

ATRIBUTOS MORFOSEDIMENTARIOS Y CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL RIO AROA, VENEZUELA.

MORPHOSEDIMENTARY ATTRIBUTES AND THE CONCENTRATION OF HEAVY METALS IN THE AROA RIVER BASIN, VENEZUELA”

recibido 19.06. 2022 aceptado 30.09.2022

***ORLANDO JOSÉ CABRERA VIÑA**

****CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA**

**Universidad Central de Venezuela, Faculdade de Humanidades e Educação, Escola de Geografia, Laboratorio de Geomorfología e Solos, Caracas – Venezuela,*

e-mail: orlando.cabrera@ucv.ve

***Universidad Federal de Paraná, Programa de Pós Graduação em Geografia, Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologia (LAGEO) - Curitiba – Paraná,*

e-mail: claudineits@ufpr.br

Resumen

La geomorfología estudia la evolución del paisaje, conjugando la concurrencia de factores (endógenos y exógenos), procesos (erosivos y/o sedimentarios), dinámica (gravitacional, fluvial, eólica, costera, kárstica, glacial) e historia, cuyo resultado final se traduce en la configuración natural del territorio sobre el cual el hombre desarrolla o prevé un potencial uso de la tierra. En este sentido, esta investigación tuvo como objetivo principal determinar la relación entre los atributos morfosedimentarios fluviales con la concentración de metales pesados presentes en la cuenca del río Aroa, con énfasis en las características granulométricas de los sedimentos de fondo del río en los diferentes tipos de formas de canal. Para ello fue necesario caracterizar las condiciones geológicas y geomorfológicas de la cuenca del río Aroa que determinan la presencia de metales pesados en los sedimentos del fondo de las diferentes formas del cauce muestreadas. La aplicación de técnicas estadísticas multivariadas permitió determinar las relaciones de interdependencia que existen entre las concentraciones de metales pesados y las características granulométricas de los sedimentos de fondo, así como el control litológico de las formaciones que afloran en la zona. Asimismo, se determinó que la geomorfología fluvial controla la presencia y abundancia de elementos químicos, siendo los cauces predominantemente estrechos de lecho blocoso, los moderadamente estrechos de lecho gravoso grueso, y los canales ligeramente estrechos de lecho gravo-arenoso y areno limoso, clasificados en Tipo A3, B4, C5 y C6, los que más retienen metales pesados.

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

Abstract

Geomorphology studies the evolution of the landscape, combining the concurrence of factors (endogenous and exogenous), processes (erosive and/or sedimentary), dynamics (gravitational, fluvial, wind, coastal, karstic, glacial) and history, whose final result is

translated in the natural configuration of the territory on which human develops or foresees a potential use of the land. In this sense, the main objective of this research was to determine the relationship between the fluvial morphosedimentary attributes with the concentration of heavy metals present in the Aroa river basin, with emphasis on the granulometric characteristics of the bottom sediments of the river in the different types of channel shapes. For this, it was necessary to characterize the geological and geomorphological conditions of the Aroa river basin that determine the presence of heavy metals in the bottom sediments of the different forms of the sampled channel. The application of multivariate statistical techniques made it possible to determine the strong interdependence relationships that exist between the concentrations of heavy metals and the granulometric characteristics of bottom sediments, as well as the lithological control of the formations that outcrop in the area. Likewise, it was determined that fluvial geomorphology controls the presence and abundance of chemical elements, being the channels predominantly narrow with very coarse gravel bed, moderately narrow with thick gravelly bed, and slightly narrow channels with gravel-sandy and silty sand, classified in Type A3, B4, C5 and C6, the ones that retain the heaviest metals.

Keywords: Geomorphology, relief taxonomy; geochemistry, multivariate analysis

Introducción

La aplicabilidad de los estudios geomorfológicos es cada vez más útil en la vida cotidiana, desde la planificación ambiental, agrícola y urbana. Para Blaszczyński (1997), la capacidad de analizar y cuantificar la morfología de la superficie de la tierra es esencial para la comprensión de los aspectos físicos, procesos 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 procesos de la superficie terrestre, recursos naturales, amenazas naturales y evolución del paisaje a partir de la geocronología. En este caso, la motivación para este estudio surge de la necesidad de predefinir y optimizar el uso de dos recursos disponibles para seleccionar las 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 en los sedimentos de fondo del río Aroa. Para cumplir este objetivo, el estudio inicia con la caracterización de la cuenca hidrográfica del río Aroa y de la clasificación de los tipos de canales según la metodología de Rogen, (1994), con la debida caracterización granulométrica de cada sitio en los que Cuenca (2017), muestreo y analizó la concentración de metales pesados. En tal sentido, se cartografiaron las características geológicas y geomorfológicas 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 simular las variaciones espaciales de las concentraciones de metales pesados en la cuenca del río Aroa y así, identificar las relaciones con los atributos morfosedimentarios de los canales fluviales.

Para correlacionar las relaciones entre los atributos geomorfológicos como controladores del proceso de 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 utilizado como referente, para explorar y definir áreas con concentración de elementos químicos potencialmente contaminantes en ambientes fluviales con poca disponibilidad de información ambiental.

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 la Cuadro 1. Con el empleo de estos datos se efectuaron los análisis comparativos presentados en esta investigación.

Cuadro1. Concentraciones residuales de metales pesados, expresado em (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.

