129	24,5	34,9	20.078
PH-034	1162391	516215	4	5	10,1	52,6	20	74	19,2	9,1	18.624
PH-037	1174771	554794	3	4,6	12,3	51,3	19	71	24,6	8,8	17.429

Fuente: Cuenca (2017).

Las fases de desarrollo de este estudio y concatenamiento de procesos que conforman la metodología, está representado resumidamente en la Figura 1.

Figura 1 – Flujograma operacional

Fuente: Propia de los autores.

El proceso investigativo se inicia con la articulación del basamento teórico y metodológico para abordar el tema de estudio, en este sentido fue efectuada una revisión de la literatura referente a los estudios geomorfológicos utilizados en la determinación de las concentraciones de contaminantes en ríos, en los que destaca el trabajo binacional realizado entre Canadá y Estados Unidos con el uso del Modelo SPARROW (Saad *et al*, 2018), en los cuales hacen énfasis en la contribución de Rogsen (1994), por ello, constituye una referencia fundamental en la clasificación de los canales fluviales. De igual manera, este estudio combina los métodos de Rogsen (1994) y Zinck (2012) a fin de reforzar la clasificación taxonómica del relieve como factor que incide en la concentración de metales pesados.

La segunda fase consistió en el levantamiento de datos secundarios para la confección de la cartografía temática correspondiente a la caracterización físico natural del área y en el ploteo de los puntos de muestreo empleados por Cuenca (2017), a partir de lo cual, se delimitaron las áreas inmediatas de captación del escurrimiento superficial, a fin de contabilizar tanto la proporción de área cubierta por cada grupo litológico, como de cada unidad geomorfológica con incidencia directa en los sitios de muestreo. De esta manera, se conformó la base de datos con los parámetros físico naturales de las microcuencas de influencia inmediata a los puntos de muestreo, lo que permitió observar las variaciones en las concentraciones de elementos químicos y sus relaciones con el entorno.

La caracterización litológica fue elaborada a partir de la compilación de los estudios de Urbani *et al* (2015) y Jaimes (2011) a escala 1: 25.000, los trabajos de la Creole Petroleum Corporation (1962), Cartas del Grupo C6 a escala de 1: 50.000. La composición mineral de cada formación geológica, fue obtenida de los estudios de Urbani *et al* (2015) y del Léxico Estratigráfico de Venezuela (1997).

Los parámetros morfométricos de la cuenca y de los ríos se extrajeron del modelo digital de elevación (MDE), construido con el uso de las curvas de nivel de las 36 cartas topográficas a escala 1: 25.000 del Servicio de Cartografía Nacional de Venezuela que abarcan la cuenca del río Aroa, las cuales se vectorizaron con el empleo del software ArcGis 10.7. Posteriormente, se procedió a la transformación de los atributos geológicos y morfológicos, de datos cualitativos a datos cuantitativos con la finalidad de estructurar la matriz de conjuntos de datos estandarizados usada en el proceso estadístico de Análisis de Correspondencias (AC) y Análisis de Componentes Principales (ACP).

La tercera fase consistió en la determinación de las variaciones espaciales de metales pesados contenidos en los sedimentos de fondo del río Aroa, para ello, se graficaron sus concentraciones residuales a fin de conocer el comportamiento de los elementos químicos en la cuenca de acuerdo con las características de los canales fluviales del valle del río Aroa.

En la cuarta fase se procedió al levantamiento en campo de las características geomorfológicas y sedimentarias de los lechos fluviales, mediante la colecta de muestras para su posterior procesamiento en laboratorio. La etapa de campo permitió identificar las características de los canales de acuerdo con la metodología de Rogsen (1994), en la que los tipos de canales fluviales son diferenciados de base a la conjunción de criterios de pendiente, sinuosidad del canal, geometría transversal y materiales del lecho. Seguidamente, posterior al procesamiento en laboratorio de las muestras de sedimentos, mediante pesado, secado, tamizado y medición de los pesos retenidos en cada tamiz, se procedió al análisis granulométrico con el uso de GRADISTAT V6 (Blott, 2008).

En la quinta fase se elaboraron las tablas de datos para efectuar el Análisis de Correspondencia y Análisis de Componentes Principales con el empleo del Software R, versión 4.0.4 (2021-02-15). The R Foundation for Statistical Computing. "Lost Library Book". Copyright (C) 2021. Seguidamente, se procedió a la generación de gráficos que facilitan la interpretación de los resultados estadísticos de correspondencias inter – elementares, su distribución espacial y las relaciones que los atributos morfosedimentarios de los canales, tienen con la concentración de metales pesados en los sedimentos de fondo del río Aroa.

Así como también, se observó el papel de la geología como factor de control de la concentración de elementos químicos contenidos en los sedimentos de fondo del río Aroa. Finalmente, se plantean las discusiones y conclusiones.

3 Localización y caracterización general del área de estudio

La cuenca del Aroa se localiza entre la fachada costera de la depresión de Yaracuy y el macizo de Aroa al noroeste de Venezuela; posee una superficie aproximada de 2.294 km² y se ubica entre las coordenadas geográficas 10° 12' 47" y 10° 52' 48" de Latitud Norte y, 68° 15' 47" y 69° 10'44" de Longitud Oeste. (Figura 2).

Figura 2 – Localización del área de Estudio



Fuente: Elaborada por los autores con el uso de QGIS 3.34.2-1.

Geológicamente, la cuenca del río Aroa está constituida por el Complejo Yaritagua del Proterozoico, ubicado en el flanco sureste y descrito por Bellizzia y Rodríguez (1968), como una unidad de esquito cuarzo-micáceo, anfibolítico granatífero y algunos afloramientos de esquito con glaucofánico y mármol. Posteriormente, Bellizzia y Rodríguez (1972) agregan la presencia de gneis porfiroblástico, augengneis, esquito cuarzo-micáceo, esquito cuarzo-feldespático-clorítico, gneis, esquito biotítico, anfibolítico granatífero, cuarcitas y una porción menor de glaucofánico y mármol. Mientras que, al sureste, la Formación Nirgua del jurásico, tiene varios tipos litológicos, tales como: cuarzo esquito - micáceo, micáceo - grafitoso, mármol macizo, anfibolita eclogítica, anfibolita epidótica y granatífera, cuarcita, esquito, cuarzo - gneis micáceo - feldespático (Bellizzia y Rodríguez, 1967).

Al sur, sureste y noroeste, la propia Formación Aroa del Cretáceo tardío, exhibe un predominio de esquistos feldespáticos grafitosos y calcáreos, filitas grafitosas, esquistos cuarzo micáceos-grafitosos, calcáreos laminados, calcáreos sólidos y varios horizontes de esquistos verdes. Estos últimos exhiben una mineralogía de zoisita, clinozoisita, epidoto, feldespato, actinolita, clorita, calcita y cuarzo (Bellizzia y Rodríguez, 1969).

