

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS DE LA CUENCA DEL RÍO TUY

**Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por la Br. Nadeztha Carolyna
Hernández para optar al Título de
Licenciado en Geoquímica**

Caracas, Mayo de 2011



ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: **ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS DE LA CUENCA DEL RÍO TUY**, presentado por la Br. Nadeztha Carolyn Hernández, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por esta Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciada en Geoquímica.

Prof. Williams Meléndez

Tutor

Prof. Ramón Montero

Profesor-Jurado

Prof. Carlos Yanes

Profesor-Jurado



*Dedicado con todo mi cariño y amor a mi
madre, mi hermana y mi tía Carmen y
a la memoria de mi tío-abuelo José Rafael
Balza⁺*



AGRADECIMIENTOS

- Primero quiero agradecer a Dios por haberme permitido llevar a cabo exitosamente la realización de este proyecto y la culminación de mi carrera universitaria.
- A mi mamá por darme la vida, apoyarme en todo lo que hago y ayudarme durante toda la carrera, es la mejor mamá del mundo. De igual manera agradezco a mi hermana Betzabeth, mi tía Carmen, mi tía Sora a quienes quiero mucho y al resto de mi familia.
- A mi tutor el Prof. Williams Meléndez, por ofrecerme este interesante proyecto y ayudarme a ejecutarlo.
- Al Prof. Armando Ramírez por su excelente ayuda y colaboración durante la realización de esta investigación y por todas las clases de hidrogeoquímica y geoquímica de campo.
- A mis mejores amigos: Khelymey, Alexmar, Richard, Gibran, Ana K, Henry y Luisa por los bonitos momentos que vivimos juntos durante la carrera, todos los viajes, salidas de campo, paseos, fiestas. También agradezco a mi amigo Jesús N. (Tuyero), Wilbert, Jeffrey, Omnaim, Mariac, Edgar, Yrasenia, Albani, siempre los tendré presente.
- Al personal del ICT que me ayudó durante las actividades de campo y laboratorio de este proyecto, el Sr. Fernando, Franco, Ángel, Luis Vilchez.
- También agradezco al personal del Laboratorio Nacional de Hidráulica por su ayuda con la recolección de muestras.
- A todos mis profesores a quienes agradezco por todos los conocimientos que me transmitieron, en especial los profesores Armando Ramírez., Manuel Martínez, Raiza Fernández, Carlos Barrios y Santiago Marrero.



RESUMEN

En este trabajo fue llevado a cabo un estudio geoquímico en las muestras de agua de la Cuenca del Río Tuy, con el propósito de determinar el grado de contaminación que presenta este importante cuerpo de agua. Fueron realizadas mediciones en campo de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad, temperatura, alcalinidad y Eh; así como las determinaciones en el laboratorio de las concentraciones de Na, K, Ca, Mg, Cl⁻, SO₄²⁻ y NO₃⁻; además de los metales traza Al, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn y Pb; y los elementos Si y P. Las muestras recolectadas en campo fueron filtradas a través de un filtro con tamaño de poro de 0,45 μm para trabajar con la fracción de sólidos disueltos.

Los resultados obtenidos indican que las zonas que presentan mayor contaminación corresponden a Guayas, Ocumare, Lagartijo y Boca de Cagua, y así como los afluentes pertenecientes a la Quebrada Cúa, Quebrada Charallave y Quebrada Guayas, y los ríos Caucagua y Guaire, evidenciado por los altos valores de conductividad y los mayores valores de concentraciones de las especies Na, K, Ca, Mg, Cl⁻, SO₄²⁻ y HCO₃⁻, no obstante que en las zonas aguas arriba en el río desde la Colonia Tovar hasta El Consejo, las concentraciones fueron similares a las de afluentes considerados como no contaminados. En cuanto a los aniones, el NO₃⁻ presentó sus máximos en Boca de Paparo, Hacienda Buen Paso Hacienda Santa Teresa y Tácata, atribuido este a las actividades agropecuarias. El P resaltó en Araguaita, Taguacita-Tuy, Guayas y Ocumare y en los afluentes de Quebrada Cúa, Quebrada Charallave, Río Caucagua y Río Guaire, motivado tanto a las actividades agrícolas como a la entrada de aguas residuales de origen doméstico. El SiO₂ no presentó variaciones significativas.

Por otro lado, los metales traza en su mayoría presentaron las concentraciones más altas en el Río Guaire, Quebrada Charallave y Río Caucagua, lo que corrobora la alta contaminación que estos afluentes presentan. Las concentraciones de elementos como Al, Fe y Mn presentaron los mayores valores en Guayas y las quebradas Guayas y Cúa, probablemente atribuido a las actividades industriales y domésticas.



ÍNDICE

Índice General

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general:	3
Objetivos específicos:	3
MARCO TEÓRICO	4
Composición de las aguas de río	4
Factores que controlan la composición química de las aguas superficiales	4
Clima	4
Relieve	4
Vegetación	5
Litología	5
Actividad humana	5
Procesos fisicoquímicos que ocurren en los sistemas naturales	6
Adsorción	6
Intercambio iónico	6
Coprecipitación	6
Acomplejamiento	7
Precipitación	7
Floculación	7
Parámetros fisicoquímicos en el análisis de los cuerpos de agua	8
pH	8
Potencial redox	8
Conductividad	9
Oxígeno disuelto	9
Temperatura	10
Alcalinidad	10
Fuentes contaminantes en aguas naturales	11
Fuentes domésticas	11



Fuentes industriales	11
Fuentes agrícolas	12
Clasificación de las aguas de acuerdo a sus usos	12
Comportamiento geoquímico de las especies determinadas	15
Especies mayoritarias: Na, K, Ca y Mg	15
Metales pesados Al, Fe, Mn, Ni, Co, Cu, Pb y Zn	16
Especies aniónicas: Cl⁻, SO₄²⁻, y NO₃⁻	19
Especies inorgánicas: Si y P	21
Antecedentes	22
Zona de estudio	31
Ubicación	31
Geología regional	32
Geología local	33
Características climatológicas de la cuenca del Río Tuy	34
Relieve de la cuenca del Río Tuy	35
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	36
Trabajo de campo	36
Captación de muestras	36
Medidas de campo	38
Trabajo de laboratorio	40
Tratamiento de muestras	40
Análisis químico de las muestras	41
Tratamiento de los resultados	44
PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
Validación de los resultados analíticos	45
Parámetros fisicoquímicos	48
Cationes mayoritarios	61
Aniones	71
Silicio y fósforo	78
Metales traza	84
Correlaciones inter-elementales	100



CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	104
REFERENCIAS	105
APÉNDICES	111
Apéndice 1. Curvas de calibración utilizadas para la determinación de la concentración de las distintas especies químicas	112
Apéndice 2. Cálculos de porcentaje de error y conductividades teóricas	116
Apéndice 3. Fotografías de los equipos empleados para los análisis de las distintas especies.	119
Apéndice 4. Valores de SDT y conductividad teórica en las muestras del Río Tuy	121
MAPA ANEXO	



Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio; el río Tuy desde su nacimiento en Pico Codazzi, estado Aragua, hasta su desembocadura en Boca de Paparo, estado Miranda	32
Figura 2. Esquema de la división de las muestras luego del proceso de filtración.	40
Figura 3. Esquema con las técnicas analíticas empleadas para la determinación de las distintas especies.	41
Figura 4: Balance iónico de las muestras del Río Tuy	45
Figura 5: Conductividad teórica Vs conductividad de campo para las aguas del Río Tuy y sus afluentes principales	47
Figura 6. Relación de SDT con la conductividad	47
Figura 7. Distribución espacial del pH en el Río Tuy y sus afluentes principales	49
Figura 8. Distribución espacial de la conductividad en el Río Tuy y sus afluentes principales	52
Figura 9. Distribución espacial de la alcalinidad en el Río Tuy y sus afluentes principales	54
Figura 10. Distribución espacial de la temperatura en el Río Tuy y sus afluentes principales	55
Figura 11. Distribución de Caudal, oxígeno disuelto y Turbiedad en algunos puntos del Río Tuy	58
Figura 12. Distribución de las medidas de Eh en algunos puntos del Río Tuy	60
Figura 13. Distribución espacial de sodio en el Río Tuy y sus afluentes principales	64
Figura 14. Distribución espacial de potasio en el Río Tuy y sus afluentes principales	66
Figura 15. Distribución espacial de calcio en el Río Tuy y sus afluentes principales	67



Figura 16. Distribución espacial de magnesio en el Río Tuy y sus afluentes principales	70
Figura 17. Distribución espacial de cloruro en el Río Tuy y sus afluentes principales	74
Figura 18. Distribución espacial de sulfato en el Río Tuy y sus afluentes principales	75
Figura 19. Distribución espacial de nitrato en el Río Tuy y sus afluentes principales	77
Figura 20. Distribución espacial de fósforo en el Río Tuy y sus afluentes principales	81
Figura 21. Distribución espacial de silicio en el Río Tuy y sus afluentes principales	83
Figura 22. Distribución espacial de aluminio en el Río Tuy y sus afluentes principales	86
Figura 23. Distribución espacial de hierro en el Río Tuy y sus afluentes principales	88
Figura 24. Distribución espacial de manganeso en el Río Tuy y sus afluentes principales	90
Figura 25. Distribución espacial de cobre en el Río Tuy y sus afluentes principales	92
Figura 26. Distribución espacial de zinc en el Río Tuy y sus afluentes principales	94
Figura 27. Distribución espacial de níquel en el Río Tuy y sus afluentes principales	95
Figura 28. Distribución espacial de plomo en el Río Tuy y sus afluentes principales	97
Figura 29. Distribución espacial de cobalto en el Río Tuy y sus afluentes principales	99
Figura 30. Curvas de calibración de los elementos Al, Fe, Mn, Ni, Cu, Pb, Zn y Co	112
Figura 31. Curvas de calibración de los elementos Si, Ca, P, K y Mg	113



Figura 32. Curvas de calibración de sodio, magnesio y nitrato. Y curva de valoración del HCl empleado para las mediciones de alcalinidad	114
Figura 33. Curvas de calibración de los aniones cloruro y sulfato.	115
Figura 34. fotografía del montaje de filtración de muestras, equipo de absorción atómica, y cromatógrafo iónico empleado en los análisis.	119
Figura 35. Fotografía del espectrofotómetro Spectronic 20 y del espectrofotómetro de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado ICP-AES empleados en los análisis de las muestras	120



Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de las aguas según sus usos	13
Tabla 2. Valores máximos permitidos para parámetros fisicoquímicos en las aguas tipo 1B	14
Tabla 3. Valores máximos permitidos para parámetros fisicoquímicos en las aguas tipo 7	14
Tabla 4. Valores máximos permitidos para concentración de compuestos en las aguas tipo 1B	15
Tabla 5. Puntos de captación de muestra a lo largo del Río Tuy.	37
Tabla 6. Puntos de captación de muestra en los afluentes principales del Río Tuy	38
Tabla 7. Medidas de parámetros fisicoquímicos en el Río Tuy y sus afluentes principales	51
Tabla 8. Medidas de campo adicionales en algunos puntos del río Tuy	57
Tabla 9. Medidas de Eh en algunos puntos del río Tuy	60
Tabla 10. Medidas de elementos mayoritarios en el Río Tuy y sus afluentes	62
Tabla 11. Medidas de aniones en el Río Tuy y afluentes	72
Tabla 12. Medidas de silicio y fósforo en el Río Tuy y sus afluentes principales	79
Tabla 13. Medidas de concentración de metales en los puntos de muestreo.	85
Tabla 14. Coeficientes de correlación entre los iones, sólidos disueltos totales y parámetros fisicoquímicos medidos en la Cuenca del Río Tuy	100
Tabla 15. Coeficientes de correlación de los metales pesados	100
Tabla 16. Conductividades iónicas equivalentes de los iones en solución acuosa a 25°C	117
Tabla 17. Porcentaje de error en las muestras recolectadas	118
Tabla 18. Valores de SDT y conductividad teórica en el Río Tuy	121



INTRODUCCIÓN

Los ríos son cuerpos de agua de importancia ecológica, ya que en éstos conviven una gran cantidad de especies, entre las que se encuentran organismos fotosintéticos como las algas, musgos, plantas acuáticas, así como diversas cantidades y tipos de peces. Por otro lado, al ser los ríos una de las fuentes principales de agua dulce, estos son empleados para distintos usos, a saber: domésticos (para el consumo humano), industriales, agrícolas y recreativos, entre otros. De igual manera, los ríos son utilizados para la construcción de presas, las cuales tienen como objetivo la producción de electricidad, riego, regulación de caudales, control de inundaciones, control de sequía y navegación (Seoáñez, 2000).

El continuo y acelerado crecimiento poblacional, industrial y agrícola, ha convertido a estos sistemas en receptores de grandes cantidades de desechos. Las actividades domésticas contribuyen a través de los residuos provenientes de las poblaciones cercanas a los ríos, estos incluyen jabones, detergentes, restos de alimentos, grasas y excreciones humanas. Así mismo, Las industrias contribuyen con los vertidos químicos provenientes de las empresas (Bailarón, 2002). Por otro lado, las principales fuentes agrícolas contaminantes las constituyen los fertilizantes, los pesticidas y las industrias de procesamiento de alimentos (FAO, 1992).

Estas fuentes contribuyen con la liberación de metales pesados hacia el ambiente acuático, los cuales pueden ser incorporados como sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sedimentos de fondo (Blanco, 2007). La mayoría de los metales pueden actuar como nutrientes a bajas concentraciones, mientras que el aumento de los mismos (por efectos antrópicos) puede resultar muy tóxico. La presencia y comportamiento de los distintos elementos químicos dependerá en gran medida de parámetros fisicoquímicos como el pH del medio, el Eh, el oxígeno disuelto y la temperatura. (Dómenech, 2006).



Los ríos cuando reciben efluentes de diferentes fuentes, tienen la capacidad de regenerarse por sí mismos; es decir, pueden autopurificarse y lo hacen a través de mecanismos fisicoquímicos tales como intercambio iónico, adsorción, acomplejamiento, floculación y coprecipitación, entre otros (Blanco, 2007).

Sin embargo, a causa del gran número de actividades que se desarrollan en las zonas cercanas a los ríos, la capacidad de autopurificación de éstos disminuye, alterando la composición natural de los mismos, trayendo como consecuencia la contaminación de sus aguas, por lo que se rompe el equilibrio ecológico, y las especies que viven en este sistema acuático comienzan a desaparecer.