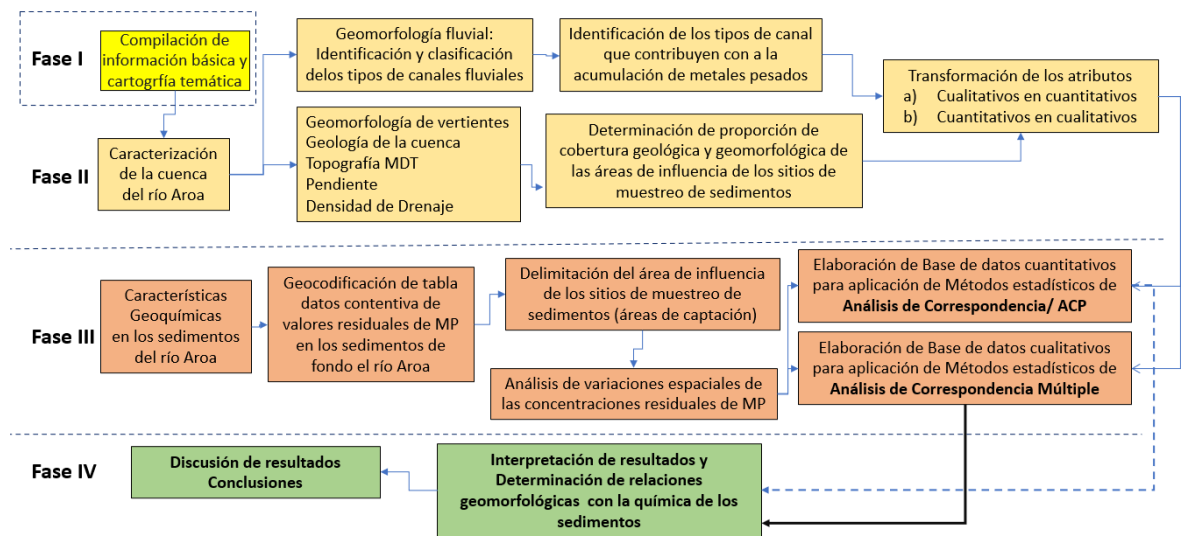


Figura 1: Flujograma Operacional

Fuente: Elaboración propia

En detalle, el desarrollo 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 Rogen, (1994), por ello constituye una referencia imprescindible en la clasificación de los canales fluviales. De igual manera, este estudio combina los métodos de Rogen, (1994) y Zinck, (2012) a fin de reforzar la clasificación taxonómica de las formas de relieve, cuyos atributos permiten comprender el rol que cada geoforma y sus características granulométricas posee en la regulación tanto de sus propios procesos morfodinámicos como en la concepción de las geoformas como factor que incide en el control de otros eventos naturales como la evolución de suelos hasta en misma concentración de metales pesados.

La segunda fase consistió en el levantamiento de los datos secundarios para la confección de la cartografía temática correspondiente a la caracterización físico-natural del área y en ubicación espacial de los puntos de muestreo empleados por Cuenca (2017), a partir de lo cual, se delimito el área inmediata de captura 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 físico natural. En este sentido, 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 y, como referencia general, se consultó el mapa geológico de la USGS *et al* (2005). La información de la composición mineral de cada formación geológica fue obtenida de los estudios de Urbani *et al.*; (2015) y del Léxico Estratigráfico de Venezuela (1997).

Mientras que, los parámetros morfométricos de la cuenca y de los ríos se obtuvieron a partir del modelo digital de elevación (DEM), 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, con la herramienta Vertical Mapper del software MapInfo 10.5, se elaboraron los mapas de densidad de drenaje, pendiente, pendiente media de la cuenca y de las áreas de captación de los sitios de muestreo. Luego, 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 la concentración de metales pesados contenidos en los sedimentos de fondo del río Aroa, para ello, se estructuró el banco de datos geocodificados y, con el uso de diferentes técnicas de interpolación que ofrece el software Vertical Mapper de MapInfo 10.7, como triangulación simple (Simple Triangulation), vecino más cercano (Natural Neighbour Analysis) y Kriging, se modeló el comportamiento espacial de los elementos químicos en la cuenca, a fin de explorar cuál de los métodos de interpolación expresa mejor la distribución espacial de acuerdo con las características del área y el contorno fluvial del valle del río Aroa.

La cuarta fase consistió en el 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, el procesamiento de las muestras de sedimento en laboratorio, 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).

La quinta fase corresponde a la preparación de 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 (2021). Seguidamente, se procede 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 observa 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.

Localización y caracterización general del área de estudio

La cuenca del Aroa se localiza entre a fachada costera de la depresión de Yaracuy y el macizo de Aroa, 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: Elaboración propia