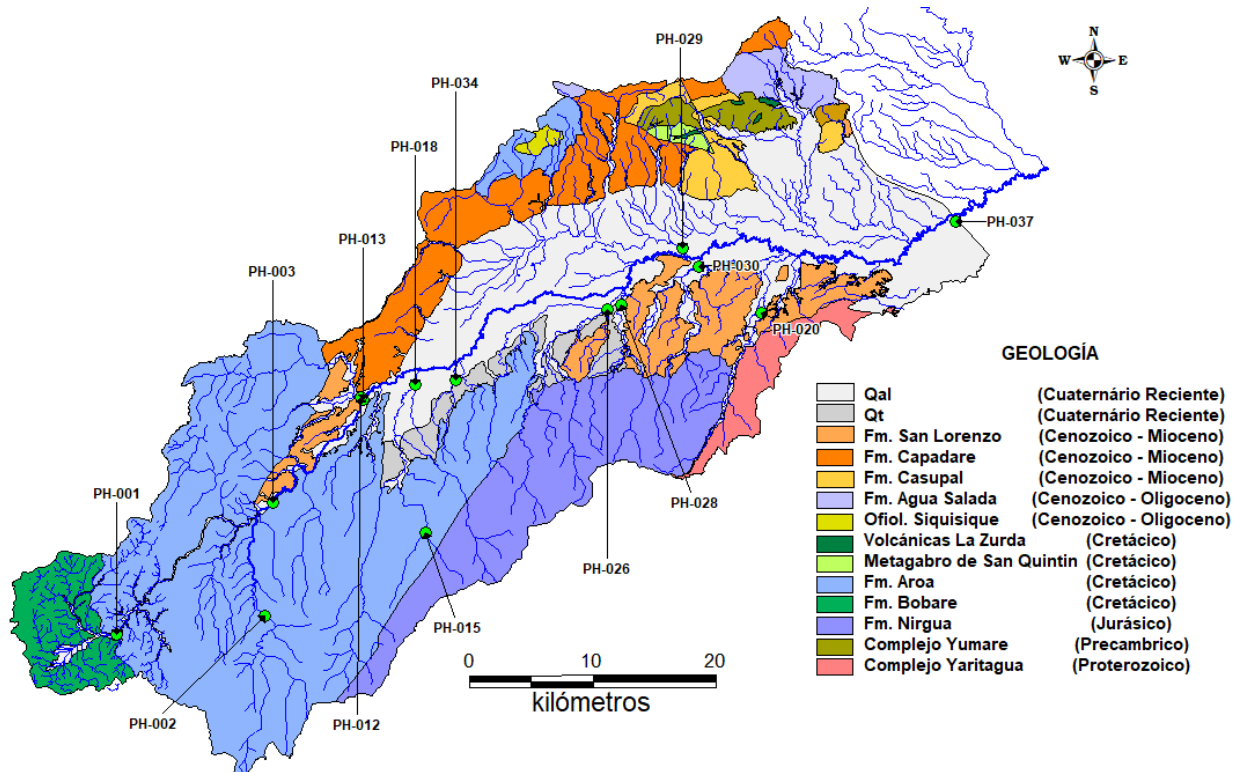
Al norte y noreste, en los alrededores de Yumare, predominan las rocas sedimentarias de la Formación Capadare, compuesta por caliza arrecifal. En algunos trechos dominan las areniscas limosas cuarzo-micáceas, intercaladas con calizas y la formación Casupal, caracterizada por la presencia de areniscas de grano fino con material carbonáceo (Urbani et al, 2015).

Al noreste existe una porción de rocas volcánicas de los miembros La Zurda y San Quintín de Cretáceo (Urbani et al, 2015). En el resto del valle está recubierto de sedimentos cuaternarios de

granulometría variable desde bloques gruesos, cantos gruesos, gravas gruesas a finas, hasta hallar arenas gruesas, medias finas y muy finas (Figura 3). En general, el área está dividida en dos grandes sectores geológicos bien diferenciados, las montañas de Yumare al norte con predominio de rocas sedimentarias con intrusiones de metagabros de la Formación La Zurda, las volcánicas de San Quintín y por el complejo ofiolítico de Siquisique.

En este sentido, el modelaje de esas montañas tiende a ser más onduladas en los sectores de areniscas, mientras que, en las áreas cubiertas de calizas el relieve tiende a formar crestas tubulares, principalmente al nordeste. En contraste, las montañas de Yaritagua-Aroa- Nirgua, en el flanco sur-sureste, con predominio de esquistos, tienden a desarrollar relieves más escarpados con una definición marcada de laderas cóncavas y convexas.

Figura 3: Geología del área de estudio y sitios de muestreo



Fuente: Compilación de Urbani *et al* (2015) y USGS (2015).

Geomorfológicamente, la cuenca del Aroa se inserta en la porción noroeste de la macroforma estructural denominada Cordillera de la Costa en Venezuela, correspondiente al primer taxon del sistema de clasificación de Zinck (2012), equivalente a la Provincia Fisiográfica de la Cordillera de la Costa del

Caribe en escala pequeña 1:4.000.000. La individualización de la unidad morfoescultural (2^{do} taxon) identificada como Región Natural es la Serranía del Interior, cartas topográficas escala 1:250.000. Posteriormente, el 3^{er} taxon corresponde al paisaje geomorfológico reconocido en las cartas 1:100.000, destacando las montañas de Aroa, Yaritagua, Nirgua, el piedemonte, el valle del río Aroa y las planicies (Figura 4).

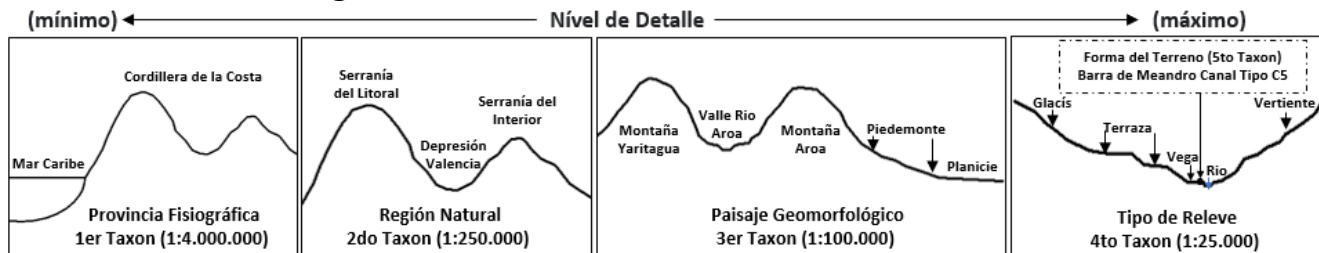
Figura 4 – Elementos del paisaje de la cuenca del río Aroa.



Fuente: Propia de los autores.

El 4^{to} taxon, identificado a partir de las cartas topográficas a escala 1:25.000 corresponden a los tipos de relieve, incluidos en esta categoría as formas de crestas, vertientes, colinas, glacis, llanura fluvial y llanura costera (Figura 5). La discriminación de los tipos de vertientes fue realizada de acuerdo a las categorías propuestas por Fijimoto *et al* (2011, p.1876), en vertientes: cóncavas, convexas o rectilíneas, con el mapa geomorfológico, fue determinada la proporción que cada forma del terreno cubre en las áreas de captación inmediatas para cada sitio de muestreo de sedimento, todo con el propósito de conocer los tipos de geformas predominantes y su relación con las concentraciones de metales pesados en los sedimentos de fondo del río Aroa. En relación con la clasificación de los canales fluviales, utilizando la metodología de Rogsen, (1994) adaptada al sistema de Zinck (2012), se corresponden con 5to taxon que define la forma del terreno (Figura 5).

Figura 5 – Taxonomía del relieve de la cuenca del río Aroa.



Fuente: Modificado de Zinck (2012).