De los abundantes recursos hídricos en Venezuela se reconocen como contaminados las cuencas de los lagos de Valencia y Maracaibo, así como las cuencas de los ríos Yaracuy, Neverí, Manzanares, Turbio, Tocuyo y Tuy (Yánes, 1980; Rojas, 1983; Andara, 1993).

Las investigaciones realizadas en la década de los años 80 en la cuenca del Río Tuy mostraron un alto índice de contaminación, así como de algunos de sus principales afluentes debido a las actividades industriales, domésticas y agrícolas que se desarrollan en la cuenca, Angulo (1980), Yánes (1980), Pineda (1982). Sin embargo, desde entonces poco se conoce del estado actual del sistema, en la fase de sólidos disueltos, por lo tanto al conocer estas condiciones de la cuenca, se tendrá información acerca de los cambios que han ocurrido en el grado de contaminación, considerando que hoy en día el incremento poblacional e industrial de la zona ha sido considerable y que actualmente se cuentan con técnicas y equipos más sofisticados para los análisis químicos de los elementos presentes en las aguas, así como en sedimentos de la cuenca del Río Tuy.



Una vez evaluado el sistema y conociendo el grado actual de contaminación del Río Tuy, se tendrá información sobre cuáles son las diferentes fuentes de contaminantes aportadas al sistema, por lo cual se pueden tomar medidas de tratamiento hacia estas fuentes, con el propósito de minimizar estos aportes, permitiendo que el río pueda autopurificarse y así aprovechar sus aguas para diversas actividades; de igual manera se pueden establecer mecanismos para el tratamiento de estas aguas contaminadas así como programas de potabilidad para destinar sus aguas al consumo humano y al abastecimiento, considerando la problemática de la escasez que hoy día se vive en el país, que conlleven a beneficiar a las poblaciones, al medio ambiente y al ecosistema en general.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, el siguiente proyecto plantea realizar un estudio de la composición química de las aguas que drenan la cuenca del Río Tuy, para lo cual se proponen los siguientes objetivos:

Objetivo General:

- Realizar un estudio geoquímico de los sólidos disueltos de la cuenca del Río Tuy.

Objetivos Específicos:

- Estudiar la variación de los parámetros fisicoquímicos correspondientes a pH, Eh, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura y alcalinidad en las aguas de la Cuenca del Río Tuy.
- Determinar la concentración de los elementos mayoritarios Na, K, Ca, y Mg en los sólidos disueltos de la cuenca del Río Tuy.
- Determinar la concentración de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^{2-} en los sólidos disueltos de la cuenca del Río Tuy.
- Determinar la concentración los elementos Si y P en los sólidos disueltos de la cuenca del Río Tuy.
- Determinar la concentración de los metales pesados Al, Fe, Co, Mn, Ni, Cu, Pb y Zn en los sólidos disueltos de la cuenca del Río Tuy.
- Identificar las zonas más contaminadas por las distintas fuentes a lo largo de la cuenca del Río Tuy.



MARCO TEÓRICO.

Fundamentos Teóricos.

Composición de las aguas de río:

Las aguas de los ríos están constituidas por tres fases principales correspondientes a sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sedimentos de fondo (Sabater, 2009). Los dos primeros son componentes del cuerpo de agua que pueden separarse por procesos de filtración y/o centrifugación (Blanco, 2007). Por su parte, los sólidos disueltos han sido definidos como partículas cuyo tamaño es menor a $0,45 \mu\text{m}$, estos se componen de sólidos coloidales y disueltos, estos últimos son moléculas o iones que se encuentran diluidos en el agua. La concentración de sólidos disueltos en el agua se debe a la presencia de minerales, gases (productos de la descomposición de la materia orgánica), metales y compuestos químicos orgánicos, los cuales dan color, olor, sabor y eventualmente toxicidad al agua que los contiene (Jiménez, 2002).

La composición química de las aguas superficiales está ligada a cinco factores principales: clima, litología y relieve, incluyendo además la vegetación y las actividades humanas (Dargam, 1998).

El clima es caracterizado en base a la temperatura media y a la precipitación atmosférica. Los procesos de meteorización de las rocas son acelerados a mayores temperaturas; por otra parte, las altas precipitaciones producen un aumento en el caudal de los ríos lo cual implica una disminución la concentración de los sólidos disueltos (debido a una mayor erosión) y un aumento de los sólidos suspendidos (Gibbs, 1967).

Por otro lado, en zonas de bajo relieve predominan los procesos de floculación, sedimentación y meteorización química favoreciendo una mayor cantidad de sólidos disueltos (Gibbs, 1967).



Los ríos cuando reciben efluentes de diferentes fuentes, tienen la capacidad de autopurificarse y lo hacen a través de mecanismos fisicoquímicos tales como intercambio iónico, adsorción, acomplejamiento, floculación, coprecipitación. (Blanco, 2007). A continuación se presenta la descripción de dichos parámetros.

Procesos físico-químicos que ocurren en los sistemas naturales:

Intercambio Iónico

El intercambio iónico es un proceso mediante el cual los iones existentes en una fase sólida y una fase líquida que por ella circula, se intercambian entre sí tendiendo a igualar las concentraciones en la fase líquida y en la fase sólida. Este proceso afecta principalmente a los minerales de arcilla (Martínez, 2003). El intercambio iónico es un proceso de gran utilidad en procesos de ionización del agua, purificación de soluciones, ablandamiento del agua y separaciones de iones (Skoog, *et al* 2001).

Adsorción

Es un proceso por el que una sustancia (gas, líquido o sólidos) queda retenida en la superficie de un sólido (Skoog, *et al* 2001). Con el término adsorción se indica la existencia de una sustancia particular a una concentración mayor en la superficie de un líquido o sólido de la que es observada en el resto del sistema (Glasstone, 1972).

Coprecipitación

Es un proceso en el cual los componentes que normalmente son solubles, son separados de la solución durante la formación de un precipitado. Existen cuatro tipos de coprecipitación: adsorción en la superficie y formación de cristales mixtos los cuales son procesos en equilibrio, y la oclusión y el atrapamiento mecánico que están controlados por la cinética del cristal (Skoog, *et al* 2001).



Acomplejamiento

Es el proceso mediante el cual un número específico de moléculas o iones (ligandos “L”), son unidos a través de enlaces covalentes con un catión o átomo metálico neutro “M” al ceder o compartir con ellos un par de electrones. La mayoría de los iones metálicos reaccionan con donadores de pares de electrones, formando complejos o compuestos de coordinación.

La especie donadora (ligando), debe tener disponible al menos un par de electrones no compartidos para formar el enlace. El acomplejamiento está controlado por las condiciones físico-químicas del medio (Skoog, *et al* 2001).

Precipitación

Es un proceso que describe la formación de sólidos en una solución, mediante el proceso de nucleación. Está determinado por varios factores como la naturaleza de las especies presentes, así como las características físicoquímicas del medio donde tiene lugar el fenómeno (Skoog, *et al* 2001). Existen varios tipos de precipitación tales como la precipitación química, la cual se usa en el tratamiento de residuos peligrosos principalmente para la eliminación de iones de metales pesados del agua. También se tiene la precipitación de metales donde el medio más usado para precipitar los iones metálicos es la formación de hidróxidos (Manaham, 2000).

Floculación

La floculación es un proceso en el que las pequeñas partículas distribuidas en un fluido se adhieren para formar agregados relativamente flojos y sueltos, que pueden estar o no separados microscópicamente (Costa, 2005).



Estos procesos fisicoquímicos ocurrirán en las distintas especies químicas de acuerdo a condiciones que dependen de parámetros fisicoquímicos correspondientes a pH, potencial redox, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura y alcalinidad.

Descripción de los parámetros físico-químicos en el análisis de los cuerpos de agua:

pH:

El pH o la actividad de iones hidrógeno indica, a una temperatura dada, la intensidad de las características ácidas o básicas del agua. Matemáticamente se define como el logaritmo negativo de la actividad de iones hidrógeno (APHA, 1995)

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Donde $[\text{H}^+]$ es igual a la actividad de los iones hidrógeno en mol/L. Debido a las interacciones en todas las soluciones, excepto en las muy diluidas, es necesario utilizar la actividad de un ión y no su concentración molar. El uso del término pH supone que se está considerando la actividad del ión hidrógeno. La equivalencia aproximada con la molaridad, sólo se considera en soluciones muy diluidas (fuerza iónica < 0,1) (APHA, 1995). En soluciones acuosas, el pH está controlado por las reacciones que producen o consumen H^+ incluyendo disociaciones de ácidos y bases.

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua. El pH se utiliza en las determinaciones de alcalinidad y dióxido de carbono y en muchos otros equilibrios ácido-base (APHA, 1995).

Las aguas naturales tienen normalmente valores de pH entre 4 y 9, la mayoría son ligeramente básicas debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos (APHA, 1995).

Potencial redox:

Esta magnitud mide la capacidad global de un agua de proceder por sí misma la oxidación o reducción de sustancias. Es decir, un agua con un elevado potencial redox contendrá apreciable cantidad de oxígeno, siendo enriquecida en compuestos en estado oxidado: Fe y Mn en sus estados superiores de oxidación, sulfatos, nitratos,



fosfatos, etc. Por el contrario un agua con bajo potencial redox contendrá abundantes compuestos en estado reducido (sulfuros, amoníaco y materia orgánica difícilmente mineralizable) (Marín, 2003). Este parámetro indica el carácter oxidante-reductor de las especies disueltas en el agua, en consecuencia esta medida puede identificar en una forma indirecta el grado de contaminación, especialmente orgánica (Yánes, 1980).

Conductividad

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura del medio. Las soluciones de la mayoría de los ácidos, bases y sales presentan coeficientes de conductividad relativamente adecuados. A la inversa, las moléculas de los compuestos orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas tienen una conductividad muy escasa o nula. La conductividad se expresa en milisiemens por metro (mS/m) (APHA, 1995).

La conductividad tiene mucha importancia en el campo, porque es un buen criterio de grado de homogenización y mezcla de un cuerpo de agua en un punto de recolección determinado en ese tiempo. Además, las medidas de conductividad realizadas en campo dan una idea del contenido de sales disueltas y por lo tanto del grado de contaminación inorgánica por sólidos disueltos en el agua, los cuales se han vertido en el río por actividad humana, en una zona determinada (Pineda, 1982).

Oxígeno disuelto

La concentración en equilibrio de oxígeno disuelto (OD) en agua en contacto con el aire es función de la temperatura y presión y en menor grado, de la concentración de otros solutos (Hem, 1985). Los niveles de oxígeno disuelto dependen de las actividades físicas, químicas y bioquímicas que se desarrollan en los cuerpos de agua. A 5°C el valor de OD en equilibrio es 12,75 mg/L; a 30°C la concentración es 7,54 mg/L (APHA 1995).



La solubilidad del oxígeno en el agua es afectada por la temperatura y por la concentración de sales disueltas; a elevadas temperaturas y altas concentraciones de sales, la solubilidad del oxígeno disminuye (Jiménez, 2002). La concentración de oxígeno disuelto puede disminuir por procesos que la consumen tal como la materia orgánica precipitada, suspendida o disuelta (Hem, 1985).

Temperatura

Este parámetro influye en las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos (sólidos, líquidos o gases, principalmente O₂) y en el desarrollo de la vida. Cuando las temperaturas son mayores (alrededor de 40°C) se favorece el desarrollo de microorganismos y aumentan los problemas de sabor, olor, color y corrosión (Jiménez, 2002).

La temperatura de aguas residuales generalmente es alta debido a la adición de agua caliente procedente de casas y actividades industriales. El valor de temperatura se requiere para la determinación de un gran número de parámetros o propiedades del agua, tales como la alcalinidad, el índice de saturación y la conductividad (Jiménez, 2002).

Alcalinidad:

La alcalinidad de un agua es su capacidad para neutralizar ácidos y constituye la suma de todas las bases titulables. El valor medido puede variar significativamente con el pH del punto final utilizado. La alcalinidad es una medida de una propiedad agregada del agua, y solamente puede interpretarse en términos de sustancias específicas cuando se conoce la composición química de la muestra (APHA, 1995).



La alcalinidad es importante en muchos usos y tratamientos de aguas naturales y residuales. En muchas aguas de superficie, esta depende primordialmente de su concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, por lo que suele tomarse como una indicación de la concentración de estos componentes. La determinación de alcalinidad es utilizada en la interpretación y el control de los procesos de tratamiento de aguas limpias y residuales (APHA, 1995).

Las aguas naturales adquieren su alcalinidad mediante la disolución de rocas básicas carbonatadas (Rodríguez, 2009).

Fuentes contaminantes en aguas naturales

Fuentes domésticas:

Entre estas fuentes destacan las llamadas aguas residuales domésticas, las cuales comprenden las aguas negras y de cloaca procedentes de las viviendas (Da Ros, 1995). Las concentraciones urbanas de población constituyen una de las mayores fuentes de contaminación, debido a los grandes volúmenes de aguas residuales domésticas producidas, las cuales en su mayor parte, son colectadas por los sistemas de alcantarillado. Debido al rápido crecimiento de las ciudades, la mayoría de las áreas suburbanas no se encuentran conectadas a los sistemas de alcantarillado, disponiendo sus aguas residuales directamente a los cuerpos de aguas (Raudel, 2002).

La facilidad del manejo de las aguas residuales dependerá del tipo de fuente de que se trate, considerándose controlables las conducidas por sistemas de alcantarillado separados y no controlables a todas aquellas que no estén conectadas al sistema (Raudel, 2002).

Fuentes industriales

Son las descargas que provienen de la industria y cuyas características dependen de la naturaleza de la fábrica (Jiménez, 2002). Estas se originan durante el desarrollo de actividades correspondientes a la extracción y transformación de recursos naturales en bienes de consumo para la población. La actividad industrial está integrada por una



variedad muy amplia de procesos, contándose entre los principales los de la industria química, la petroquímica, de los plásticos, de ensamble electrónico, la metalúrgica, la textil, la del azúcar y la de los alimentos. Cada una de estas industrias descarga volúmenes considerables de aguas residuales, cuya naturaleza fisicoquímica dependerá del tipo de proceso a que se refiera, pudiendo ser materia orgánica, nutrientes, metales pesados, ácidos, bases, sustancias inorgánicas, grasa y aceites, entre otros (Raudel, 2002).

-Fuentes agrícolas.