Geológicamente, las montañas del sur de la cuenca del río Aroa están constituidas, básicamente, al noreste por el Complejo Yaritagua del proterozoico; el cual es descrito, por Bellizzia y Rodríguez (1968), como una unidad de esquisto cuarzo-micáceo, anfibolítico granatífero y algunos afloramientos de esquisto glaucofánico y mármol. Posteriormente, en 1972, esos autores completan la descripción de la formación observando la presencia de gneis porfiroblástico, augengneis, esquisto cuarzo-micáceo, esquisto cuarzo-feldespático-clorítico y gneis, esquisto biotítico, anfibolítico granatífero, cuarcitas y una porción menor de esquisto glaucofánico y mármol. Mientras que, al sureste, la Formación Nirgua del Jurásico, tiene varios tipos litológicos, tales como: cuarzo esquisto - micáceo, micáceo - grafitoso, mármol macizo, anfibolita eclogítica, anfibolita epidótica y granatífera, cuarcita, esquisto, cuarzo - gneis micáceo - feldespático (Bellizzia y Rodríguez, 1967). Al sur, sureste y noroeste, la propia Formación Aroa del Cretácico 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 (Urbani *et al.*;2015). La Formación Casupal, caracterizada por la presencia de areniscas de grano fino

con material carbonáceo (Urbani *et al.*;2015). Asimismo, 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 intruidas por los 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 y lisas 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 este-sureste, con predominio de esquistos, tienden a desarrollar relieves más escarpados con una definición marcada de laderas cóncavas y convexas.

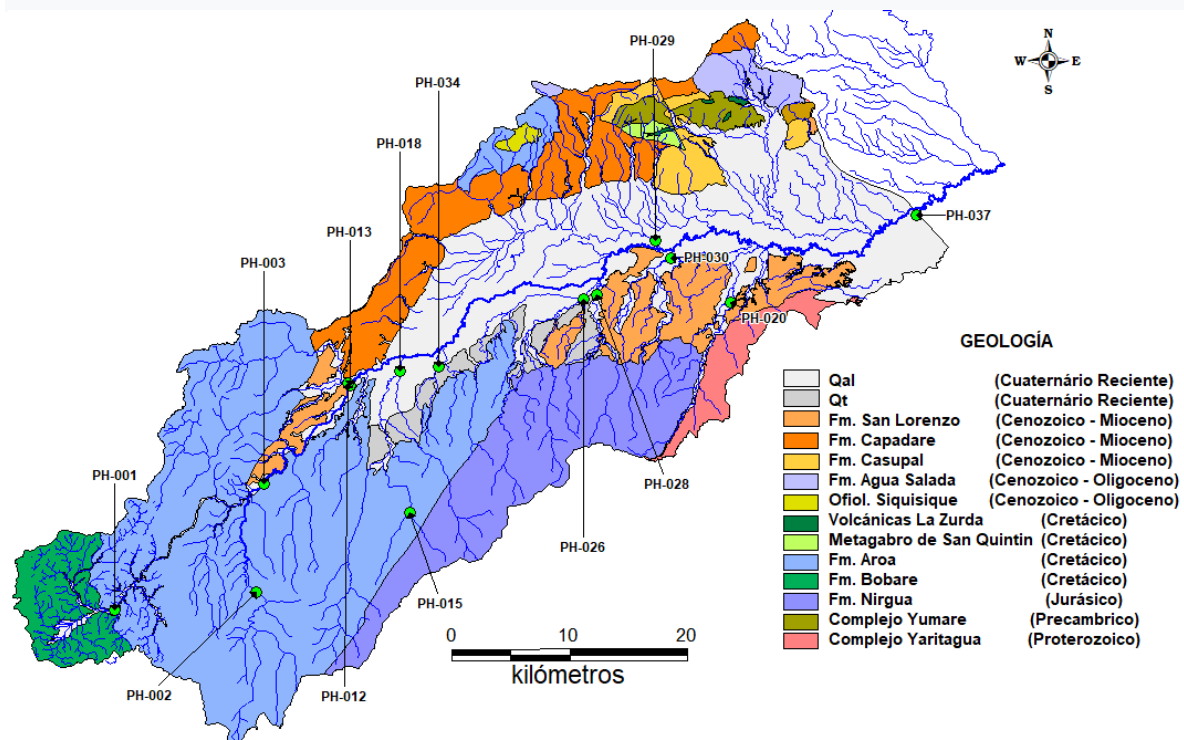


Figura 3: Geología del área de estudio

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

Geomorfológicamente, la cuenca del río Aroa se inserta en la porción noroeste de la macroforma estructural denominada Cordillera de la Costa en Venezuela que, según el sistema de clasificación taxonómica de Zinck (2012), se corresponde con el primer taxón 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 es la Región Natural de 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. El 4^{to} taxon, identificado a partir de las cartas topográficas a escala 1:25.000, corresponde a los tipos de relieve incluidos en esta categoría: las formas de crestas, vertientes, colinas, glacis, llanura fluvial y llanura costera (Figura 2). 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 geoformas 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 4).

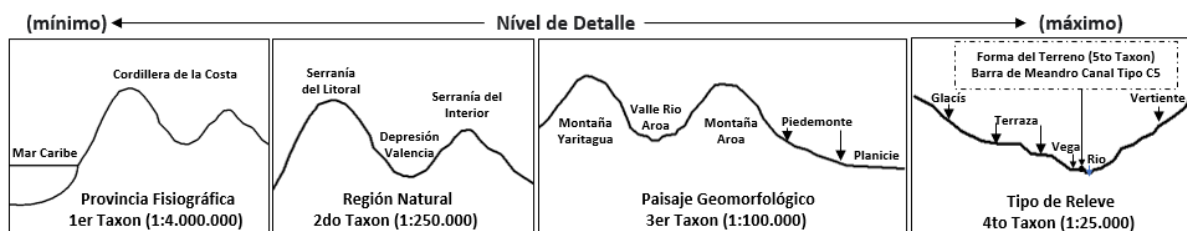


Figura 4: Taxonomía del relieve de la cuenca del río Aroa.