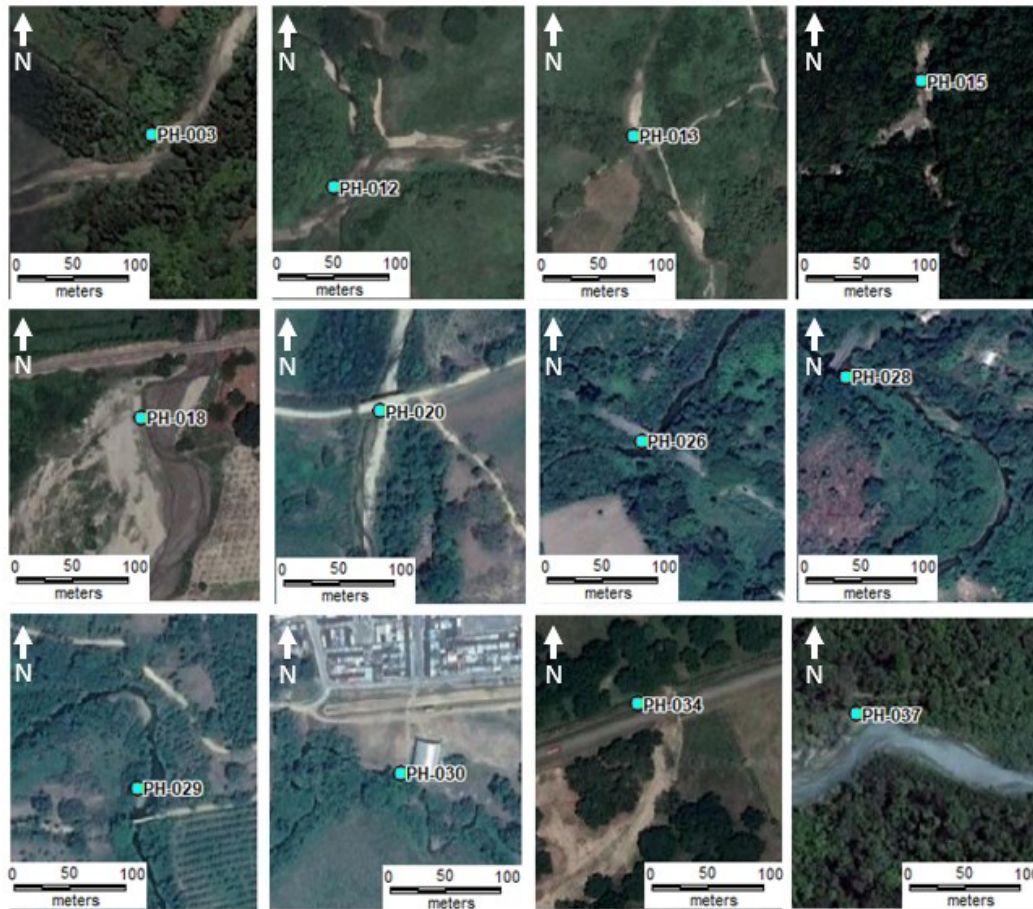
Este marco geológico y geomorfológico define un patrón de drenaje fundamentalmente dendrítico que ejerce gran influencia en el modelaje del relieve. En el río Aroa se distinguen dos tipos de drenaje: el principal dendrítico en los paisajes montañosos con algunos sectores de drenaje lineal controlados por las estructuras geológicas que después se tornan en canales meándricos a medida que la declividad topográfica de la planicie aluvial regula la geometría de las formas fluviales.

4 Resultados

De acuerdo con el objetivo principal del trabajo, se clasificaron los tipos de canales en los que Cuenca (2017), extrajo las muestras de sedimento de fondo del río Aroa para realizar las determinaciones de metales pesados, en este caso la metodología propuesta por Rogsen (1994), requiere conocer tanto la composición granulométrica de los sedimentos de fondo del canal (Cuadro 2), así como de la identificación de las características topográficas del río, tanto en perfil como en planta. El trabajo de campo permitió

ajustar, validar y corregir la clasificación de canales previamente efectuada mediante el uso e interpretación de imágenes satelitales, conforme se indica en las Figuras 6 y 7.

Figura 6 - Sitios de muestreo y tipos de canales según sistema de Rogsen (1994).



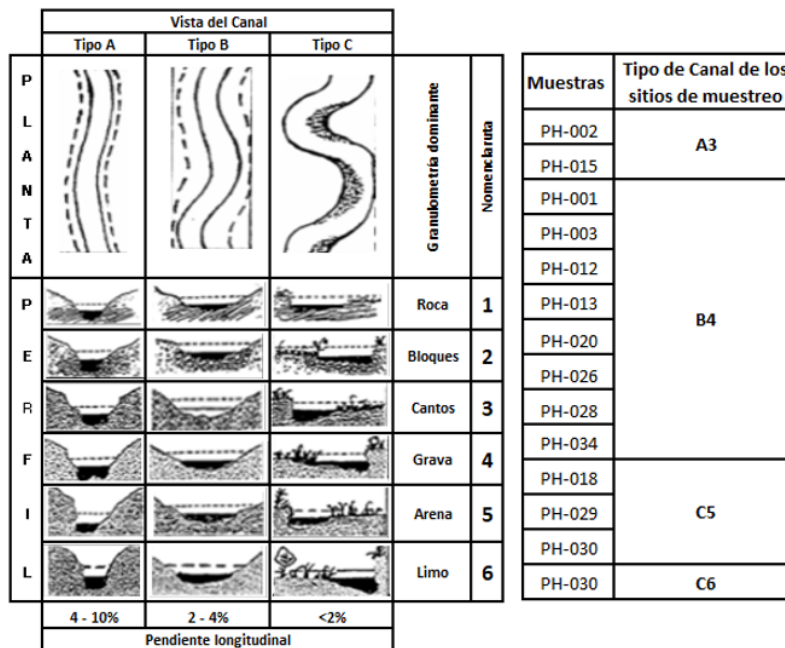
Fuente: Interpretación de imágenes y chequeo de campo de los autores.

Cuadro 2 – Distribución de la fracción granulométrica de los sedimentos de fondo en los sitios de muestreo

Muestras	Grava Muy Gruesa	Grava Gruesa	Grava Media	Grava Fina	Grava Muy Fina	Arena Gruesa	Arena Media	Arena Fina	Arena Muy Fina
PH-001	16,2%	14,6%	11,4%	0,0%	16,3%	16,7%	12,8%	4,3%	1,8%
PH-002	33,9%	14,8%	9,3%	0,0%	11,9%	11,4%	10,8%	5,7%	2,2%
PH-003	24,2%	15,3%	12,4%	0,0%	14,8%	18,1%	10,2%	3,6%	1,4%
PH-012	23,9%	12,9%	5,5%	0,0%	16,2%	16,7%	12,6%	11,0%	1,2%
PH-013	25,7%	13,8%	18,2%	0,0%	15,9%	16,7%	8,0%	1,7%	0,0%
PH-015	37,9%	15,4%	9,4%	0,0%	13,0%	14,3%	5,2%	3,7%	1,1%
PH-018	3,5%	11,5%	19,9%	22,6%	20,8%	16,8%	3,3%	1,2%	0,5%
PH-020	0,0%	0,0%	11,4%	31,2%	26,8%	26,8%	2,5%	0,8%	0,5%
PH-026	23,5%	18,1%	12,2%	0,0%	12,0%	15,8%	11,6%	3,3%	3,5%
PH-028	21,3%	15,1%	11,2%	0,0%	14,2%	16,2%	11,2%	4,0%	6,8%
PH-029	5,60%	10,2%	9,4%	0,0%	8,7%	26,4%	15,6%	12,9%	11,2%
PH-030	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11,8%	13,6%	10,1%	19,7%	44,8%
PH-034	20,3%	14,8%	11,7%	0,0%	14,2%	10,5%	16,3%	7,8%	4,4%
PH-037	0,0%	0,0%	0,0%	5,6%	13,1%	14,2%	12,8%	21,6%	32,7%

Fuente: Propia de los autores.