Son los efluentes de instalaciones dedicadas a la crianza de ganado, así como las aguas de retorno de los campos agrícolas. El uso en la actividad agrícola de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes, para el control de plagas y aumento de la productividad, trae como consecuencia que las aguas de retorno agrícola arrastren restos de estos compuestos hasta los cuerpos receptores. Esto aunado a los arrastres de las excretas animales por las aguas de escorrentía, produce una fuente considerable de contaminación que altera los ecosistemas acuáticos (Raudel, 2002).

El control y manejo de las aguas de retorno agrícola es difícil, debido a que las grandes áreas de riego tienen varias descargas, principalmente en época de lluvia. Cuando los restos de fertilizantes llegan a los cuerpos de agua, provocan un indeseable crecimiento de plantas acuáticas (Raudel, 2002).

Al estudiar la contaminación del agua es importante considerar su relación con el suelo, por lo cual se debería analizar los efectos que producen los contaminantes químicos que se utilizan en los cultivos y que a través de las partículas del suelo, llegan a los ríos y a las aguas subterráneas (Da Ros, 1995).

Clasificación de las aguas de acuerdo a sus usos

De acuerdo con el decreto 883 de la gaceta la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 35.445, las aguas se pueden clasificar en varios tipos y subtipos dependiendo del uso que se les de las misma (Tabla 1)


Tabla 1: Clasificación de las aguas según sus usos (Decreto 883)

Tipo	Subtipo	Características
Tipo 1: Aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él.	1A	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes
	1B	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.
	1C	Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional.
Tipo 2: Aguas destinadas a usos agropecuarios.	2A	Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano.
	2B	Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario.
Tipo 3		Aguas marinas o de medios costeros destinadas a la cría y explotación de moluscos consumidos en crudo.
Tipo 4: Aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia.	4A	Aguas para el contacto humano total.
	AB	Aguas para el contacto humano parcial.
Tipo 5		Aguas destinadas para usos industriales que no requieren de agua potable
Tipo 6		Aguas destinadas a la navegación y generación de energía.
Tipo 7		Aguas destinadas al transporte, dispersión y desdoblamiento de poluentes sin que se produzca interferencia con el medio ambiente



De acuerdo con datos proporcionados por el Laboratorio Nacional de Hidráulica, las aguas del río Tuy desde su nacimiento hasta San Francisco de Yare son clasificadas como 1B, y a partir de esta zona hasta su desembocadura, son utilizadas como aguas tipo 7.

A continuación se presentan los límites máximos de valores de parámetros fisicoquímicos para las aguas tipo 1B (Tabla 2) y tipo 7 (Tabla 3); y los valores máximos de concentraciones para las aguas 1B (Tabla 4).

Tabla 2: Valores máximos permitidos para parámetros en las aguas tipo 1B (Decreto 883)

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D)	mayor de 4,0 mg/l. Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%.
pH	mínimo 6,0 y máximo 8,5.
Color real	menor de 150, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 250, UNT.
Fluoruros	menos de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 10000 NMP por cada 100 ml.

Tabla 3: Valores máximos permitidos para parámetros fisicoquímicos en las aguas tipo 7 (Decreto 883)

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (OD)	mayor de 3 mg/l.



Tabla 4: Valores máximos permitidos para concentración de compuestos en las aguas tipo 1B (Decreto 883)

Elementos compuestos	Límites
Aceites minerales	0,3 mg/l
Aluminio	0,2 mg/l
Arsénico total	0,05 mg/l
Bario total	1,0 mg/l
Cadmio total	0,01 mg/l
Cianuro total	0,1 mg/l
Cloruros	600 mg/l
Cobre total	1,0 mg/l
Cromo total	0,05 mg/l
Detergentes	1,0 mg/l
Dispersantes	1,0 mg/l
Dureza, expresada como CaCO ₃	500 mg/l
Extracto de carbono al cloroformo	0,15 mg/l
Fenoles	0,002 mg/l
Hierro total	1,0 mg/l
Manganeso total	0,1 mg/l
Mercurio total	0,01 mg/l
Nitritos + Nitratos (N)	10,0 mg/l
Plata total	0,05 mg/l
Plomo total	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sodio	200 mg/l
Sólidos disueltos totales	1500 mg/l
Sulfatos	400 mg/l
Zinc	5,0 mg/l

Comportamiento geoquímico de las especies determinadas:

Especies mayoritarias Na, K, Ca y Mg

El Na es el elemento más abundante del grupo de los metales alcalinos. Está abundante en rocas ígneas y sedimentarias. El Na es retenido por adsorción en la superficie de los minerales, especialmente en aquellos con alta capacidad de intercambio catiónico, como las arcillas. El Na en aguas cuya concentración de sólidos disueltos es menor a 1000 mg/L está generalmente en la forma de Na⁺; sin embargo, en soluciones más concentradas se pueden formar una variedad de complejos (Hem, 1985). La abundancia promedio de sodio en ríos es de 6,3 mg/L. Sus componentes son usados en muchas aplicaciones que incluyen fertilizantes y en el tratamiento químico de aguas, entre otras (APHA, 1995).



Por otro lado, el K, en comparación con el Na, es menos común en rocas ígneas pero es más abundante en rocas sedimentarias. Este es liberado con más dificultad de minerales silicatos y exhibe una fuerte tendencia a ser reincorporado en los sólidos productos de la meteorización, especialmente en ciertos minerales de arcillas. En muchas aguas naturales la concentración de K es menor que la de Na (Hem, 1985).

Los principales minerales de K en rocas son los feldespatos ortoclasa y microclino (KAlSi_3O_8), las micas y los feldespatoides como la leucita (KAlSi_2O_6). Los feldespatos potásicos son resistentes al proceso de meteorización. En sedimentos, el K está presente en feldespatos inalterados o partículas de micas o en illita u otros minerales de arcilla (Hem, 1985). La abundancia promedio de K en ríos es 2,3 mg/L (APHA, 1995).

Con respecto al Ca, éste es un constituyente esencial de muchos minerales de rocas ígneas, especialmente de la cadena de silicatos como piroxenos y anfíboles, y los feldespatos. El Ca también ocurre en minerales silicatos que son producidos en el metamorfismo. En rocas sedimentarias la forma más común de Ca son los carbonatos en las dos formas cristalinas, calcita y aragonito (CaCO_3) y la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Otros minerales que incluyen a este elemento son el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrita (CaSO_4), fluorita (CaF_2). (Hem 1985).

Los equilibrios donde participan los carbonatos son el factor principal en la limitación de la solubilidad de Ca en muchas aguas naturales. Su concentración promedio en aguas de río es de 15 mg/L (Hem 1985).

El Mg en algunos aspectos tiene efectos similares al Ca, sin embargo el comportamiento geoquímico es diferente. En rocas ígneas, el Mg es un constituyente mayoritario de minerales ferromagnesianos como olivinos, piroxenos, anfíboles y micas oscuras. En rocas alteradas se encuentran en especies tales como clorita y serpentinita. En rocas sedimentarias, el Mg está presente en forma carbonatos tales como la magnesita y la dolomita (Hem, 1985). En aguas naturales, la forma predominante del



magnesio será el ión Mg^{2+} . La abundancia promedio en aguas de ríos es 5 mg/L (APHA, 1995).

Metales pesados Al, Fe, Mn, Ni, Co, Cu y Zn

Los metales pesados más frecuentes en los ríos de nuestro planeta suelen encontrarse, salvo en casos de contaminaciones específicas, a nivel de elementos traza, presentando unas concentraciones que para algunos de los metales más habituales oscilan entre $10^{-12}M$ y $10^{-8}M$ (Rodríguez, 2009).

El Al es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre; sin embargo, raramente ocurre en solución en aguas naturales en concentraciones mayores a 50 o 100 mg/L. La concentración es baja en aguas naturales a pH cercano a 7 porque está limitada por la solubilidad de sus óxidos e hidróxidos. (Hem, 1985). El Al se encuentra en grandes cantidades en muchos minerales de rocas ígneas como los feldespatos, feldespatoides, las micas y anfíboles. En la meteorización de las rocas ígneas, el Al es retenido en nuevas especies sólidas algunas de las cuales pueden estar enriquecidas en aluminio. El catión Al^{3+} predomina en muchas soluciones en las cuales el pH es menor que 4, y su concentración promedio en ríos es 400 $\mu g/L$ (APHA, 1995).

Por su parte, el Fe presenta un comportamiento químico y una solubilidad en agua que depende en gran medida de las condiciones redox del sistema, así como del pH (Hem, 1985). Este elemento proviene de la disolución de rocas y minerales que lo contienen, así como de las aguas residuales provenientes de la producción de acero y otros materiales. El Fe se encuentra en las aguas naturales superficiales con una concentración que varía entre 0,01 mg/L y 0,30 mg/L (Marín, 2003).



El Fe está presente en aguas naturales como Fe^{2+} o Fe^{3+} . En presencia de oxígeno, el ión ferroso es inestable y forma partículas coloidales insolubles de hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$. El Fe, al igual que otros elementos como Si, Al y P, es transportado en agua sólo en forma de partículas coloidales o micelas, las cuales son decenas de veces más grandes que las partículas en soluciones moleculares (Polevoy, 1996).

El Mn es un elemento cuya concentración promedio en ríos es de $7 \mu\text{g/L}$ aproximadamente (APHA, 1995). Su mineral más frecuente es la pirolusita (MnO_2). El contenido de Mn en aguas naturales oxigenadas son bajos debido a que los compuestos de Mn más solubles son los de Mn^{2+} y esta especie es minoritaria en ambientes oxidantes (Marín, 2003)

El Mn en aguas naturales se puede encontrar en varias formas químicas tales como especie disuelta, en forma coloidal o formando complejos variados por lo que la asociación entre Mn y materia orgánica que conduce a la formación de complejos Mn-materia orgánica es muy común; de igual manera según el estado de oxidación se formarán distintos complejos: el Mn^{2+} es acomplejado por fluoruro, fosfato, oxalato y compuestos aminados; mientras que el Mn^{3+} forma complejos clorurados, fosfatados, sulfatados, cianurados y con oxalato; finalmente, el Mn^{4+} forma complejos con cloruro, fluoruro y cianuro. (Marín, 2003).

El Ni presenta una concentración promedio en ríos de aproximadamente $1 \mu\text{g/L}$ (APHA, 1995), no obstante de acuerdo con Marín (2003) no suelen superar los 5 a $10 \mu\text{g/L}$. Este elemento puede sustituir al Fe en minerales ferromagnesianos de rocas ígneas y tiende a ser coprecipitado con óxidos de hierro y especialmente con óxidos de manganeso. En soluciones acuosas el Ni se encuentra en estado de oxidación como Ni^{2+} (Hem, 1985). El níquel permanece en forma iónica en las aguas a pH de 4,5 a 7,0. Cuando las fases sólidas, suspendidas o en sedimentos están incluidas en el sistema, los óxidos amorfos de hierro y manganeso son importantes sumideros de níquel (Sigel, 1988).



En soluciones acuosas pueden formarse complejos como $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, El Ni puede formar complejos con ligandos orgánicos. El níquel en la naturaleza puede encontrarse como níquel nativo, formando arseniuros, sulfuros, tales como como la pentandlita $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ (Sigel, 1988).

Por su parte el Co, el cual ocurre en estados de oxidación 2^+ y 3^+ , puede estar sustituyendo al hierro en minerales ferromagnesianos. La coprecipitación o adsorción de Co por óxidos de manganeso y hierro parece ser un factor importante en el control de la cantidad de Co que puede ocurrir en solución en las aguas naturales. Cuando el cobalto se asocia con óxidos de manganeso, el estado de oxidación es Co^{3+} y no son termodinámicamente estables bajo las condiciones de pH y Eh que ocurren comúnmente en aguas naturales (Hem, 1985). Las concentraciones de Co en aguas de río son muy pequeñas y la mayoría de los datos lo reportan “por debajo del límite de detección”. En líneas generales las aguas no contaminadas no deben tener más de unos pocos microgramos por litro de Co (Hem. 1985).

Por otro lado, Cu tiene una concentración promedio en ríos de 4 a 12 $\mu\text{g/L}$ (APHA, 1995). Este es un elemento metálico que se encuentra en la naturaleza en forma elemental, o bien formando variados compuestos como óxidos, sulfatos complejos y carbonatos. Dicho elemento puede ocurrir en solución como Cu^+ o Cu^{2+} , sin embargo las condiciones redox en aguas oxigenadas favorecen la forma oxidada. Los iones cúpricos forman complejos con una gran variedad de ligandos. En soluciones con pH mayor a la neutralidad puede predominar la forma $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$ (Hem, 1985).

El Zn tiene un único estado de oxidación Zn^{2+} . Los datos de solubilidad del mismo sugieren que las aguas que contienen 610 mg/L de HCO_3^- podrían contener menos de 100 pg/L de Zinc en un rango de pH de 8,0 a 11. En equilibrio con el silicato de zinc willemita, la solubilidad de Zn puede ser menor a 10 pg/L . Un factor que puede inhibir las concentraciones de Zn en aguas naturales es la probabilidad de interacciones con superficies minerales preexistentes, a través de procesos de adsorción, intercambio



iónico, coprecipitación (Hem, 1985). Su concentración promedio en aguas de río es aproximadamente 20 $\mu\text{g/L}$ (APHA, 1995).

Especies aniónicas: Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y NO_2^-

La concentración de Cl^- en aguas de superficie no contaminadas se sitúa alrededor de 20-40 mg/L , incluso menores. En ríos, es típico el incremento de Cl^- a lo largo del recorrido del cauce fluvial desde su nacimiento hasta su desembocadura. El Cl^- , junto con fosfatos y nitritos, es un indicador típico de contaminación residual doméstica vertida a un cauce natural (Marín, 2003). El mineral más abundante que contiene Cl^- es la halita (NaCl), así como otros minerales como la silvita (KCl), la carnalita ($\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y la kainita ($\text{KCl}\cdot\text{MgSO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Los Cl^- también se hallan presentes en zonas de alteración de menas metálicas y en mineralizaciones producidas por precipitación fisural de salmueras diagenéticas (Carles, 2003).

Por su parte, las concentraciones de F^- en aguas naturales es baja, generalmente menor a 1,0 mg/L (Hem, 1985). Las fuentes de F^- incluyen fluorita y apatito, así como anfíboles y micas, los cuales pueden contener F^- el cual reemplaza la parte del OH^- . En soluciones ácidas, el F^- puede estar asociado con sílice en estructuras hexacordinadas o tetra-coordinadas tales como SiF o SiF_4 ; sin embargo, en aguas naturales es raro que se den las condiciones requeridas para la estabilidad de estas dos especies. Los complejos de fluoruro de aluminio son encontrados en aguas cuyo pH está por debajo de la neutralidad (Hem, 1985).