Fuente: Modificado de Zinck (2012)

Este marco geológico y geomorfológico define el patrón de drenaje fundamentalmente dendrítico que, a su vez, ejerce gran influencia en el modelaje del relieve. En el río Aroa se distinguen, básicamente, dos grupos de cursos de agua: el principal dendrítico en los paisajes montañosos con algunos sectores de drenaje linear

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.

Resultados

De acuerdo con el objetivo principal del trabajo, se procedió a la clasificación de 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 Rogen (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 (Fotos 1 y 2). 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 5 y 6.

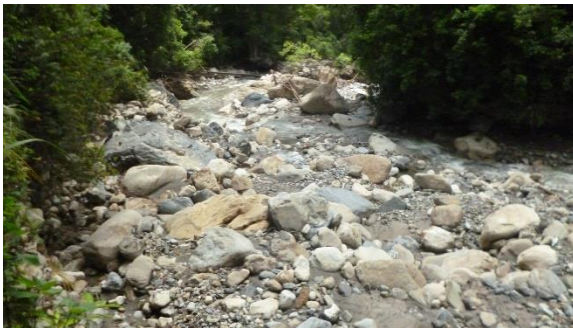


Foto 1. Río Las Minas, sitio PH-015. Fondo bloques, cantos y gravas gruesas



Foto 2. Río Carabobo, sitio PH-026. Fondo de arenas medias a finas y limosas

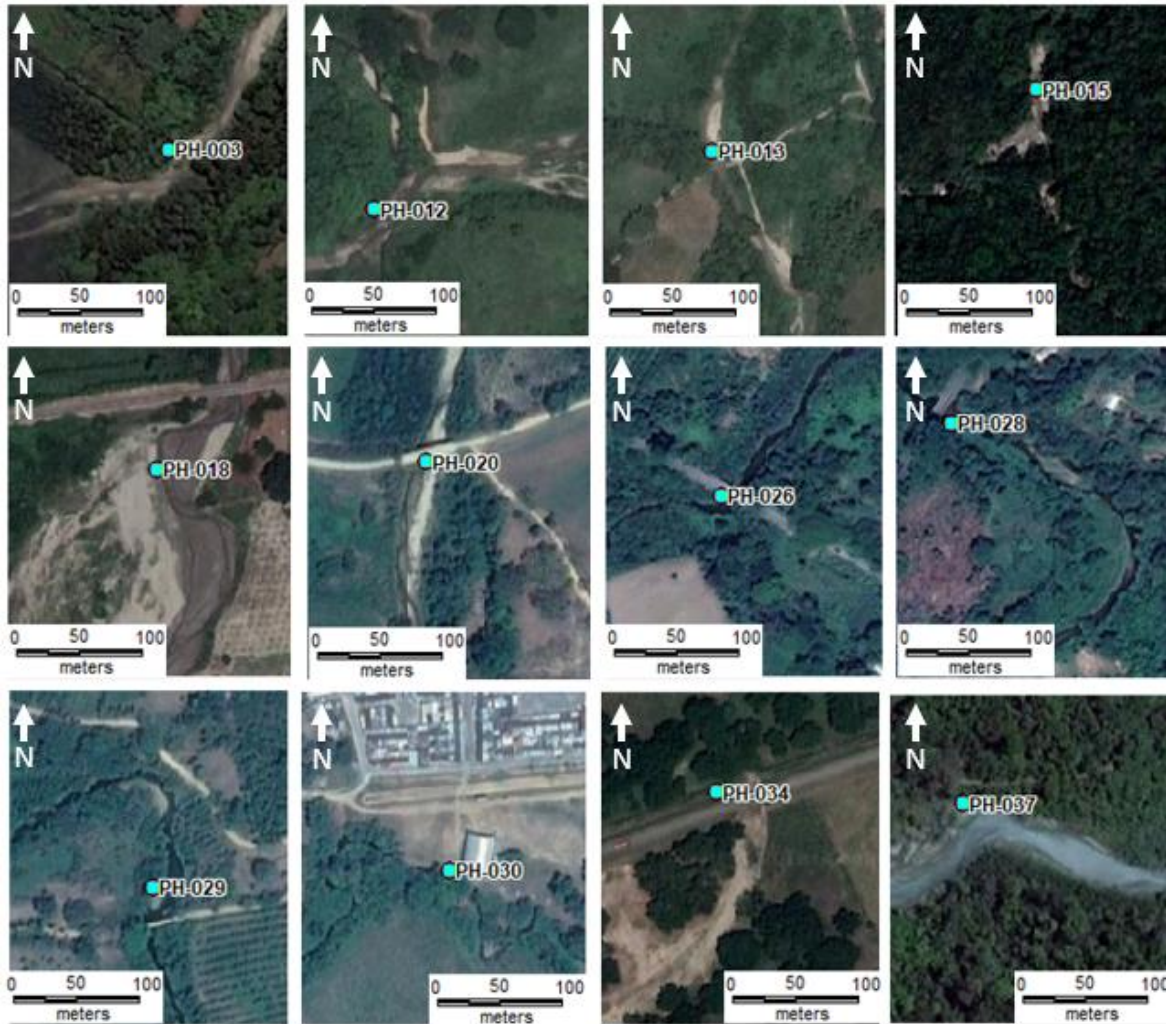


Figura 5: Sitios de muestreo y tipos de canales según sistema de Rogen (1994).