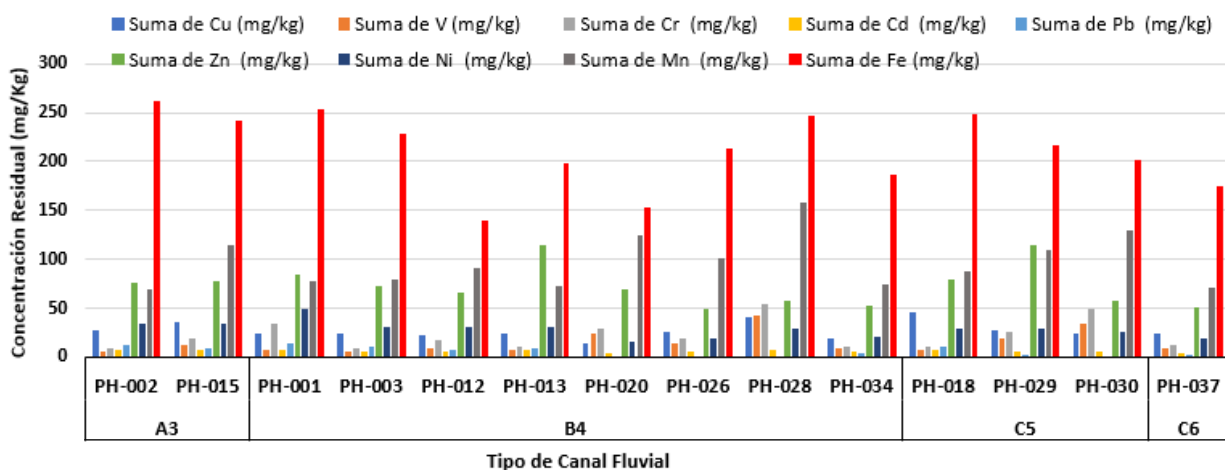
Figura 7 – Tipos de canales en los sitios de muestreo según clasificación de Rogen



Fuente: Elaboración propia Modificado de Rogen, (1994).

En el Gráfico 1, se observan los valores de metales pesados residuales de acuerdo con el tipo de canal, en el que se destacan las concentraciones de cobre, manganeso y zinc en todos los sitios de muestreo, con especial atención para los canales Tipo A3, B4 y C5 que exhiben altas concentraciones de esos elementos. El caso del hierro (disminuidos sus valores entre 100 puntos para efectos del gráfico), presenta una alta concentración en todas las muestras de sedimentos por lo que no es un buen indicador de variabilidad y correspondencia con el tipo de canal.

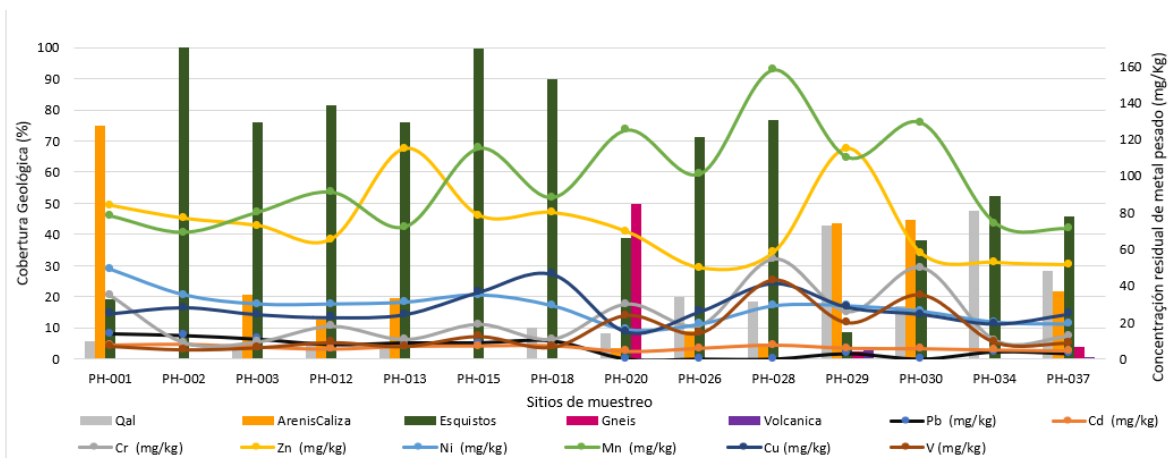
Gráfico 1 – Tipo de canales de los sitios de muestreo y concentraciones residuales de metales pesados en el río Aroa



Fuente: Propia de los autores.

En concordancia con la tipología de canales y contenido de elementos químicos, es importante destacar la relación e influencia de la distribución granulométrica de los sedimentos de fondo en la que los canales tipo A3, B4 y C5 de lecho de granos gruesos que varían desde gravas muy gruesas hasta arenas gruesas y medias, son los que exhiben las mayores concentraciones de metales pesados. De igual manera, la influencia de las rocas expuestas en el área de estudio, donde los esquistos de las formaciones Aroa y Nirgua tienen fuerte relación con las concentraciones observadas de Mn, Zinc y Cu, al igual que ocurre con los gneis del Complejo Yaritagua Gráfico 2.

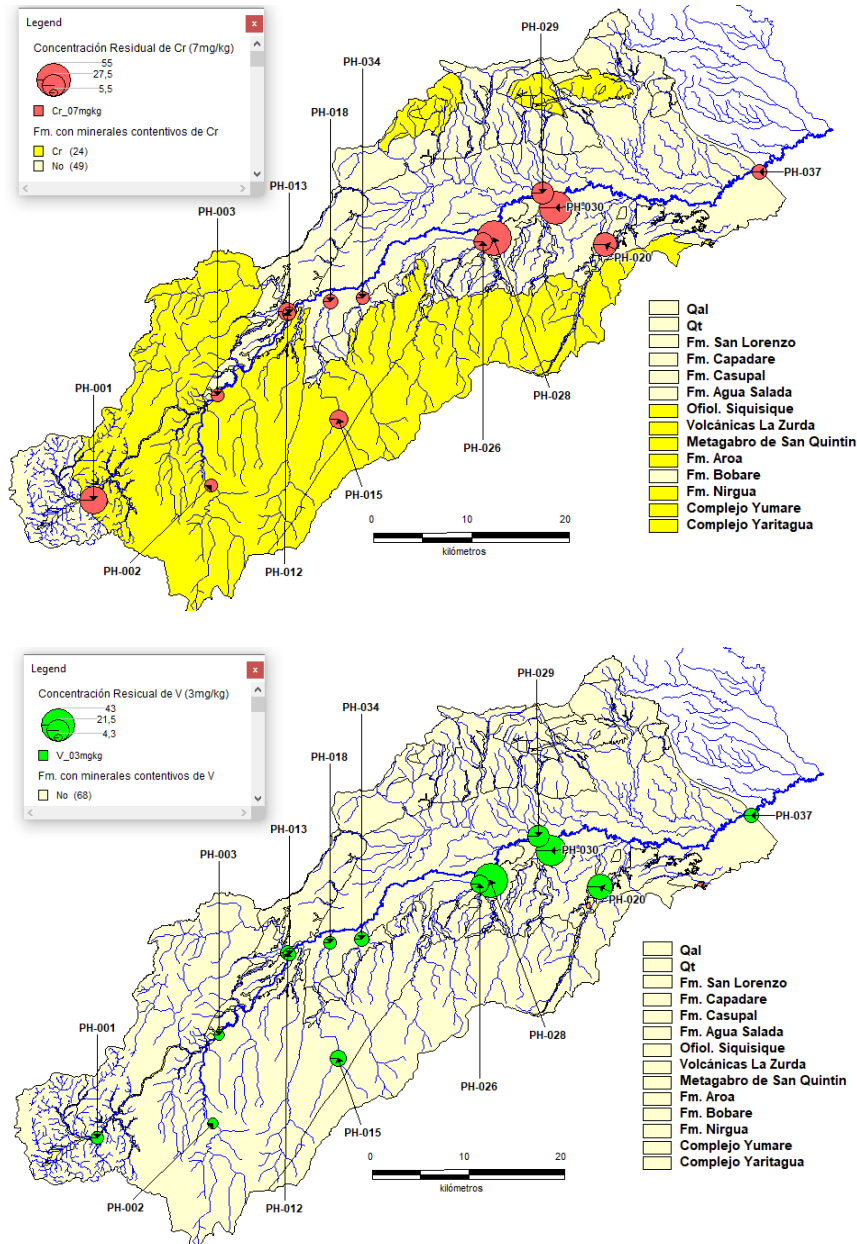
Gráfico 2 – Litología predominante en las áreas de captación directa de los sitios de muestreo y concentraciones residuales de metales pesados



Fuente: Propia de los autores.