En cuanto al SO_4^{2-} , este puede provenir de la meteorización química de los minerales presentes en las formaciones geológicas o por la oxidación biológica de especies reducidas de sulfuro (Faust, 1998).

El SO_4^{2-} ocurre principalmente en minerales evaporíticos tales como yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrita (CaSO_4), eponita ($\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Una fuente importante de SO_4^{2-} es la meteorización química de pirita



(FeS₂), la cual produce aniones S₂²⁻ a la fase de agua. A su vez, estos aniones sulfuro son oxidados en sistemas microbiológicos a sulfato. Como en el transcurso de esta oxidación se producen iones hidrógeno, resultan aguas con valores de pH ácidos (Faust, 1998).

La concentración de SO₄²⁻ en aguas naturales es variable dependiendo de la fuente geológica. El yeso es soluble en agua y puede producir sulfato con concentraciones mayores a 1000 mg/L. La influencia de la disolución de pirita y la subsiguiente oxidación a SO₄²⁻, puede ser vista en aguas ácidas de minas de carbón (Faust, 1998).

En las aguas el N se encuentra como iones NO₃⁻, NO₂⁻ y NH₄⁺, pudiendo este ser de origen orgánico o inorgánico. La presencia de iones NO₃⁻ en aguas, indica que los compuestos orgánicos nitrogenados han sido completamente oxidados. Por su parte, los iones NO₂⁻ pueden ser encontrados en aguas superficiales como en aguas subterráneas. Las concentraciones de NO₂⁻ son normalmente bajas; una alta concentración puede indicar la presencia de bacterias patógenas. Por lo tanto, los iones NO₂⁻ son usados para indicar si el agua es potable (Polevoy, 1996).

Especies inorgánicas: Si y P.

El Si tiene una concentración aproximada de 14 mg/L en aguas subterráneas y superficiales (APHA, 1995). Este se encuentra en prácticamente todas las rocas (silicatos, feldspatos), siendo los de más alta solubilidad los de Na y K que se disuelven durante el proceso de meteorización de las rocas.

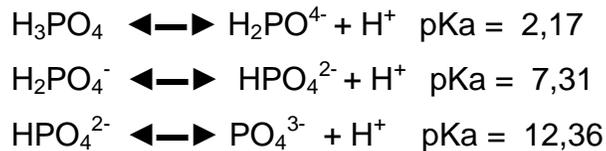
El Si en agua corresponde a dos estados: sílice coloidal o disuelta (ácido silícico). Estas dos especies se hallan en un equilibrio de polimerización y despolimerización como el siguiente:





La solubilidad de la Si coloidal a 25°C, es de unos 120-1240 mg/L, y es afectada por otros iones en solución (el Al³⁺ lo precipita) y por su disociación (pH>9) que incrementaría la solubilidad (Marín, 2003).

En cuanto al P, este ocurre en la naturaleza casi exclusivamente como PO₄³⁻, el estado completamente oxidado con un número de oxidación 5 y un número de coordinación 4. El PO₄³⁻ se encuentra como ortofosfato en los minerales (Stumm, 1970), y en aguas es el producto final de la disociación del ácido fosfórico H₃PO₄ la cual ocurre en cuatro pasos, siendo las especies participantes: H₃PO₄, H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻ y PO₄³⁻, las cuales dependerán del pH del medio. (Hem, 1985)



Se estima que el PO₄³⁻ inorgánico disuelto en las aguas de río, tiene un promedio de 10 µg/L y como P disuelto total alrededor de 25 µg/L (Hem 1985). La forma mineral más común es el apatito, el cual es un fosfato de calcio con cantidades variables de OH⁻, Cl⁻ y F⁻ y algunas impurezas (Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH)) (Hem, 1985).



Antecedentes

A continuación se presentan algunas investigaciones que fueron utilizadas como referencias importantes a la hora de interpretar los resultados de este trabajo. En este sentido, en Venezuela se han realizado los siguientes estudios:

El primer proyecto integral de estudio en el Río Tuy fue realizado por Angulo (1980), Colina (1980), Del Guidice (1980), Rodríguez (1980) y Yánes (1980), este incluyó la determinación de Cu, Zn, Fe, Mn, Co, Cd, Ni, V, Pb, Ag, Cr, Mo, Hg, K, Na, Mg, Ca, Si, Al, P, F, Cl, I, Br, S (H_2S y SO_4^{2-}), N (NO_2^- y NO_3^-), C (HCO_3^- y CN^-) en 51 muestras de aguas y sedimentos, y la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, eH, conductividad y temperatura en las épocas de lluvia y sequía. Los resultados indicaron que la zona más contaminada se ubica entre El Consejo-Guayas debido a las descargas industriales donde se detectaron las mayores concentraciones de P, Zn, Cu y Si, y Araguaita-Boca de Paparo debido a las descargas urbanas. La zona menos contaminada fue entre La Llanera y El Consejo cuyas aguas presentaron los menores valores de conductividad, mayor pH y Eh, así como la menor concentración de Al, Cu, Zn y P. El aporte de los ríos Guare, Ocumarito y Taguaza mejoran la calidad del río, ya que producen efecto de dilución ayudando a contrarrestar un poco, el efecto producido por los afluentes contaminados. Inversamente, los ríos más contaminados que deterioran las aguas del río Tuy, corresponden a los ríos Guaire y Caucagua.

La influencia del Río Tuy sobre la costa del Mar Caribe fue determinada a través del estudio de los parámetros pH, Eh, oxígeno disuelto, salinidad y alcalinidad, así como las concentraciones de Ca, Mg, Na, K, Cl, Sr, S, Zn, Cu y Pb en la zona de Boca de Paparo por Arrieche (1980). Los resultados indicaron que el área del mar que está siendo influenciada por el Río Tuy es de aproximadamente unos 20 km².



Las aguas del Río Tuy fueron estudiadas en otro proyecto global por Pineda (1982), Raíces (1982) y Rivera (1982), mediante la determinación de las especies Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{+2} , Cl^- , HCO_3^- Cu, Co, Cr, Mn, Ni, Fe, Pb, Zn, Al, N-(NO_3^- , NH_4^-), P-(PO_4^{3-}) y DQO, para establecer el grado de contaminación de la cuenca. Adicionalmente se realizaron medidas de campo de parámetros fisicoquímicos correspondientes a pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura. Como resultado la zona El Consejo-Tácata y Araguaita-Agua Clara; fueron las que presentaron mayor grado de contaminación debido a las actividades industriales (en El Consejo-Tácata) domésticas y agropecuarias (Araguaita-Agua Clara) que se desarrollan en la zona. En este sentido, el Cr, Cu, Pb y Zn se inyectan como contaminantes afectando a las zonas Guayas, Tácata, Araguaita y Panaquire; mientras que, el Fe, Mn, Ni y Co tienen un control natural. Los afluentes ríos Guare, Tarma, Ocumarito, Sucuta, Taguaza, Cuira, Panaquirito y Sapo, así como las quebradas Urba y Yaguapo, fueron considerados como no contaminados y por lo tanto utilizados como referencia; mientras que ríos Guaire y Caucagua, y la quebrada Guayas presentan alto grado de contaminación, siendo los dos primeros los responsables de la contaminación encontrada en el río Tuy en el sector de Araguaita-Agua Clara.

El estudio de sólidos disueltos en muestras de agua de la Cuenca del Río Tuy fue realizado mediante la determinación de la concentración de los elementos Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^- y HCO_3^- para establecer el grado de contaminación utilizando como referencia la concentración de estos elementos en los afluentes no contaminados del río por Cazaña (1983). Este autor realizó el muestreo en 24 puntos a lo largo del río, simultáneamente aplicó medidas de campo de los parámetros conductividad y temperatura. Como conclusión se obtuvo que la zona más contaminada estuvo entre El Consejo y Tácata debido a las descargas industriales y municipales que el cuerpo de agua recibe en esta zona. Los ríos que más deterioran las aguas del Tuy son Guaire y Caucagua; mientras que los afluentes que las mejoran son los ríos Guare, Taguaza y Cuira.



Por su parte, Ramírez (1984), realizó la determinación de la composición química promedio natural de las aguas de la cuenca del Río Tuy y su interacción con la litología drenada, así como el cálculo de la carga transportada por dicho río para determinar el grado de alteración que existe, asimismo este autor investigó la forma de transporte de los elementos en la Cuenca del Río Tuy. Para ello se basó en los resultados obtenidos por los trabajos anteriores del río Tuy, correspondientes a los del año 1980 y 1982. Los resultados obtenidos para PO_4^{3-} , Fe, Al, Mn, Cu, Zn y Ni, indican que son transportados preferiblemente en los sólidos suspendidos y en forma adsorbida, debido a que están relacionados con los procesos de sedimentación. En la hacienda Buen Paso la litología drenada correspondió a calcita debido a las mayores relaciones Ca/Na y Ca/Mg y a las mayores concentraciones de SO_4^{2-} . En el río Tiara hubo disolución de minerales ferromagnesianos por las bajas relaciones Ca/Mg y Na/Mg. El grado de contaminación de la cuenca es alto porque las actividades industriales y agropecuarias equivalen a una mayor cantidad de habitantes en la zona.

Otras cuencas estudiadas correspondieron a los ríos Tigre y Caris, estados Anzoátegui y Monagas por Callejón (1985), ubicadas en uno de los focos de desarrollo de la Faja Petrolífera del Orinoco. Para cada cuenca este investigador tomó puntos de control a lo largo del río y en sus principales afluentes, realizando además medidas de pH, Eh, conductividad y oxígeno disuelto. En el laboratorio determinó de la concentración de Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Pb, Cu, Zn, Cd, Cr, Ba y As, así como Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y fenoles. Los resultados indicaron que en la cuenca del río Tigre hay 3 zonas con influencias: una cuenca alta ubicada en la zona de mayor actividad humana, la cual presentó las mayores concentraciones de metales; una zona media influenciada por la actividad petrolera, con mayor concentración de sodio y cloruro; y una cuenca baja considerada como no intervenida. Por su parte, la cuenca del río Caris presentó características fisicoquímicas de cuenca no intervenida y similares al promedio de la cuenca del río Tigre.



En el occidente del país, está ubicada la cuenca del río Turbio, en la cual Andara (1987) realizó un estudio geoquímico a través de la determinación de la concentración de las especies Na, K, Ca, Mg, Zn, Pb, Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- , de los sólidos disueltos, así como de las medidas de los parámetros fisicoquímicos correspondientes a conductividad, oxígeno disuelto, temperatura, Eh y pH; mientras que en los sedimentos se determinó Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, Mn, Cu, Cr, Cd, Zn, Pb, $\text{C}_{\text{orgánico}}$, $\text{C}_{\text{inorgánico}}$, $\text{C}_{\text{grafito}}$ y C_{total} . La concentración de las especies Na, K y Cl^- fue menor en los sólidos disueltos que los reportados para los ríos de Suramérica, mientras que las de Ca, Mg y SO_4^{2-} fueron mayores, debido a las diferencias litológicas, topográficas y climáticas de la zona de estudio. Con respecto al clima en líneas generales la concentración de especies en sólidos disueltos y sedimentos fue mayor en época de sequía.

Una investigación basada en el estudio de transporte de nutrientes por los ríos Mitare, Tocuyo, Yaracuy, Unare, Neverí y Manzanares, a través de la determinación de la concentración de Na, K, Ca, Mg, Si, C, S, N y P en sólidos disueltos y Na, K, Ca, Mg, Si, Fe, Al, C, S, N y P en sedimentos de fondo y suspendidos fue realizada por Andara (1993) Álvarez (1985), con el objetivo de caracterizar estos cuerpos de agua. Los resultados indican que los ríos Mitare, Tocuyo y Yaracuy presentaron mayores concentraciones de sales disueltas, dominando Ca^{2+} y SO_4^{2-} debido a la disolución y oxidación de minerales pirita y calcita, esto indica que los ríos de occidente son más reactivos, como consecuencia de la poca cobertura vegetal y la gran abundancia de materiales sedimentarios. Los niveles de concentración de C, N y P en el río Yaracuy indican que el mismo está influenciado por las actividades antrópicas de la zona. El transporte de sedimentos suspendidos fue más alto en relación al de sólidos disueltos; las especies P, N y C se transportan con preferencia en la fase suspendida, mientras que el S es transportado en la fase disuelta. Finalmente establece que el transporte de nitrógeno y fósforo depende esencialmente de la escorrentía del área, ya que su abundancia y composición son independientes de la litología drenada, hidrología y geomorfología y el transporte de sales disueltas es una función de la litología drenada y la escorrentía. Por otro lado los resultados obtenidos demuestran que las mayores



concentraciones se presentan en épocas de sequía donde los caudales de dichos ríos son bajos; mientras que las menores concentraciones se presentaron en época de lluvia.

En la zona costera comprendida entre los ríos Yaracuy y el Río Tocuyo fue realizado un estudio geoquímico a través del análisis de 71 muestras de agua para los elementos Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- y la medición de parámetros fisicoquímicos correspondientes a pH, Eh, temperatura, conductividad y salinidad, así como la cuantificación de los sólidos suspendidos por Barreto (2006). Los resultados indican que la abundancia que cationes fue $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$; mientras que la de aniones correspondió a $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$. De acuerdo con este orden de abundancia, este autor clasificó a las aguas como cloruradas sódicas. En las zonas donde encontró altos valores de NO_3^- , este se debió a las contribuciones antrópicas correspondientes a la agricultura, la ganadería y las aguas residuales domésticas de la región.

En cuanto a las investigaciones realizadas en otras partes del mundo, pueden citarse algunos ejemplos característicos de este tipo de estudio.

Entre estos se encuentra el estudio de los ríos en Thohoyandou, Sur-África, realizado por Okonkwo, *et al*, (2005). Durante la fase de campo se realizaron medidas de pH y conductividad mientras que en el laboratorio se efectuaron medidas de los sólidos suspendidos totales y las concentraciones de los metales Cd, Cu, Pb y Zn. Los resultados obtenidos por estos autores indicaron que la concentración de los metales en época de lluvia fue mayor que en sequía. La concentración de Pb en todos los ríos fue la más alta, atribuida a la deposición de partículas de Pb en las carreteras cercanas a los ríos y a las aguas residuales. Los valores de pH no mostraron variaciones en cuanto a la época del año; no obstante que la conductividad y los sólidos suspendidos totales fueron mayores en época de sequía, mientras que la concentración de metales fue mayor en lluvias. Todos los metales, excepto Pb, presentaron bajas concentraciones en la fracción particulada. Cu y Zn se encontraron en la fracción no lábil, lo cual sugiere



que existen en forma de complejos metálicos que no se disocian en la columna y que están asociados más con materiales coloidales y por lo tanto no disponibles. El Cd presentó una distribución casi consistente entre la fracción lábil y no lábil y en época tanto de lluvia como sequía.