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

Fuente: Elaboración propia

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%

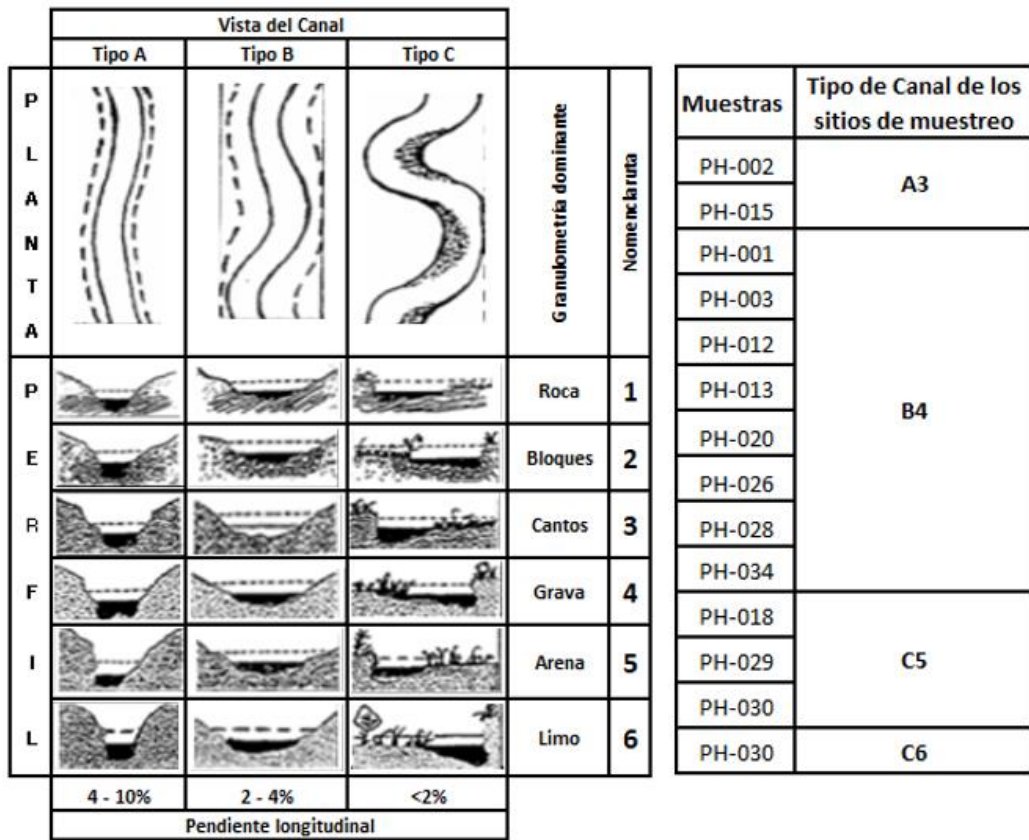
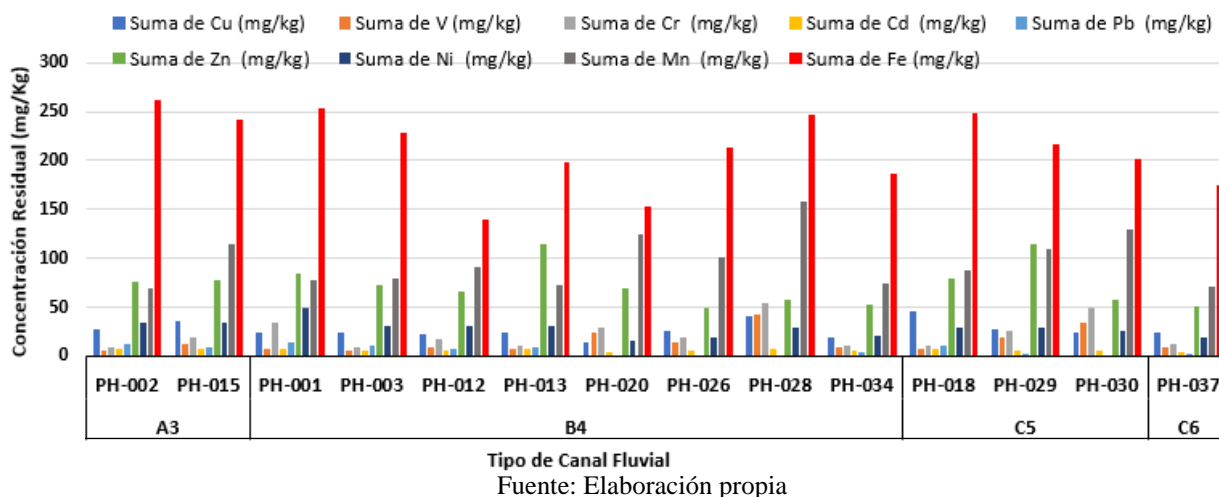


Figura 6: Tipos de canales en los sitios de muestreo según clasificación de Rogen.