En cuanto a la variación espacial de las concentraciones residuales de metales pesados, se destaca la presencia de un núcleo con alta concentración de cromo y vanadio y de manganeso y plomo (Figura 8), lo que demuestra la existencia de una buena relación interelemental entre estos tres metales, o sea, la abundancia de los tres es proporcional en los sitios de muestreo PH-026, PH-028, PH-029, PH-030, en los que predominan los tipos de canales C5 y B4.

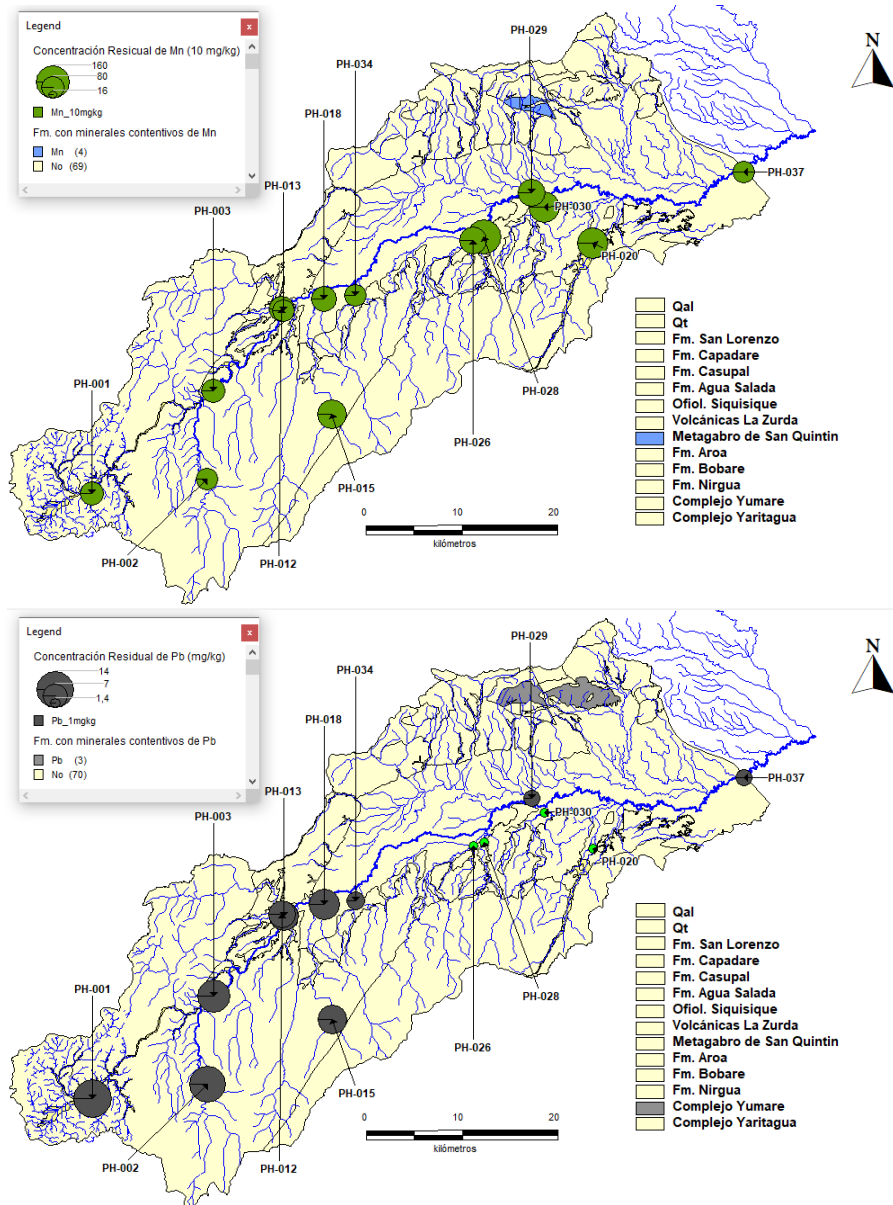
Figura 8 – Variación de cromo (Cr) y de vanadio (V)



Fuente: Con base a las características geológicas (Urbani *et al* (2015) y las concentraciones de metales pesados de Cuenca (2017).

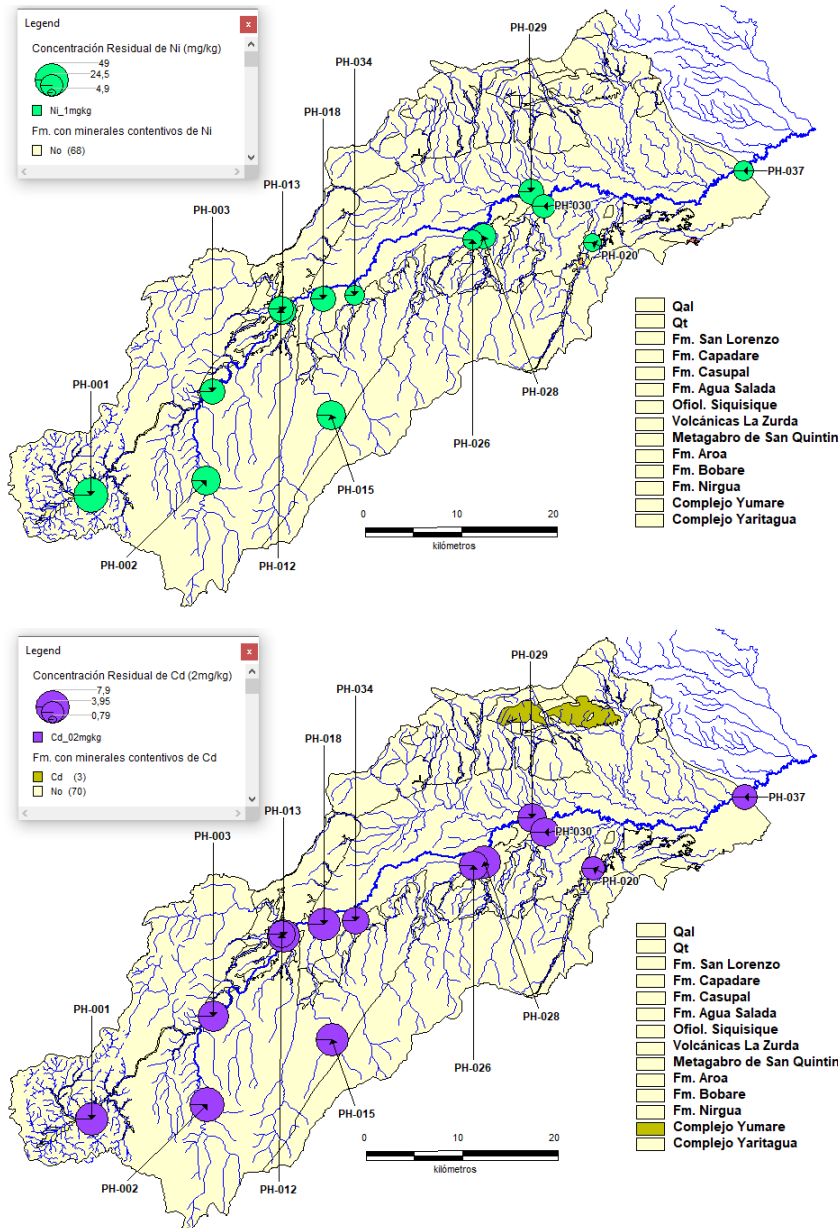
Por otro lado, existe una excelente relación espacial entre las concentraciones de plomo, níquel y cadmio, con las mayores cantidades de esos elementos químicos hacia el sur de la cuenca del río Aroa, entre los sitios de muestreo PH-001, PH-002 y PH-003, donde los tipos de canal predominantes son A3 e B4, mientras que las concentraciones de estos elementos disminuyen hacia a cuenca baja entre los sitios PH-026, PH-028, PH-029, PH-030 y PH-037, con formas de canal del tipo B4, C5 y C6. (Figuras 9 y 10).