El estudio de la influencia natural y antrópica de las concentraciones de metales traza disueltos Mn, Co, Ni, Cu Cd, Zn y Pb, nutrientes inorgánicos N-NH_4^+ , N-NO_3^- , N-NO_2^- y P-PO_4^{3-} y otras variables como conductividad, pH, oxígeno disuelto (OD) y sólidos suspendidos (SS), en sequía y lluvias, fue una investigación realizada en las aguas del río Guadalquivir por Mendiguchía, *et al* (2007). Estos investigadores tomaron 3 muestras en cada punto de muestreo para la determinación de sólidos suspendidos, nutrientes y metales respectivamente. El Cu y el Mn fueron analizados con espectrometría de absorción atómica, mientras que para la determinación Co, Ni, Zn Cd y Pb, las muestras fueron preconcentradas y luego determinadas por Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS). Como resultado fueron identificadas 3 zonas con diferentes características en sus aguas: las influenciadas por aguas residuales, por agricultura y por procesos estuarinos. Además se identificaron las variables químicas que pueden ser usadas para caracterizar cada zona y su correspondiente actividad; así la calidad de agua de zonas urbanas fue controlada por N-NH_4^+ , N-NO_2^- , Mn y Co; la agricultura por SS, P-PO_4^{3-} y Ni; mientras que Cd, pH y conductividad fueron las variables relacionadas a zonas estuarinas.

La determinación de la composición de los elementos mayoritarios y la identificación de las fuentes y factores que la controlan fue el objetivo del trabajo de Li Siyue, *et al* (2008) en la cuenca del río Han en China. Para ello se tomaron 292 muestras en 47 puntos, en distintas épocas del año correspondientes a 136 en época de lluvia y 156 en sequía. Las muestras fueron filtradas y analizadas para determinarles Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} , mientras que otras fueron acidificadas para determinarles Na, K, Ca, Mg y Si. En el campo se midió temperatura, el pH, la conductividad y los sólidos disueltos totales. Los resultados obtenidos por estos autores indican que las aguas fueron ligeramente



alcalinas con pH de 8,0 a 8,4; los cationes más abundantes fueron Ca y Mg y el menor fue el K, por su parte, el anión más abundante fue el HCO_3^- , seguido de SO_4^{2-} , no obstante que las concentraciones promedios de Cl^- y NO_3^- permanecieron igual. La variación en la composición de los iones mayoritarios indica la influencia de actividades antrópicas y diferentes litologías; de este modo en el afluente Ziwu se encontraron las más bajas concentraciones debido a la gran cobertura vegetal y a la litología granítica. Por su parte, las concentraciones de Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- son atribuidas a fuentes antrópicas, tales como fertilizantes para el caso de NO_3^- . Con las bajas concentraciones de Na y K, debido a que la meteorización de minerales de silicatos juega un papel menos importante en la determinación de iones disueltos.

De igual forma, también en China, se estudiaron las aguas de la meseta Tibetan, mediante el estudio de 4 de sus principales ríos constituidos por Salween, Mekong, Yangtze y Yarlung Tsangpo por Huang, *et al* (2008). Para ello, estos autores se basaron en las determinaciones de los elementos Cu, Pb, Zn, Ag, Mo, Cd, Co, Cr, Ni, Li, Mn, Al, Fe, Mg, y Hg, los cuales fueron medidos por FI-AAS, GFAAS y ICP-OES. Dichos autores también se midieron los parámetros pH y conductividad. Como resultado encontraron que todos los cuerpos de agua estudiados fueron alcalinos, con alta capacidad amortiguadora. Igualmente entre los 33 sitios de los 4 ríos y sus tributarios las concentraciones de Cd, Cr, Cu, Hg, Ag, Zn y Mo fueron despreciables, mientras que Mg, Al y Fe fueron más abundantes. El Mg junto con el Ca contribuyó a la alta conductividad eléctrica de las aguas. El Ni y Pb presentaron altos valores en algunas zonas, sin embargo el origen de estos elementos fue desconocido.

En el río Krka en Croacia, fue estudiada la distribución espacial y temporal de la concentración de metales traza Zn, Cd, Pb y Cu, y sus principales parámetros físico-químicos a lo largo del río, tomando en cuenta todos los tributarios, incluyendo aguas subterráneas por Cukrov, *et al* (2008). Los resultados establecen que las concentraciones de Zn, Cd, Pb y Cu determinados en el agua de río se encuentran entre los valores más bajos reportados en la literatura. El río fue dividido en dos zonas:



superior e inferior, en la zona superior la concentración de elementos traza incrementó significativamente debido a los aportes de las aguas residuales sin tratar que provienen de la ciudad de Krka; mientras que, aguas abajo la concentración de metales traza disminuye porque ocurre un proceso de autopurificación que toma lugar en algunos lagos. En la zona inferior se encontraron bajas concentraciones de metales, esto por la afluencia de las aguas subterráneas limpias provenientes del río Zrmanja.

Finalmente, el estudio de metales y nutrientes en el estuario Severn y el canal Bristol en Gran Bretaña, fue llevado a cabo por Jonas, *et al* (2010) con el fin de determinar su grado de contaminación. Para ello, estos investigadores realizaron medidas de partículas disueltas y suspendidas, nutrientes disueltos y algunas variables que incluyeron salinidad, concentración de material particulado suspendido, saturación de oxígeno disuelto y concentración de clorofila. Los metales analizados Cu, Cr, Pb y Zn fueron determinados por Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo ICP-M. Como resultado señalan que hubo una reducción significativa en la carga de metales contaminantes a excepción del Cr al comparar con los valores obtenidos en el año 1978. Por su parte, la carga de nitrógeno inorgánico total se incrementó en un 25% debido al incremento de nitrato disuelto por diferentes fuentes. Mientras que las medidas de oxígeno disuelto fueron altas, lo cual beneficia a todas las formas de vida. Por otro lado, la concentración de metales disueltos fue baja y se mantuvo baja debido a la captación de metales disueltos en las partículas, determinadas por el alto coeficiente de partición. Los análisis de Cu en los sedimentos intermareales demostraron que hay regiones del estuario donde las elevadas concentraciones de Cu pueden ocurrir porque la hidrodinámica altera la ubicación de los sedimentos contaminados en el sistema.



Zona de estudio

Ubicación

La cuenca del Río Tuy que tiene un área aproximada de 6600 Km², se encuentra ubicada en la región nor-central de Venezuela (Mogollón, 1995). Este río recorre en todo su trayecto una longitud aproximada de 270 Km, (Zambrano, 1970). Las cabeceras del río Tuy se encuentran en la vertiente sur de la Serranía del Litoral a unos 2400 metros de altura, cerca del pico Codazzi, al norte de la Colonia Tovar, Estado Aragua. Allí corre en dirección norte-sur; luego se desvía para tomar una dirección oeste-este hasta su desembocadura en el Mar Caribe, en la zona de Boca de Paparo, Estado Miranda (Picard, 1968) (Figura 1).

La cuenca del río Tuy puede ser dividida en tres partes:

1. Alto Tuy (Colonia Tovar- El Consejo), área aproximada 210 Km²

Comprende el área drenada por el río Tuy y sus afluentes, desde su nacimiento en el Pico Codazzi hasta su desvío al este de la población El Consejo.

2. Tuy Medio (El Consejo- Vigía) área aproximada 3620 Km²
3. Bajo Tuy (Vigía- Boca de Paparo) área aproximada 3130 Km² (Zambrano, 1970).

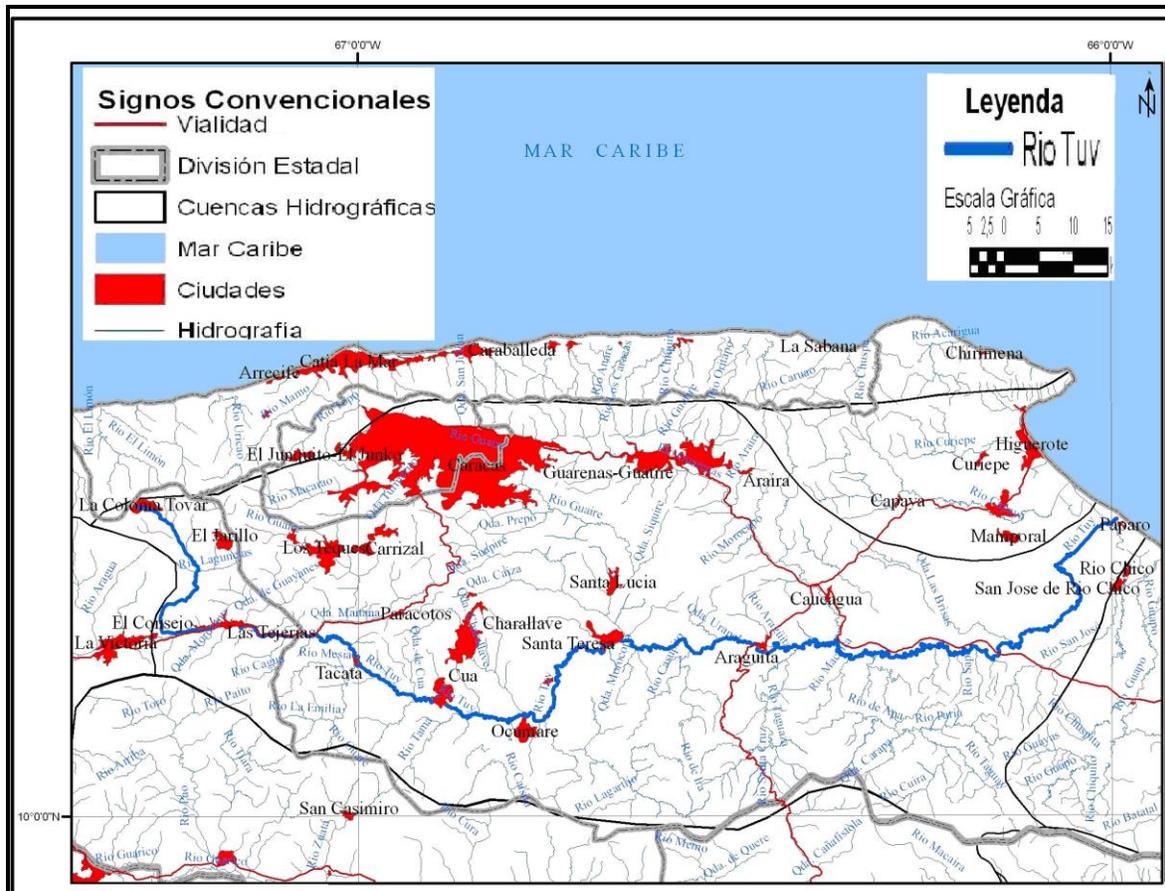


Figura 1: Ubicación del área de estudio; el Río Tuy desde su nacimiento en Pico Codazzi, estado Aragua, hasta su desembocadura en Boca de Paparo, estado Miranda. (Tomado de Base Cartográfica de Venezuela, IGVSB).

Características geológicas de la Cuenca del Río Tuy

Geología regional

La unidad de estudio se ubica en la región nor-central del país y se corresponde principalmente con la cuenca hidrográfica del río Tuy. Presenta tres grandes regiones geomórficas principales que son: a) El complejo rocoso metamórfico correspondiente a las Serranías del Litoral e Interior drenadas por el Río Tuy y sus afluentes; b) Los valles del interior que se ubican entre dichas áreas rocosas, tales como el valle de Caracas, los valles del Alto y Tuy medio y el valle de Guatire-Guarenas; y c) La llanura de Barlovento. Estas unidades geomórficas son complejas y pueden aún ser discriminadas en unidades menores tales como el macizo de Los Altos o de Guacaipuro-Mariches, la cadena litoral Avila-Cabo Codera. (Zambrano, 1970).



-Geología Local

A continuación se presentan las formaciones drenadas por El Río Tuy:

Formación Las Mercedes

Esta formación aflora al noroeste de la Cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy. La unidad consiste de esquistos calcáreo-grafitoso-micáceo-sericíticos, filitas grafitoso-sericíticas, calizas recristalizadas y meta-areniscas; la mayoría de estas rocas son calcáreas (Picard, 1968).

Formación El Caño

La unidad se compone de metatobas laminadas, filitas tobáceas, conglomerados volcánicos, metalavas y “sills” hipabisales y se extiende a lo largo de la Serranía del Interior en los estados Carabobo, Aragua, Miranda y Guárico (González de Juana *et al*, 1980). Las metatobas máficas constituyen el 75% del volumen de rocas dentro de la formación y constituyen la litología más característica de ella. El conjunto de minerales metamórficos cuarzo-albita-pumpellyta-estilpnomelano es el más común y aparecen en casi todas las metatobas (González de Juana *et al*, 1980).

Formación Siquire

Esta formación consiste de areniscas líticas con cemento calcáreo y limonitas bien estratificadas, intercaladas con lutitas laminadas y astillosas con restos de vegetales y peces, conglomerados, algunas calizas y margas. La característica resaltante de la unidad es la interestratificación de capas delgadas con contactos bien definidos y el desarrollo de algunas capas gruesas de conglomerados (Picard, 1968).

Formación Tuy

Es una unidad de sedimentos poco consolidados restringida a la Cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy con localidad tipo en la carretera Petare-Santa Teresa, entre Puente Pichao y La Virginia. El ambiente sedimentario de la formación es fluvio-lacustre (Picard, 1968), La formación Tuy se caracteriza por una intercalación monótona de capas de 1 a 3 m de espesor de gravas heterogéneas y conglomerados líticos mal



consolidados, con matriz limo-arcillosa abundante y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con arcillas y lutitas y cantidades menores de margas y areniscas. (González de Juana *et al*, 1980).