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

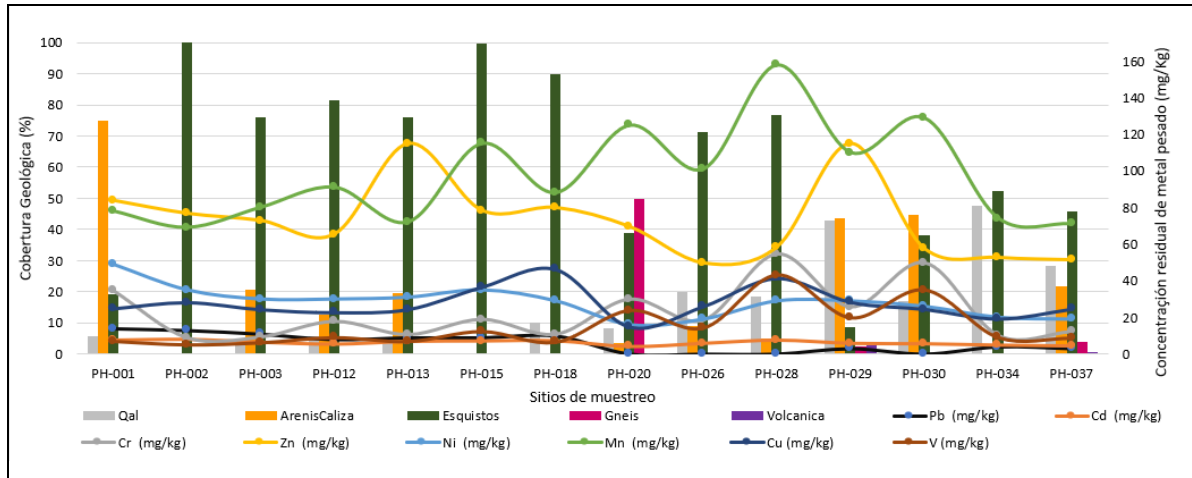
En el Gráfico 1 se observan los valores de metales pesados residuales, de acuerdo con el tipo de canal, en el que se destacan las concentraciones de cobre, manganeso y zinc en todos los sitios de muestreo, con especial atención para los canales Tipo A3, B4 y C5 que exhiben altas concentraciones de esos 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



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: Elaboración propia

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 7), lo que demuestra la existencia de una buena relación inter-elemental 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.

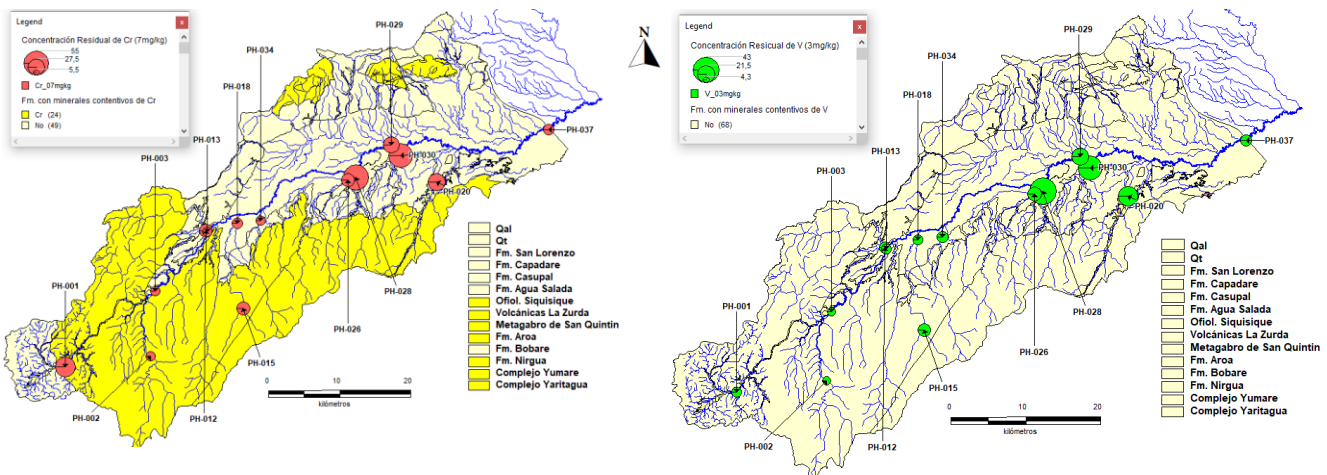


Figura 7: Variación de cromo (Cr) y de vanadio (V)

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 8 y 9).

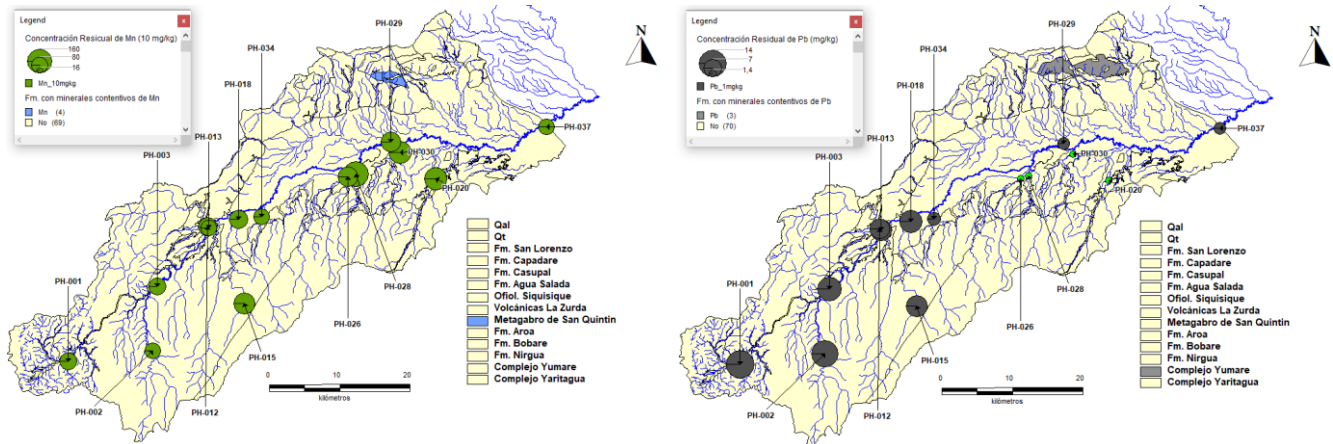


Figura 8: Variación del manganeso (Mn) y del plomo (Pb)