Figura 9 – Variación del manganeso (Mn) y del plomo (Pb)



Fuente: Con base a las características geológicas (Urbani *et al* (2015) y las concentraciones de metales pesados de Cuenca (2017)

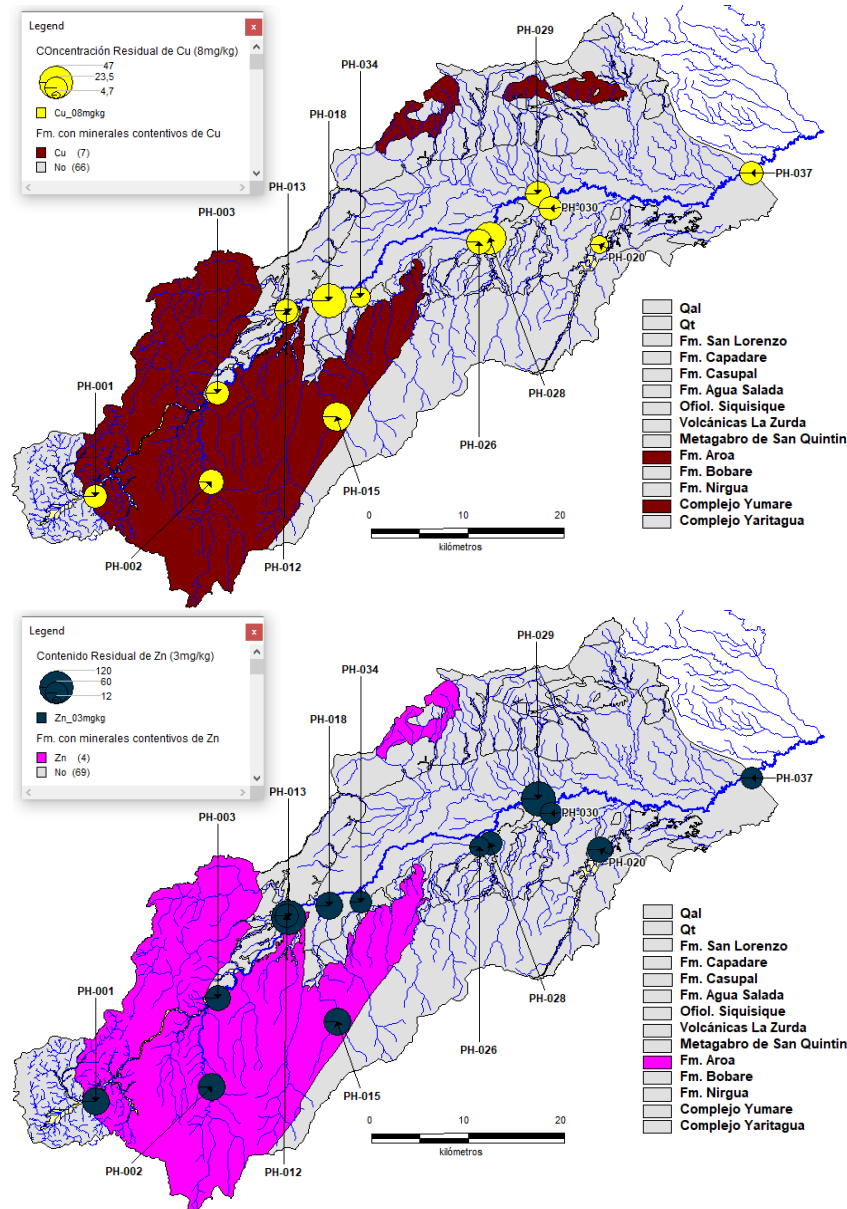
Figura 10 – Variación del níquel (Ni) y del cadmio (Cd)



Fuente: Con base a las características geológicas (Urbani *et al* (2015) y las concentraciones de metales pesados de Cuenca (2017).

De igual manera, entre el cobre y el zinc se observa relación en la distribución espacial de las concentraciones de estos metales en la cuenca del río Aroa, entre los sitios de muestreo PH-015, PH-018 y PH-028, donde los tipos de canal predominantes son A3 y B4. (Figura 11).

Figura 11: Variación del cobre (Cu) y del zinc (Zn)



Fuente: Con base a las características geológicas (Urbani *et al* (2015) y las concentraciones de metales pesados de Cuenca (2017).

La composición granulométrica de los sedimentos en la cuenca del río Aroa, evidencia correspondencia entre el tamaño de grano y la proximidad a la fuente de partículas sedimentarias, es decir; a mayor altitud, pendiente y tipología de canal A y B, los granos más abundantes exhiben los mayores diámetros, coincidente con la presencia de metales como el cromo, níquel, plomo y cadmio; en cambio, las texturas finas asociadas a cromo y vanadio.

Existe relación entre la distribución granulométrica y la concentración de especies geoquímicas, las cuales conforman tres asociaciones inter-elementales que forman grupos entre los metales Cr – V- Mn, Ni -Cd – Pb y Cu – Zn, cuyos patrones coinciden con los grupos texturales predominantes, así como con la tipología de canal A3, B4 y C5. Con los datos texturales de los sedimentos y las concentraciones residuales de metales pesados, se procedió al cálculo de las relaciones de correspondencias con el empleo de métodos estadísticos. En este sentido, los atributos cuantitativos relativos a la forma de canal, fueron codificados y transformados en datos cuantitativos (Cuadro 3) y así aplicar los métodos multivariados de Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Correspondencias (AC).

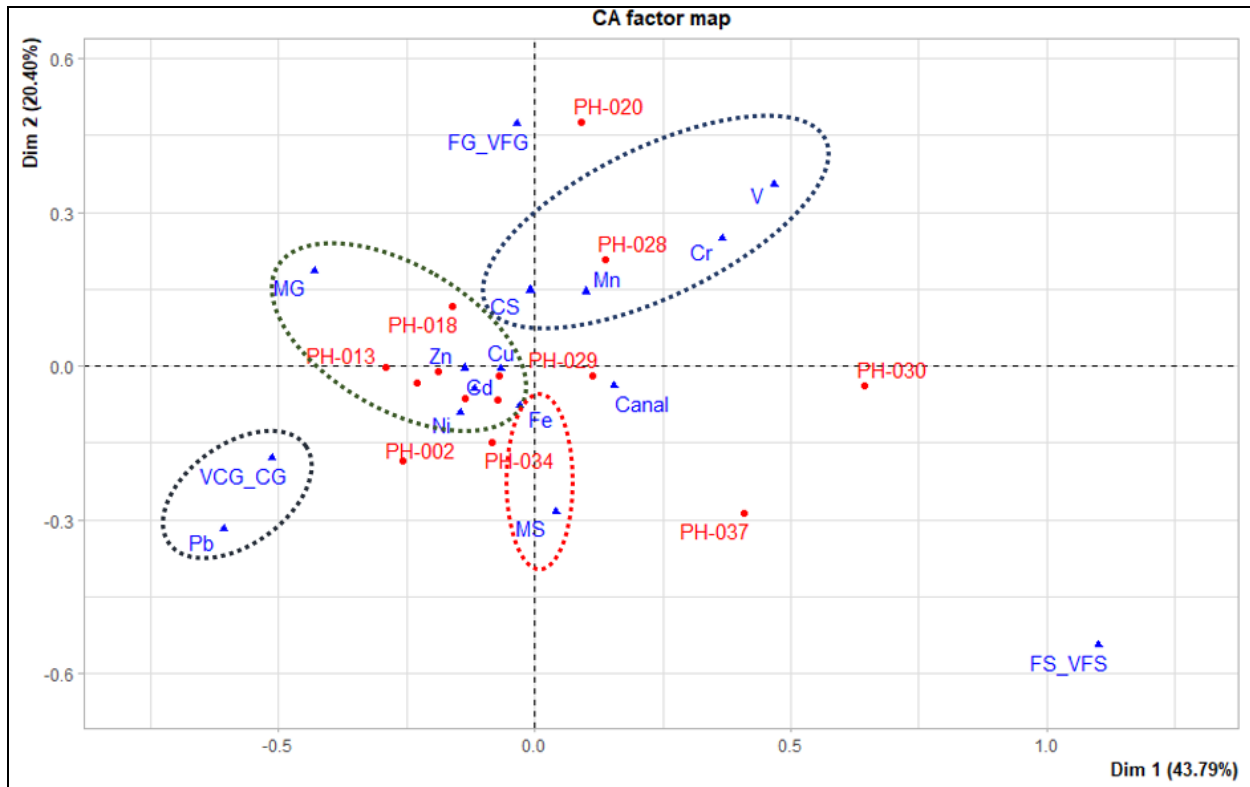
Cuadro 3 – Matriz de datos empleada en el análisis multivariado