Formación Aramina

La localidad tipo de la Formación Aramina es la quebrada Aramina, tributaria norte del río Tuy, que atraviesa la carretera Caucaagua-Higuerote 7 Km al suroeste de Capaya. La Formación comienza con un conglomerado basal de 50 a 60 m de espesor con estratificación gruesa. Sobre este paquete hay una sección interestratificada de areniscas, conglomerados y calizas impuras, a la que le siguen lutitas de color gris verdoso dominantes y areniscas (González de Juana *et al*, 1980).

Formación Cumaca

La localidad tipo de esta formación es la Quebrada La Cumaca, subtributario del río Tuy, que cruza el camino a Aragüita 7 kilómetros al suroeste de Caucaagua. La sección tipo se extiende desde un punto 515 metros aguas arriba del cruce entre el camino y la quebrada, hasta otro punto ubicado 325 metros aguas abajo del cruce. La unidad se restringe al extremo oeste de la ensenada inferior del Tuy, Miranda oriental. La litología consiste en lutitas grises verdosas y negras, y arcillas lutíticas con un porcentaje relativamente pequeño de areniscas (González de Juana *et al*, 1980).

Características climatológicas de la Cuenca del Río Tuy.

Las temperaturas medias en la Cuenca del Río Tuy se encuentran entre 25° y 30°C, con extremos de 12°C en las noches más frescas del mes de Enero y de 40°C en los días más calurosos del mes de Mayo. Se presentan dos épocas bien definidas: una época lluviosa, en la cual cae el 80% del promedio anual de precipitación y la cual ocurre durante los meses de Mayo a Octubre; y una época de sequía con un 20% del promedio anual de precipitación y que dura desde Noviembre hasta Abril (Zambrano, 1970; Humphreys, 1975).



Relieve de la cuenca del río Tuy:

Las tres áreas fisiográficas del área regional del sur presentan las siguientes características:

1. Áreas de relieve bajo: entre 0 y 200 metros que comprende la Llanura Costera de Barolovento y las Serranías del Litoral e Interior central.
2. Áreas de relieve mediano: Correspondientes a los valles interiores situados en los sistemas montañosos de esta región y cuyas alturas varían entre 200 y 1000 metros.
3. Áreas de relieve alto y accidentado: Comprende las áreas montañosas de las Serranías del Litoral e Interior del tramo Central; con áreas que pueden alcanzar los 1400 metros (Zambrano, 1970).



METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología de la presente investigación estuvo estructurada en dos etapas: una correspondió al trabajo de campo, que incluyó la recolección de muestras y las medidas in situ; y la etapa de laboratorio, que incluyó el tratamiento físico y químico de las muestras recolectadas.

Trabajo de Campo

Captación de muestras

Se establecieron un total de 36 puntos de muestreo, (ver mapa anexo), ubicados lo largo del río Tuy desde su nacimiento en la Colonia Tovar, estado Aragua, hasta la desembocadura en Boca de Paparo, estado Miranda (Tabla 5); así como en los afluentes más importantes, los cuales incluyeron: Quebrada Guayas, Río Guare, Quebrada Cúa, Río Tarma, Río Ocumarito, Quebrada Charallave, Río Marare, Río Súcuta, Río Guaire, Taguacita, Taguaza, Río Caucagua, Río Cuirá, Río Panaquirito, Quebrada Yaguapo, Quebrada Urba y Quebrada Sapo (Tabla 6).

Los puntos de muestreo se seleccionaron tomando en cuenta los siguientes criterios: los resultados de trabajos previos, la litología de la zona, las vías de acceso al lugar y las actividades domésticas, agrícolas e industriales frecuentes en la zona.

La captación y el almacenamiento de las muestras se realizó en envases de polietileno de 1 y 0,5 litro de capacidad, ya que estos envases presentan la ventaja de ser botellas ligeras, bastante inertes, resultando apropiadas para la recolección de muestras in situ. (Sabater, 2009). Además estos presentan resistencia, bajo costo, facilidad de transporte y manejo y una baja adsorción de metales sobre las paredes del recipiente. Los envases destinados a la recolección de muestras para el análisis de metales fueron lavados previamente en el laboratorio con HNO_3 al 10% (v/v), seguido de su lavado con agua destilada y deionizada y luego en el campo se curó tres veces con el agua de río a muestrear.

**Tabla 5:** Puntos de captación de muestra a lo largo del Río Tuy

Nº	Localidad
1	Colonia Tovar
2	H. Buen Paso
3	H. Torre Casa
4	El Consejo
5	H. Santa Teresa
6	Guayas
7	Boca de Cagua
8	Tuy antes Guare
9	Tácata
10	Cúa
11	Ocumare
12	Lagartijo
13	Santa Teresa del T.
14	Taguacita-Tuy
15	Araguita
16	Panaquire
17	El Samán
18	San Juan-Galpones
19	Boca de Paparo

El trabajo de campo fue realizado en 5 campañas, en el año 2010. La primera fue realizada el día 20 de Julio, en ella se recolectaron las muestras correspondientes a los puntos Hacienda Buen Paso, Hacienda Torre Casa, Hacienda Santa Teresa, Guayas y Quebrada Guayas. La segunda campaña correspondió al día 23 de Julio tomando las muestras de Río Guare, Tuy antes de Guare, Tácata, Cúa, Río Tarma, Río Ocumarito, Quebrada Charallave y Quebrada Cúa. La tercera recolección fue el día 02 de Agosto y cuando fueron tomados los puntos correspondientes a Ocumare, Río Marare, Río Súcuta, Lagartijo, Santa Teresa, Río Taguacita, Araguita y Río Taguaza.



La cuarta campaña fue realizada con el personal del Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) entre el 18 y 26 de Agosto, tomando las muestras de la Colonia Tovar, El Consejo, Boca de Cagua, Río Caucagua, Río Guaire, Panaquire, San Juan-Los Galpones y Taguacita-Tuy . Finalmente, la quinta campaña fue llevada a cabo el 20 de Octubre, y se tomaron las muestras de Panaquirito, Quebrada Yaguapo, Quebrada Urba, Río Sapo, Río Cuira, El Samán y Boca de Paparo.

Tabla 6: Puntos de captación de muestra en los afluentes principales del Río Tuy.

Nº	Localidad
1	Qda. Guayas
2	Río Guare
3	Qda. Cúa
4	Río Tarma
5	Río Ocumarito
6	Qda. Charallave
7	Río Marare
8	Río Súcuta
9	Río Guaire
10	Río Taguacita
11	Río Taguaza
12	Río Caucagua
13	Río Cuira
14	Río Panaquirito
15	Qda. Yaguapo
16	Qda. Urba
17	Río Sapo

Medidas de campo

Durante la fase de campo se llevó a cabo la medición de los parámetros físico-químicos: pH, Eh, Temperatura, Conductividad y alcalinidad, ya que estas medidas en los cuerpos de agua, son una forma sencilla de identificar sus variaciones composicionales tanto espaciales como temporales, resultantes de cambios en factores naturales como la litología, relieve, vegetación y clima de la región (Mogollón, 1984).



La alcalinidad fue determinada al día siguiente de haber recolectado las muestras debido a razones de tiempo. Esta medición fue realizada mediante una valoración ácido-base, la cual es seguidamente descrita.

Se partió de una solución de HCl de concentración conocida, la cual se utilizó como agente titulante; la concentración de esta solución fue determinada a partir de una valoración con NaHCO_3 .

Se tomaron 100 mL de muestra de agua del río y se colocaron en un matraz. Luego fueron agregadas un par de gotas del indicador mezcla de 3:2 de verde de bromocresol al 0,1% con rojo de metilo al 0,1%.

En una bureta se colocó la solución de HCl de concentración conocida.

Se descargó el HCl en la muestra de agua, anotando el volumen inicial y el volumen cuando la solución cambia de color (Marín, 2002).

Finalmente la alcalinidad fue calculada con la siguiente expresión:

$$C_{\text{HCO}_3} = \frac{V \text{ de HCl (mL)} * C \text{ de HCL}}{\text{Volumen total (mL)}}$$

Las mediciones fueron realizadas por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados obtenidos.



Trabajo de Laboratorio

Tratamiento de muestras

La primera fase correspondió al filtrado de las muestras, esto con el fin de separar la fracción de sólidos disueltos con la de los sólidos suspendidos. Estas muestras fueron filtradas empleando una membrana de filtro de Milipore con un tamaño nominal de poro de $0,45\ \mu\text{m}$, logrando así separar los sólidos en suspensión y obtener exclusivamente los sólidos disueltos.

Luego de filtrar las muestras, éstas fueron divididas en dos grupos: a) muestras sin acidificar, para la determinación de aniones, y b) muestras acidificadas, para la determinación de los elementos mayoritarios, metales pesados, silicio y fósforo. (Figura 2)

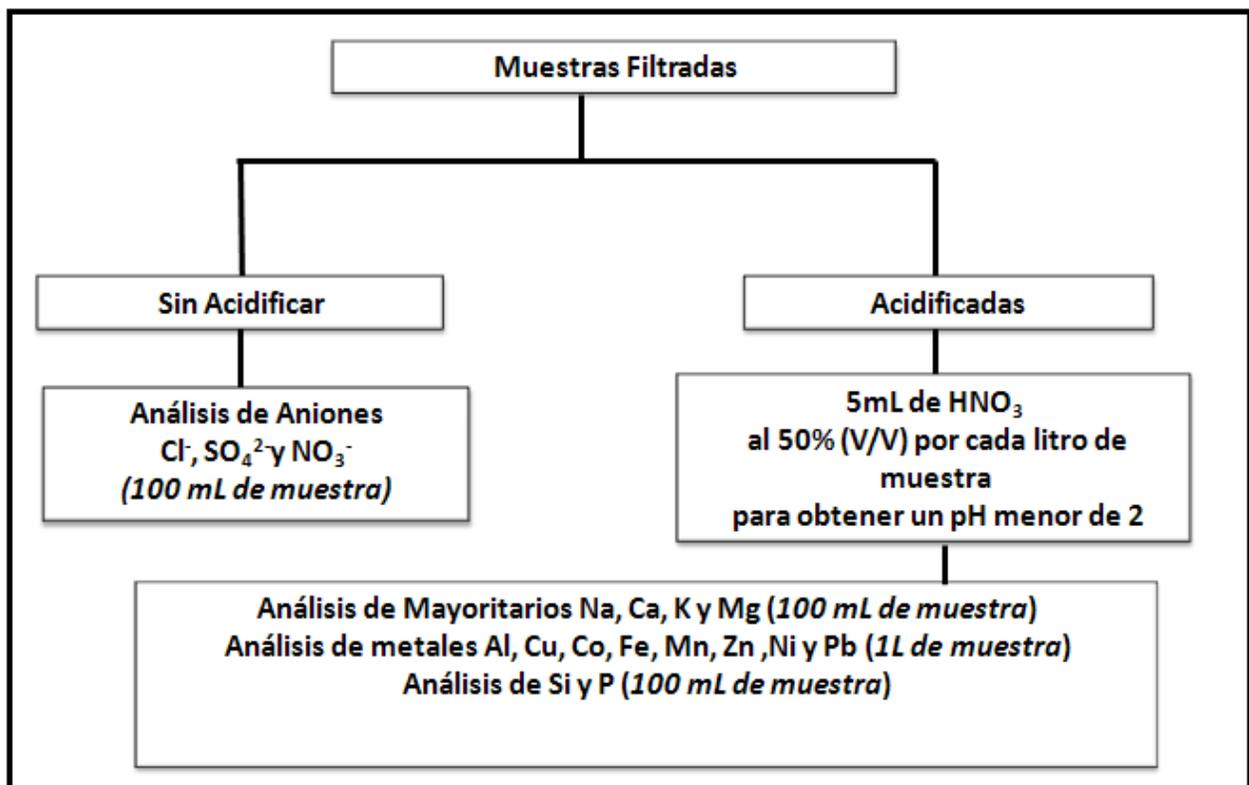


Figura 2: Esquema de la división de las muestras luego del proceso de filtración.



La acidificación de las muestras se realizó añadiendo 5mL de HNO_3 50% (V/V) por cada litro de muestra para obtener un pH menor de 2. Esto con el fin de minimizar los procesos de adsorción de los iones en las paredes del recipiente (Sabater, 2009).

Análisis químico de las muestras

Luego de tratadas las muestras, éstas fueron analizadas por diferentes técnicas analíticas para determinar la concentración de las distintas especies objeto de estudio (Figura 3).

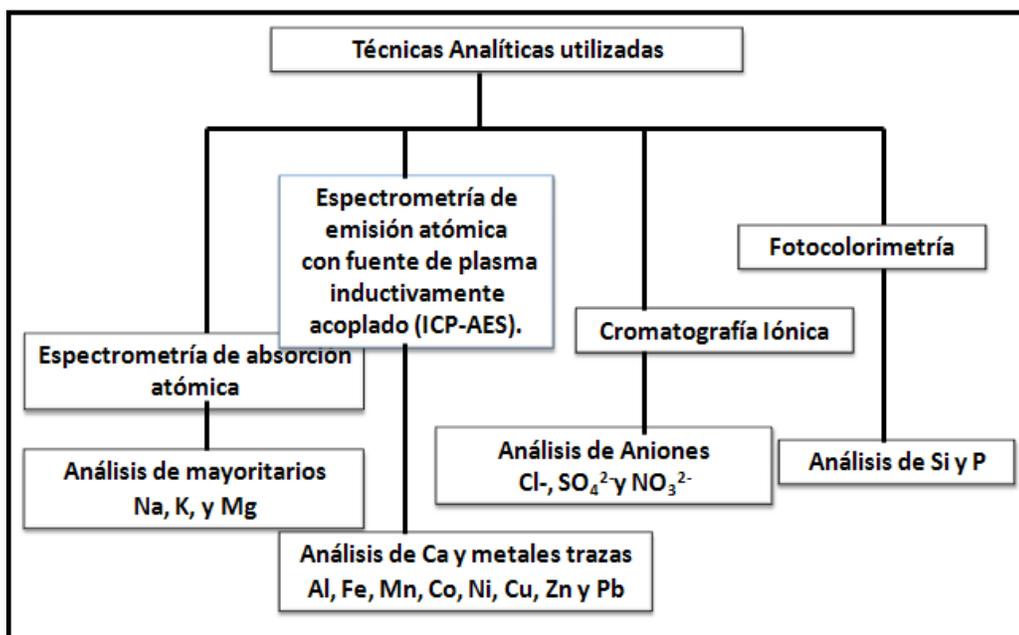


Figura 3: Esquema con las técnicas analíticas empleadas para la determinación de las distintas especies.