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

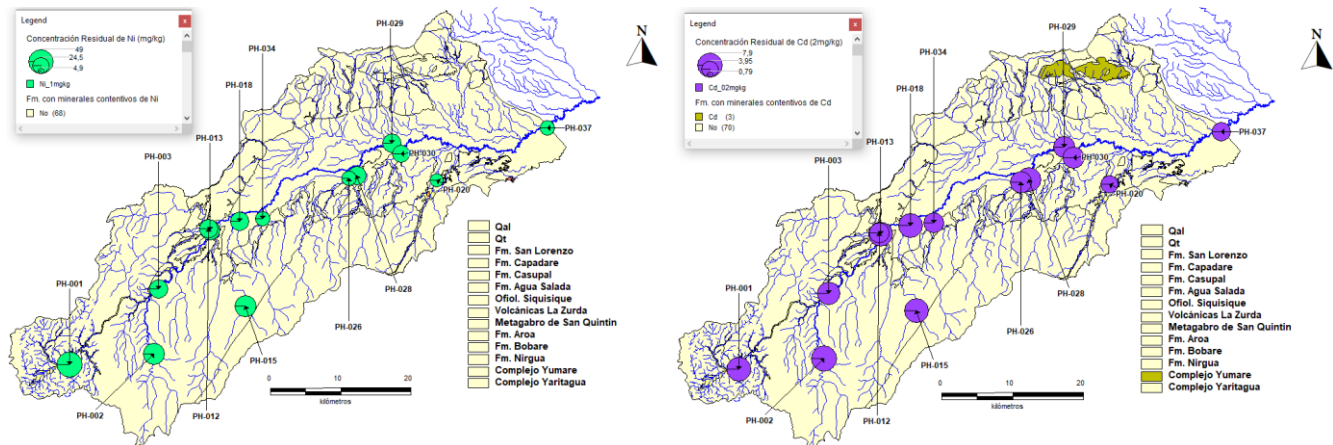


Figura 9: Variación del níquel (Ni) y del cadmio (Cd)

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 10).

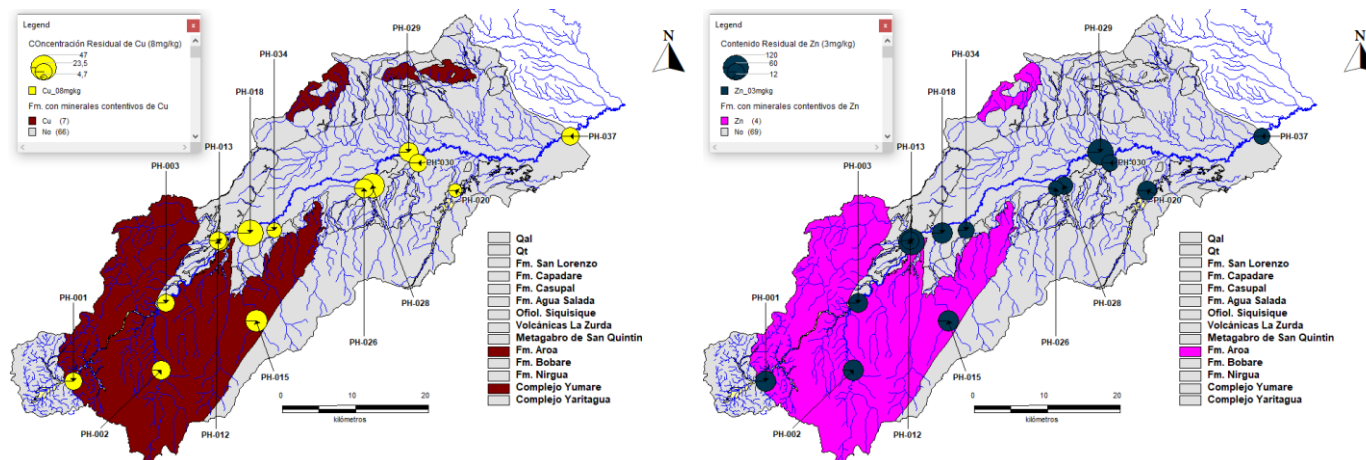


Figura 10: Variación del cobre (Cu) y del zinc (Zn)

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 la 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).