Muestras	Contenido residual de metales pesados								Canal	Codigo Canal	Fracción granulométrica de los sitio de muestreo								Altitud	
	Pb	Cd	Cr	Zn	Ni	Mn	Cu	V			V COARSE GRAVEL	COARSE GRAVEL	MEDIUM GRAVEL	FINE GRAVEL	V FINE GRAVEL	COARSE SAND	MEDIUM SAND	FINE SAND		V FINE SAND
PH-001	14	7,5	34,6	83,8	49	78	24,8	7,1	B4	24	16,2%	14,6%	11,4%	0,0%	16,3%	16,7%	12,8%	4,3%	1,8%	600
PH-002	13	7,9	8,9	76,7	35	69	28,2	5,2	A3	13	33,9%	14,8%	9,3%	0,0%	11,9%	11,4%	10,8%	5,7%	2,2%	520
PH-003	11	6,5	9,3	72,8	30	80	24,3	6,3	B4	24	24,2%	15,3%	12,4%	0,0%	14,8%	18,1%	10,2%	3,6%	1,4%	306
PH-012	8	5,5	17,8	65,4	30	91	22,7	9,1	B4	24	23,9%	12,9%	5,5%	0,0%	16,2%	16,7%	12,6%	11,0%	1,2%	157
PH-013	9	6,9	10,6	114,9	31	72	24,4	7	B4	24	25,7%	13,8%	18,2%	0,0%	15,9%	16,7%	8,0%	1,7%	0,0%	158
PH-015	9	7,1	18,9	78,3	35	115	36,6	12	A3	13	37,9%	15,4%	9,4%	0,0%	13,0%	14,3%	5,2%	3,7%	1,1%	350
PH-018	10	7,2	10,8	79,9	29	88	46,3	6,6	C5	35	3,5%	11,5%	19,9%	22,6%	20,8%	16,8%	3,3%	1,2%	0,5%	138
PH-020	-2,5	4,3	29,9	69,5	16	125	14,8	24	B4	24	0,0%	0,0%	11,4%	31,2%	26,8%	26,8%	2,5%	0,8%	0,5%	60
PH-026	-2,5	5,9	18,5	49,6	19	101	26	14	B4	24	23,5%	18,1%	12,2%	0,0%	12,0%	15,8%	11,6%	3,3%	3,5%	77
PH-028	-2,5	7,5	54,5	58,4	29	158	41,4	43	B4	24	21,3%	15,1%	11,2%	0,0%	14,2%	16,2%	11,2%	4,0%	6,8%	87
PH-029	3	5,9	25,7	114,9	29	110	28,3	20	C5	35	5,60%	10,2%	9,4%	0,0%	8,7%	26,4%	15,6%	12,9%	11,2%	51
PH-030	-2,5	5,7	49,7	57,4	26	129	24,5	35	C5	35	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11,8%	13,6%	10,1%	19,7%	44,8%	54
PH-034	4	5	10,1	52,6	20	74	19,2	9,1	B4	24	20,3%	14,8%	11,7%	0,0%	14,2%	10,5%	16,3%	7,8%	4,4%	126
PH-037	3	4,6	12,3	51,3	19	71	24,6	8,8	C6	36	0,0%	0,0%	0,0%	5,6%	13,1%	14,2%	12,8%	21,6%	32,7%	31

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de correspondencias (Gráfico 3), se observa correlación entre el tipo de fracción granulométrica y las concentraciones residuales de metales pesados. En este sentido, los sedimentos predominantemente de gravas muy gruesas (VCG) y gravas gruesas (CG) exhiben correspondencia con la presencia de plomo (Pb), mientras que el grupo conformado por el cadmio (Cd), níquel (Ni), cobre (Cu) y zinc (Zn) muestran vinculación con las gravas medias (MG). En este mismo orden de ideas, las arenas gruesas (CS) tienen correspondencia con el grupo de metales con alta relación inter-elemental conformado por el grupo del manganeso (Mn), cromo (Cr) y vanadio (V) y las texturas de arenas gruesas y las arenas medias (MS), tienen estrecha relación con la presencia de hierro (Fe). Cabe destacar que la proporción residual de hierro es alta en todos los sitios de muestreo en comparación con las cantidades determinadas en los otros metales.

Gráfico 3 – Resultado del Análisis de Correspondencias.



Fuente: Propia de los autores.

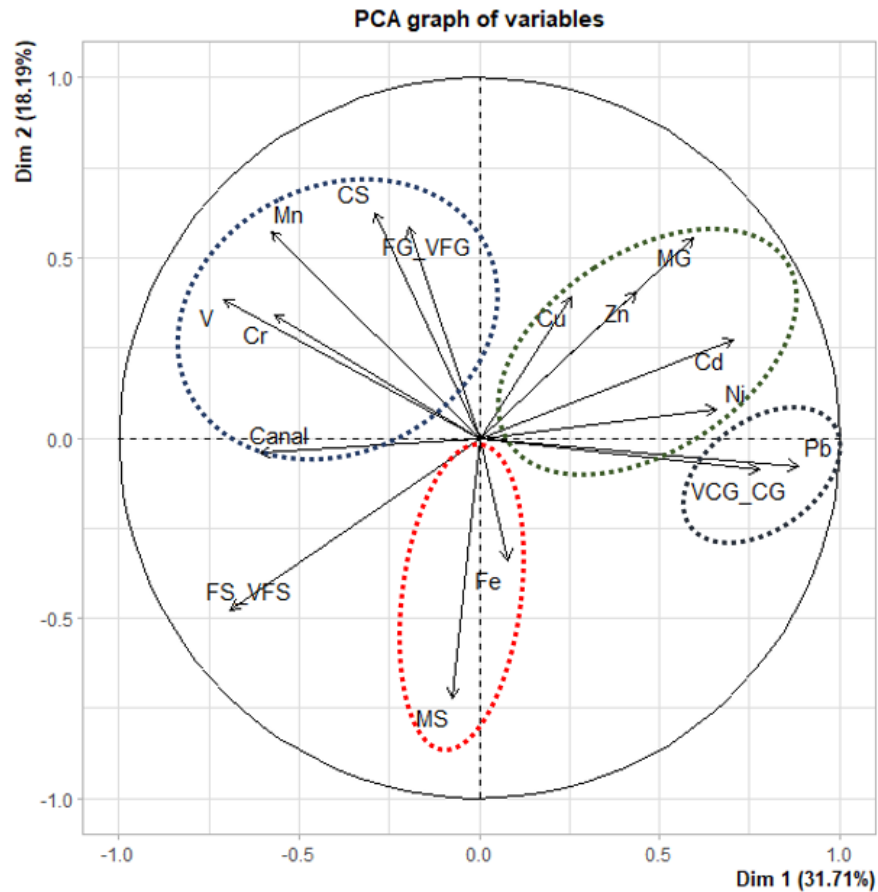
Los resultados de aplicar el análisis de componentes principales, evidencian semejanzas entre la distribución de metales pesados y la forma de los canales fluviales con sus respectivas granulometrías. De mismo modo evidencia las mismas relaciones inter elementales entre los grupos de metales pesados (Gráfico 4) obtenidos en el AC.