Determinación de las especies mayoritarias Na, K, Ca y Mg:

La concentración de las especies químicas mayoritarias Na, K y Mg fue determinada mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica; mientras que para determinar la concentración de calcio fue utilizada la técnica de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-AES). Fueron preparadas soluciones patrones a partir de soluciones estándar de 1000 mg/L de cada catión. El equipo que fue empleado para estas determinaciones correspondió a un Perkin Elmer, modelo 2000 para Na, K y Mg; y un ICP-AES Horiba Jobin-Yvon modelo última 2000, para Ca.



Determinación de las especies metálicas Co, Fe, Mn, Ni, Al, Cu, Pb y Zn:

La concentración de los metales Co, Fe, Mn, Ni, Al, Cu Pb y Zn fue determinada por la técnica de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-AES). Para este análisis fue necesario la preparación de patrones multielementales para elaborar las curvas de calibración. El equipo de ICP-AES utilizado fue un Horiba jobin-Ybon modelo ultima 2000.

Para la determinación de estos elementos traza fue necesario la preconcentración de las muestras recolectadas, evaporando desde 1000 ml de muestra filtrada hasta 50 ml; para ello se empleó una plancha de infrarrojo, de acuerdo con la metodología empleada por Reyes (1999), aumentando de esta manera la concentración de los metales a analizar por encima de los límites de detección de la técnica espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-AES).

Determinaciones de las especies aniónicas Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-

Los aniones inorgánicos Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- , fueron determinados por la técnica de cromatografía iónica. Para estas determinaciones se prepararon patrones de diferentes concentraciones mediante diluciones sucesivas de soluciones madres de 1000 mg/L. Posteriormente a cada patrón, se le midió su altura de pico en el cromatograma y finalmente se construyeron las curvas de calibración graficando alturas de pico frente a las concentraciones de los patrones. El equipo utilizado fue un cromatógrafo marca DIONEX, modelo DX-120 Ion Chromatograph.



Determinación de la concentración de silicio:

La concentración de silicio fue determinada por el método colorimétrico del molibdosilicato. En este método el molibdato de amonio a pH 1,2 aproximadamente, reacciona con sílice y fosfatos presentes formando heteropoliácidos. El ácido tartárico, destruye el ácido molibdofosfórico pero no el ácido molibdosilícico. La intensidad del color amarillo formado es proporcional a la concentración de sílice reactiva al molibdato. (APHA, 1995).

Se tomaron alícuotas de 10 mL de las muestras de agua y se transfirieron a balones aforados de 100 ml cada uno. Se agregó 1 mL de molibdato de amonio a cada balón y se agitó durante la adición. Luego de mezclar se esperaron 10 minutos para que ocurriera la formación del complejo amarillo (silicomolibdato). Después se añadieron 4 mL de una solución de ácido tartárico al 10% para suprimir la interferencia del fósforo. El complejo amarillo se reduce a silicomolibdato azul mediante 1mL de una solución constituida por sulfito de sodio, bisulfito de sodio y ácido 1-amino-2-naftol-4-sulfónico; seguidamente se esperaron 30 minutos y fueron realizadas las medidas de absorbancia a 680 nm. Las lecturas de absorbancia se realizaron contra un blanco que se preparó con las muestras y patrones. El intervalo de concentración de patrones fue desde 0,2 a 2,0 mg/L. (APHA, 1995). El equipo utilizado para las mediciones correspondió a un espectrofotómetro spectronic 20.

Determinación de la concentración de fósforo:

Fue empleado el método del ácido ascórbico. En este método el molibdato de amonio y el tartrato antimonil potásico reaccionan, en medio ácido, con ortofosfato para formar un ácido heteropoliácido fosfomolibdico, que se reduce a azul de molibdeno, de color intenso por el ácido ascórbico (APHA, 1995).



El procedimiento consistió en tomar una alícuota de 20,0 mL de la muestra y descargarla en un matraz limpio. Posteriormente, agregar 4 mL de un reactivo formado por una mezcla de 50 mL de ácido sulfúrico 5 N, 15 mL de molibdato de amonio, 30 mL de una solución de ácido ascórbico y 5 mL de una solución de tartrato de antimonil potásico. Luego esperar de 10 a 30 minutos y medir la absorbancia de cada muestra a 690 nm, utilizando un blanco como solución de referencia. El intervalo de concentración de patrones fue desde 0,2 a 1,0 mg/L (APHA, 1995). Al igual que para el silicio, el equipo utilizado para las mediciones correspondió a un espectrofotómetro spectronic 20 .

Tratamiento de los resultados

En el tratamiento de los resultados obtenidos fueron realizadas las siguientes operaciones:

- a) Correlaciones interelementales, mediante el cálculo de coeficientes de correlación entre los distintos elementos analizados, para asociarlos e inferir si tienen un origen común.
- b) Elaboración de gráficos de concentración de cada especie analizada, en función de la distancia de recorrido del río; de esta manera se lograrán identificar las zonas con mayores concentraciones de especies.
- c) Elaboración de gráficos de parámetros fisicoquímicos, en función de la distancia de recorrido del río; de esta manera se lograrán identificar la variación de cada parámetro en cada zona del río.



PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos correspondientes a las mediciones de campo y las determinaciones de laboratorio, comenzando por los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad, alcalinidad, temperatura y Eh, medidos en cada punto de muestreo; seguidamente, los resultados de las concentraciones de los elementos determinados, correspondientes a cationes mayoritarios Na, K, Ca y Mg, aniones Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- , así como Si, P y metales traza Al, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Pb y Zn. Finalmente se presentarán correlaciones inter-elementales.

Validación de los resultados analíticos

Para verificar la calidad de las determinaciones químicas, fue calculado el balance iónico y la estimación de la conductividad teórica (CT), en las muestras recolectadas en el Río Tuy y sus principales afluentes.

Balance iónico

La figura 4 presenta la relación de las concentraciones iónicas, en la cual fue graficada la sumatoria de cationes mayoritarios $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ frente a la sumatoria de aniones mayoritarios $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^-$, en miliequivalentes por litro (meq/L).

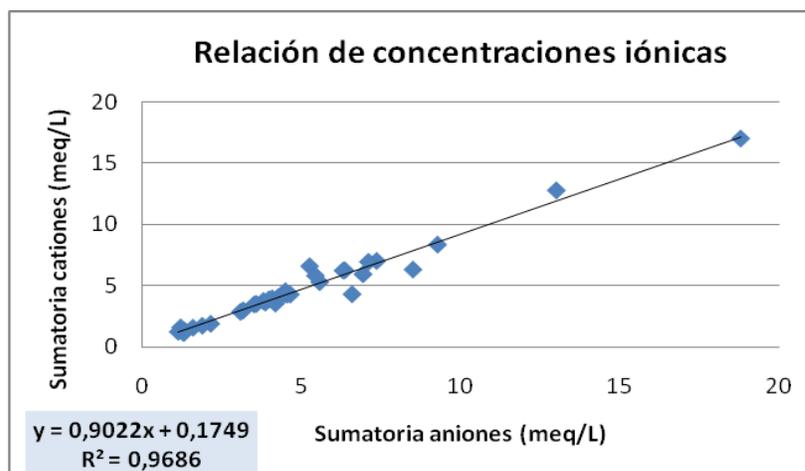


Figura 4: Balance iónico de las muestras del Río Tuy



Los resultados obtenidos indican una fuerte correlación ($r^2= 0,97$) y una pendiente con un valor cercano a la unidad. El ligero desbalance puede ser atribuido a la incertidumbre asociada con la determinación de aniones, la cual fue realizada por cromatografía iónica. Otro factor que pudiera estar causando el desbalance es la ausencia de análisis del catión amonio, sin embargo este ión se encuentra asociado a aguas superficiales con pH cercanos a 9 y condiciones reductoras (Meybeck, 1987), y este no es el caso de las aguas del Río Tuy, por lo cual se atribuye el desbalance a los errores asociados al análisis de aniones.

Los resultados obtenidos, en su gran mayoría, presentaron un porcentaje de error en el balance iónico, por debajo de 10%, lo cual es considerado aceptable para estudios geoquímicos (Hem, 1985).

Conductividad teórica

La conductividad teórica fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$CT = \sum U_i + C_i$$

Donde U_i es la conductividad iónica equivalente a 25°C expresada en ($\mu\text{S.L/cm.mg}$). C_i es la concentración de cada especie iónica disuelta expresada en mg/L.

La figura 5 muestra la curva de correlación obtenida al graficar la conductividad medida en campo versus la conductividad teórica. En esta puede observarse una buena correlación lineal, con un coeficiente de correlación de 0,99 y una pendiente cercana a la unidad $m= 1,17$. Por otro lado existen algunas diferencias entre el valor de campo y el valor teórico de conductividad, lo cual pudiera estar asociado a errores en los análisis químicos, similar a lo que ocurre con el balance iónico. Los cálculos de la conductividad teórica, son explicados en el apéndice 2.

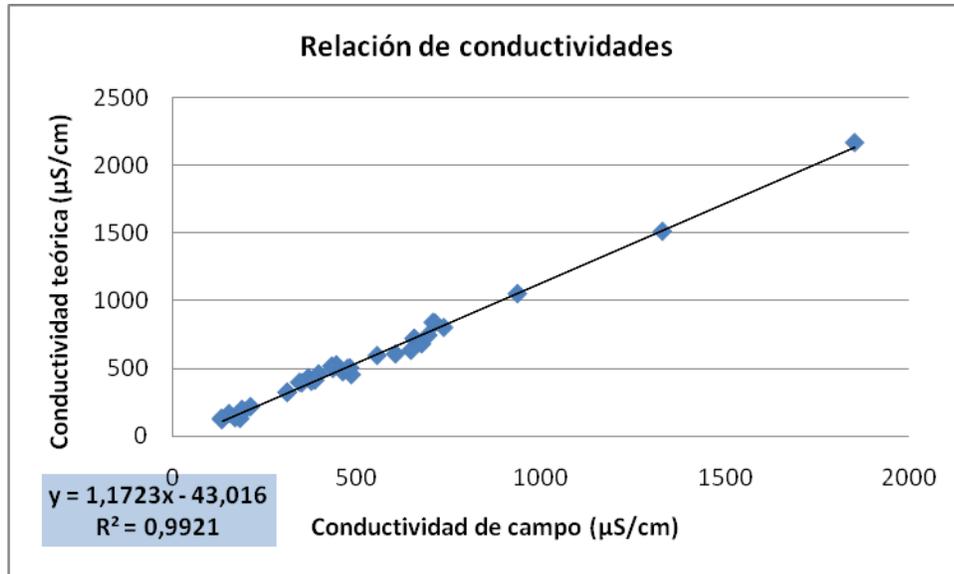


Figura 5: Conductividad teórica Vs conductividad de campo para las aguas del Río Tuy y sus afluentes principales

Relación entre SDT y conductividad

Los sólidos disueltos totales (SDT) son la suma de los cationes y aniones inorgánicos presentes en las aguas, lo cual junto a la conductividad, dan una idea del contenido de sales disueltas. La figura 6 demuestra que la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales están estrechamente relacionados, por lo tanto cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica.

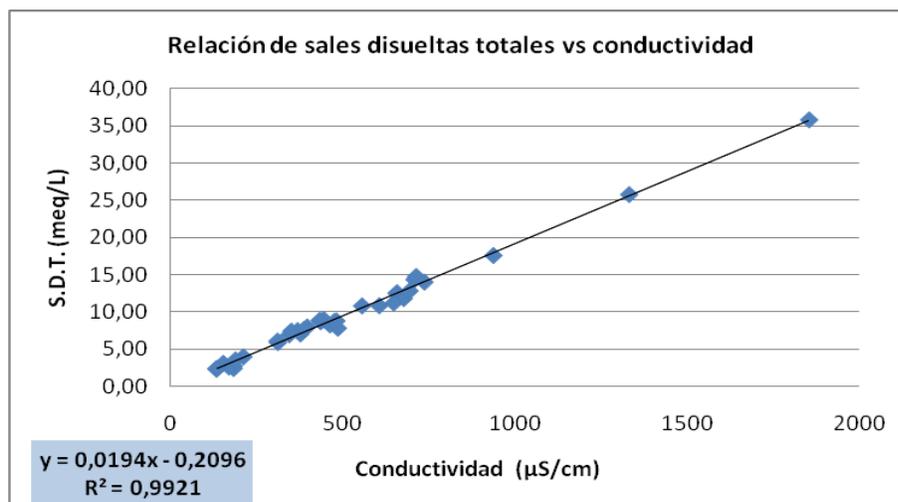


Figura 6: Relación de SDT con la conductividad



Parámetros Físicoquímicos

En la tabla 7 son mostrados los valores de pH, conductividad, alcalinidad y temperatura medidos en los puntos de muestreo seleccionados. Las figuras 7, 8, 9 y 10 muestran la distribución de los valores de cada uno de estos parámetros en función de la distancia del río, considerando la zona de la Colonia Tovar como 0 Km.

Con respecto al pH puede observarse que los valores oscilan entre 6,30 y 8,13; dichos valores están dentro de los límites mínimos y máximos permitidos en aguas tipo B (ver características en la página 14), de acuerdo con el decreto 883. En líneas generales puede observarse en la figura 7 que los valores más altos fueron encontrados en los afluentes Río Guare y Río Súcuta, los cuales de acuerdo a trabajos previos (Angulo, 1980; Pineda, 1982), son considerados como ríos no contaminados.

Por su parte, los valores de pH más bajos fueron encontrados en las zonas más contaminadas del río tales como Boca de Cagua (pH de 6,4), así como en los tributarios Río Guaire y Río Caucagua, con valores de pH igual a 6,7 y 6,3 respectivamente; lo cual puede atribuirse a las descargas domésticas e industriales cercanas a la zona.

Sin embargo, es de hacer notar que el pH no fue un indicador directo de grado de contaminación. Ya que como fue observado en zonas como Hacienda Santa Teresa, la cual está contaminada, evidenciado por las observaciones de campo y los valores de otras medidas de parámetros físicoquímicos, presentó un valor de pH de 8. Al igual que para los ríos Guare y Súcuta que, como ha sido determinado anteriormente, son considerados como no contaminados. Por otro lado, cerca del Río Guare aflora la formación Paracotos caracterizada por litología de calizas (Zambrano, 1970) por lo cual el pH es ligeramente básico no por descargas básicas sino por la presencia de carbonatos (APHA, 1995).