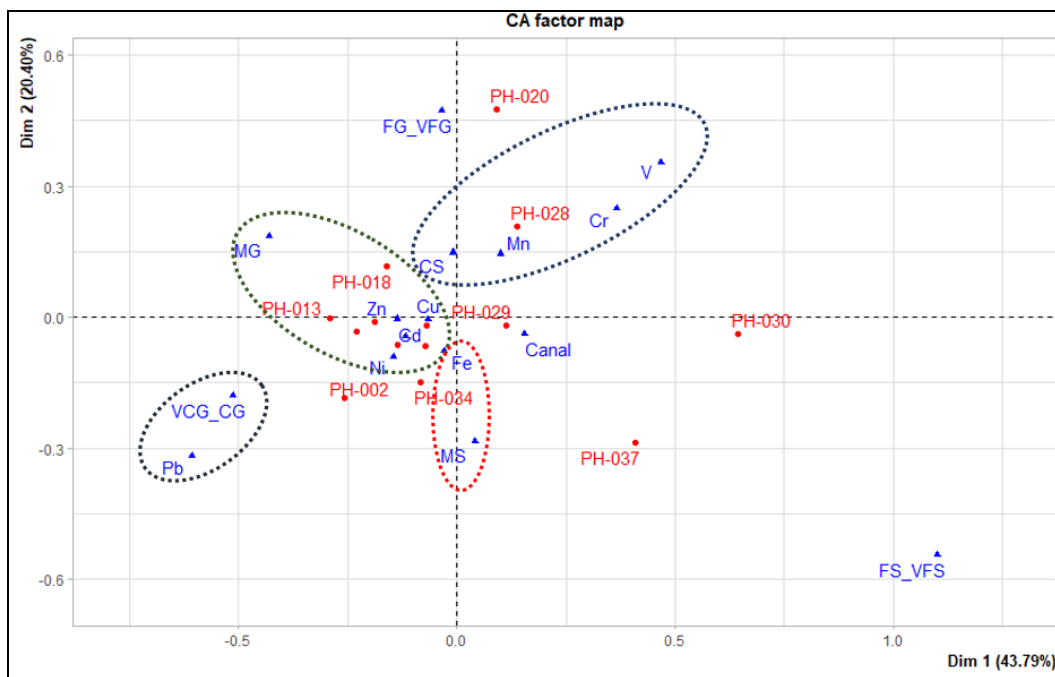
Cuadro 3. Matriz de datos empleada en el análisis multivariado

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).

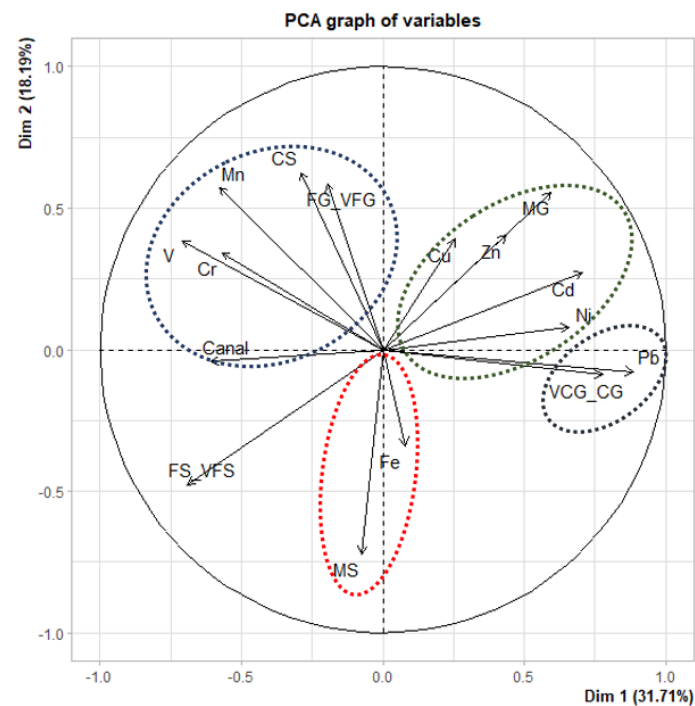
En este mismo orden de ideas, las arenas gruesas (CS) tienen correspondencia con el grupo de metales con alta relación inter-elemental conformado por el grupo del manganeso (Mn), cromo (Cr) y vanadio (V) y las texturas de arenas gruesas y las arenas medias (MS), tienen estrecha relación con la presencia 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. Del mismo modo evidencian 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 vanadio y cadmio. En tal sentido, este tipo de análisis aporta elementos a ser considerados en la formulación de planes de manejo de cuencas 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 con la relación del uso de la tierra y la generación de contaminantes geoacumulados en los sedimentos de fondo de los cauces fluviales.

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 granulométricas específicas tiene 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 en 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, 8(16): 284-309. 1967

BELLIZZIA A. & D. RODRÍGUEZ G (1968). **Consideraciones sobre la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo.** *Bol. Geol.*, MMH, Caracas, 9(18): 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, perodebió 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.** USA. *Geomorphology*, 137, p. 5–26. 2012

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

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

CUENCA, RONALD (2017). **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 (2011). 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.

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.

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

ROGSEN, DAVID (1994). **A classification of natural rivers.** Wildland Hydrology. Catena, n. 22, p. 169-199, 1994.

SAAD, D.A., BENOY, G.A., AND ROBERTSON, D.M (2018). **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 2018–5051, p.14, 2018.

THE R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2021). "Lost Library Book". R version 4.0.4 (2021-02-15) -- "Lost Library Book" Copyright (C) 2021, Platform: armv7l-unknown-linux-gnueabi (32-bit) Copyright (C) 2021.

URBANI, F.; GRANDE, S.; GÓMEZ, A.; MENDI, D.; REÁTEGUI, W.; BAQUERO, M (2015). **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. 47, 2015

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

ZINCK, ALFRED (2012). **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, p. 123. 2012.