En cuanto a relación entre el tipo de canal y las cantidades residuales de metales determinados en los sedimentos de fondo del río Aroa, se observa que en los canales Tipo B4, C5 y C6, existen las mayores concentraciones de estos elementos, con una leve disminución en los canales Tipo A3. Las diferencias en los niveles residuales de esos elementos químicos no son atribuibles a la simple forma del canal, la conjugación de otros factores como la cobertura geológica predominante en el área de captación y muestreo, así como las formas de relieve dominantes en el área de influencia inmediata.

No obstante, los resultados sugieren que existe un patrón de canal que favorece una mayor retención de metales pesados en los sedimentos del río. En este particular, es importante destacar que, en ambos métodos de determinación de relaciones multivariadas, existe correlación entre los atributos

granulométricos que las formas de canales fluviales poseen con los hallazgos de metales pesados determinados por Cuenca (2017).

Gráfico 4 – Resultado del Análisis de Componentes Principales.



Fuente: Propia de los autores.

Los resultados obtenidos indican el predominio que existe entre la composición mineralógica de los litotipos expuestos en la cuenca del río Aroa y las mayores concentraciones residuales de metales pesados hallados en los sedimentos de fondo del río. Sin embargo, se destaca la presencia de especies geoquímicas que no se corresponden con la mineralogía de los cuerpos litológicos del área, lo cual debe ser adjudicado a las prácticas de uso de la tierra en la cuenca, tal es el caso del cadmio, vanadio y cadmio. En tal sentido, este tipo de análisis aporta elemento a ser considerados en la formulación de planes de manejo de a cuenca puesto que permite identificar los focos prioritarios de generación de contaminantes.

Asimismo, este trabajo es relevante como guía para la implementación de planes de monitoreo ambiental en próximas investigaciones relacionadas la relación del uso de la tierra y la generación de contaminantes geoacumulados en los sedimentos de fondo de los cauces fluviales.

5 Conclusiones

La concentración de metales pesados en los sedimentos del río Aroa tienen correlación con la naturaleza de las rocas metamórficas esquistosas de las formaciones Aroa, Nirgua y Yaritagua, con baja incidencia de las rocas sedimentarias de las formaciones Capadare, San Lorenzo y Agua Linda, respectivamente.

La tipología de formas de canal con características granulométrica específicas, tienen incidencia en la retención de metales pesados en distintos tramos de la cuenca del río Aroa. Se destaca el hecho que no existe un efecto acumulativo en las concentraciones de metales pesados aguas debajo de la cuenca, lo que sugiere que el control fluvial del tipo de canal es importante, además de eso la geoacumulación de elementos metálicos no es lineal, pues depende de las características geológicas y geomorfológicas de cada área de captación en que las muestras de sedimento fueron extraídas. Asimismo, las formas de canal fluvial cuyas características imponen un control en la acumulación de las mayores cantidades residuales de metales pesados, se corresponden con los canales tipo B4, C5 e C6.

Los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser emulados en otras cuencas hidrográficas con características similares, en las que se sospeche la presencia de minerales metálicos de alto valor (tierras raras: coltán, casiterita, entre otros) e interés estratégico para el desarrollo de la minería con criterios de explotación sostenible en virtud de la muy baja a nula afectación ambiental durante el proceso de exploración y prospección minera.

Referencias

BELLIZZIA A.; D. RODRÍGUEZ G. **Guía de la excursión a la región de Duaca-Barquisimeto-Bobare.** *Bol. Geol.*, Caracas, n. 8 v. 16, p. 284-309, 1967.

BELLIZZIA A.; D. RODRÍGUEZ. G. **Consideraciones sobre la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo.** *Bol. Geol.*, MMH, Caracas, n. 9 v. 18, p. 515-563, 1968.

BELLIZZIA A.; D. RODRÍGUEZ G.; E. ZAMBRANO. *Mapa geológico de la región de Barquisimeto-Urachiche-RíoTocuyo, estados Lara y Yaracuy.* Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Dirección de Geología. Mapa escala

1:100.000. Inédito. (Este mapa no fue publicado, pero debió acompañar el trabajo de: BELLIZZIA A. & D. RODRÍGUEZ-G. 1972. Geología de la región Barquisimeto-Urachiche-Río Tocuyo (Resumen). *Mem. IV Cong. Geol. Venezolano*, Caracas, noviembre 1969. *Bol. Geol., Caracas, Public. Esp.* 5, 1: 93-95). Mapa reproducido en A. BELLIZZIA, D. RODRÍGUEZ, E. ZAMBRANO & J. BUSHMAN. 2012. Mapas geológicos de la región centro occidental de Venezuela. *Rev. Venezolana Cienc. Tierra (Geos)*, UCV, Caracas, 43: 33-34 + 10 mapas en carpeta 25 de DVD .

BISHOP, M; JAMES, A; SHRODER, J; WALSH, S. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology**, 137, p. 5–26., 2012.

BLASZCZYNSKI, J.S. Landform characterization with geographic information systems. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. n 63 v. 2, p. 183–191, 1997.

BLOTT, S. **A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments by Sieving or Laser Granulometer**. United Kingdom: Kenneth Pye Associates Ltd. Crowthorne Enterprise Centre Old Wokingham Road Crowthorne, 2008.

CUENCA, R. **Estudio geoquímico de metales pesados presentes en la fracción limo-arcilla asociada a los sedimentos de fondo de la cuenca del río Aroa, Venezuela**. Tesis (Licenciatura en Geoquímica) Escuela de Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2017. 127p.

DU LAING, G.; RINKLEBEB, J.; VAN DECASTEELE, B.; MEERSA, E.; TACKA, F. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: **A review. Science of the Total Environment**, Belgium, n. 407, p. 3972 – 3985, 2009.

FUJIMOTO, M.; OHTE, N.; TANI, M. Effects of hillslope topography on runoff response in a small catchment in the Fudoji Experimental Watershed, central Japan. **Hydrological Processes**, USA, n.25, p.1874–1886, 2011.

JAIMES, M. **Estudio geológico-petrográfico de la zona de Crucito – Albarico - Carabobo, estado Yaracuy**. Tesis (Ingeniero Geología) Escuela de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2011. 108p.

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS. **Léxico Estratigráfico de Venezuela**. Dirección de Geología. Tercera Edición. Caracas, 1997.

MORESCO, MEZZOMO, MARISTELA. Aplicação do conhecimento geomorfológico: experiências desenvolvidas por alunos de graduação. **Revista Geonorte, Edição Especial**, v.2, n.4, p.187 – 196, 2012.

ROGSEN, D. A classification of natural rivers. **Wildland Hydrology**. *Catena*, v. 1, n. 22, p. 169-199, 1994.

SAAD, D.; BENOY, G.; ROBERTSON, D. Estimates of long-term mean-annual nutrient loads considered for use in SPARROW models of the Midcontinental region of Canada and the United States, 2002 base year. U.S. **Geological Survey Scientific Investigations Report**. n. 1 v. 14, 2018.

URBANI, F.; GRANDE, S.; GÓMEZ, A.; MENDI, D.; REÁTEGUI, W.; BAQUERO, M. Descripción estratigráfica actualizada de algunas unidades geológicas de la región comprendida entre Carora y Cabo Codera, Venezuela. **Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra**. n. 1 v. 47, 2015.

USGS. **Geologic Shaded Relief Map of Venezuela**. United State Geological Survey. U.S Department of the Interior, UCV and FUNVISIS, 2005.

ZINCK, ALFRED. **Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales**. ITC Special Lecture Notes Series, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands, 2012. 123p.