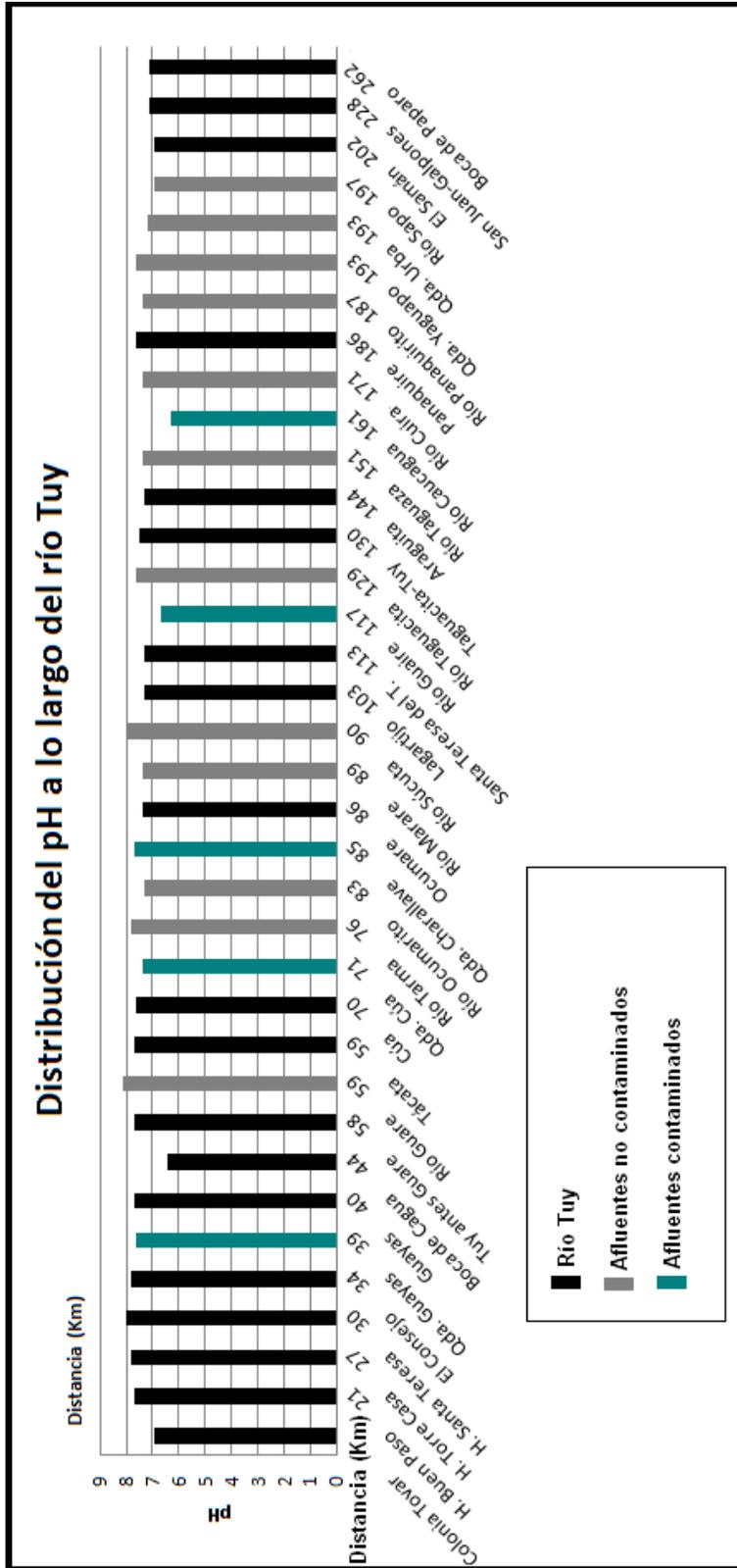


Figura 7: Distribución del pH en el Río Tuy y sus afluentes principales



Al comparar los valores de pH con los obtenidos en la época de lluvias en trabajos previos realizados en el Río Tuy (Yánes, 1980), puede observarse que estos son similares, predominando la tendencia en la que el Río Guare presenta mayor de pH. Sin embargo otros valores difieren con los medidos en esta investigación, probablemente por las diferencias en los meses de muestreo así como en la época de captación de muestras.

En cuanto a los valores de conductividad, estos variaron desde 133 a 1853 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figura 8). Los valores más bajos son observados aguas arriba, en la zona donde nace el río, es decir cerca de la Colonia Tovar y Hacienda Buen Paso. En estas zonas el río está poco influenciado por actividades antrópicas, por lo que puede decirse que hay poca contaminación inorgánica ya que estos valores de conductividad son similares a los de ríos utilizados como referencia de no contaminados (Angulo 1980, Yánes 1980, Pineda, 1982) tales como Taguacita, Taguaza, Panaquirito, entre otros. Los altos valores en el Río Tuy a la altura de Guayas y Boca de Cagua, son atribuidos a que esta zona está siendo influenciada por la entrada de la Quebrada Guayas, la cual está altamente contaminada debido a que en ella descargan los efluentes domésticos provenientes de las poblaciones cercanas (Las Tejerías). Por otro lado la quebrada Morocopo, que también desemboca en el Río Tuy, descarga los residuos de granjas porcinas y de las zonas industriales, las cuales deterioran la calidad de las aguas. Otros valores altos de conductividad son encontrados en el Río Tuy a la altura de Ocumare, ya que allí se encuentran amplias zonas de cultivo y el río está siendo afectado por la entrada de las quebradas Ocumarito y Charallave, esta última ubicada en una zona industrial.

Comparando los valores de conductividad con los de trabajos previos (Yánes, 1980), medidos en épocas de lluvias, pudo observarse que los valores obtenidos en estas investigación son mayores en la mayoría de las muestras, probablemente ha habido un aumento del grado de contaminación inorgánica en los últimos años, atribuido al incremento poblacional e industrial.


Tabla 7: Medidas de distancia y parámetros fisicoquímicos en el Río Tuy

Punto	D. (Km)	pH	Cond. (µS/cm)	T (°c)	Alcalinidad (HCO ₃ ⁻ mg/L)
Colonia Tovar	0	6,9	184,0	16,5	44,6
H. Buen Paso	21	7,7	345,0	21,8	139,5
H. Torre Casa	27	7,8	369,0	24,9	148,8
H. Santa Teresa	30	8,0	397,0	24,5	160,0
El Consejo	34	7,8	377,0	23,8	141,4
Qda. Guayas	39	7,6	937,0	28,5	297,6
Guayas	40	7,7	708,0	29,8	245,6
Boca de Cagua	44	6,4	713,0	26,4	353,5
Tuy antes Guare	58	7,7	445,0	25,0	156,3
Río Guare	59	8,1	351,0	24,7	199,1
Tácata	59	7,7	433,0	25,5	167,4
Cúa	70	7,6	436,0	27,5	167,4
Qda. Cúa	71	7,4	1853,0	29,5	375,8
Río Tarma	76	7,8	387,0	28,2	202,8
Río Ocumarito	83	7,3	556,0	27,8	236,3
Qda. Charallave	85	7,7	1331,0	33,6	368,3
Ocumare	86	7,4	737,0	27,6	260,4
Río Marare	89	7,4	312,0	26,3	135,8
Río Súcuta	90	8,0	311,0	26,3	163,7
Lagartijo	103	7,3	658,0	29,7	234,4
Santa Teresa del T.	113	7,3	656,0	29,9	213,9
Río Guaire	117	6,7	606,0	27,4	271,6
Río Taguacita	129	7,6	153,6	27,1	78,1
Taguacita-Tuy	130	7,5	677,0	26,7	195,3
Araguita	144	7,3	648,0	30,8	206,5
Río Taguaza	151	7,4	134,1	29,3	63,3
Río Caucagua	161	6,3	694,0	28,2	245,6
Río Cuira	171	7,4	212,0	NM	99,0
Panaquire	186	7,6	463,0	27,6	157,2
Río Panaquirito	187	7,4	183,5	26,4	63,0
Qda. Yaguapo	193	7,6	170,2	25,2	72,0
Qda. Urba	193	7,2	188,9	25,3	84,0
Río Sapo	197	6,9	133,3	25,8	58,2
El Samán	202	6,9	482,0	28,1	166,2
San Juan-Galpones	228	7,1	486,0	27,3	135,8
Boca de Paparo	262	7,1	476,0	27,6	160,2

 Afluentes
 Río Tuy

NM: no medido



En relación a los valores de alcalinidad (figura 9) encontrados en los diferentes puntos de muestreo, puede observarse que sigue una tendencia similar a los valores de conductividad, por lo cual las razones expuestas en la explicación del comportamiento de la conductividad, también se aplican para la alcalinidad.

En cuanto a la temperatura de las muestras (figura 10), se observa que el valor más bajo (16,5 °C) fue medido en la Colonia Tovar, esto es atribuido probablemente a factores naturales ya que en esta zona la altura sobre el nivel del mar es de 2200, mucho mayor que en el resto de los puntos de muestreo, lo cual genera bajas temperaturas ambientales conllevando así al enfriamiento de las aguas. Los mayores valores de temperatura se observan en quebrada Cúa y Charallave con valores de 29,5 y 33,6 °C y en Guayas y Araguaita cuyos valores son de 29,8 y 30,8 °C, respectivamente, esto debido a que en estas zonas son de alta actividad humana, tanto industriales como domésticas, en las cuales se desecha el agua caliente proveniente de casas e industrias al río. (Jiménez, 2002). El máximo valor de 33°C fue medido en la quebrada Charallave, esto se atribuye a que en este punto de muestreo se observó que las aguas tenían muy bajo caudal, poca profundidad y circulación de agua, lo cual conduce a aguas someras trayendo como consecuencia una elevación térmica. También esas altas temperaturas pueden atribuirse al calor de la zona, ya que en Charallave las temperaturas pueden llegar a los 30 °C. Estos altos valores son motivados a su ubicación geográfica así como, al ser una zona poblada, por las emisiones vehiculares, fábricas, la tala y la quema en verano (Silva, 1998).

La temperatura afecta la solubilidad del oxígeno, en ese sentido puede señalarse que a medida que esta aumenta, la solubilidad del oxígeno es menor (Sánchez, 2007), por lo tanto en los puntos de muestreo donde se encontraron mayores temperaturas, Guayas (29,8 °C), Quebrada Cúa (29,5 °C), Quebrada Charallave (33,6), Santa Teresa del Tuy (29,9 °C) y Araguaita (30,8°C), hay menor concentración de oxígeno, evidenciado por los bajos valores de Eh presentados en la Tabla 9. Esto también se evidenció a través de las observaciones en campo, en las cuales se notó una gran cantidad de desechos domésticos, lo cual puede generar una disminución de oxígeno en las aguas.

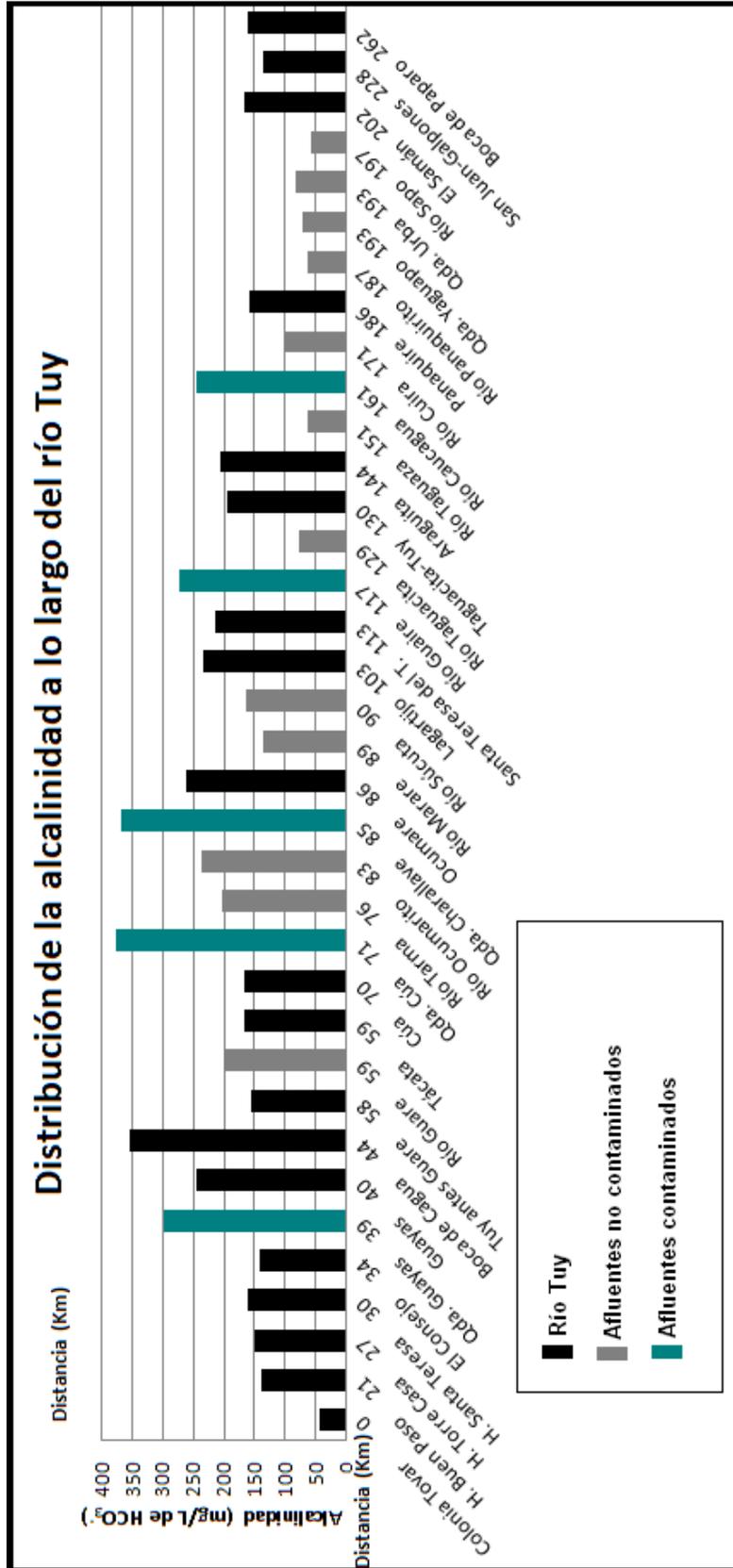


Figura 9: Distribución de la alcalinidad en el Río Tuy y sus afluentes principales

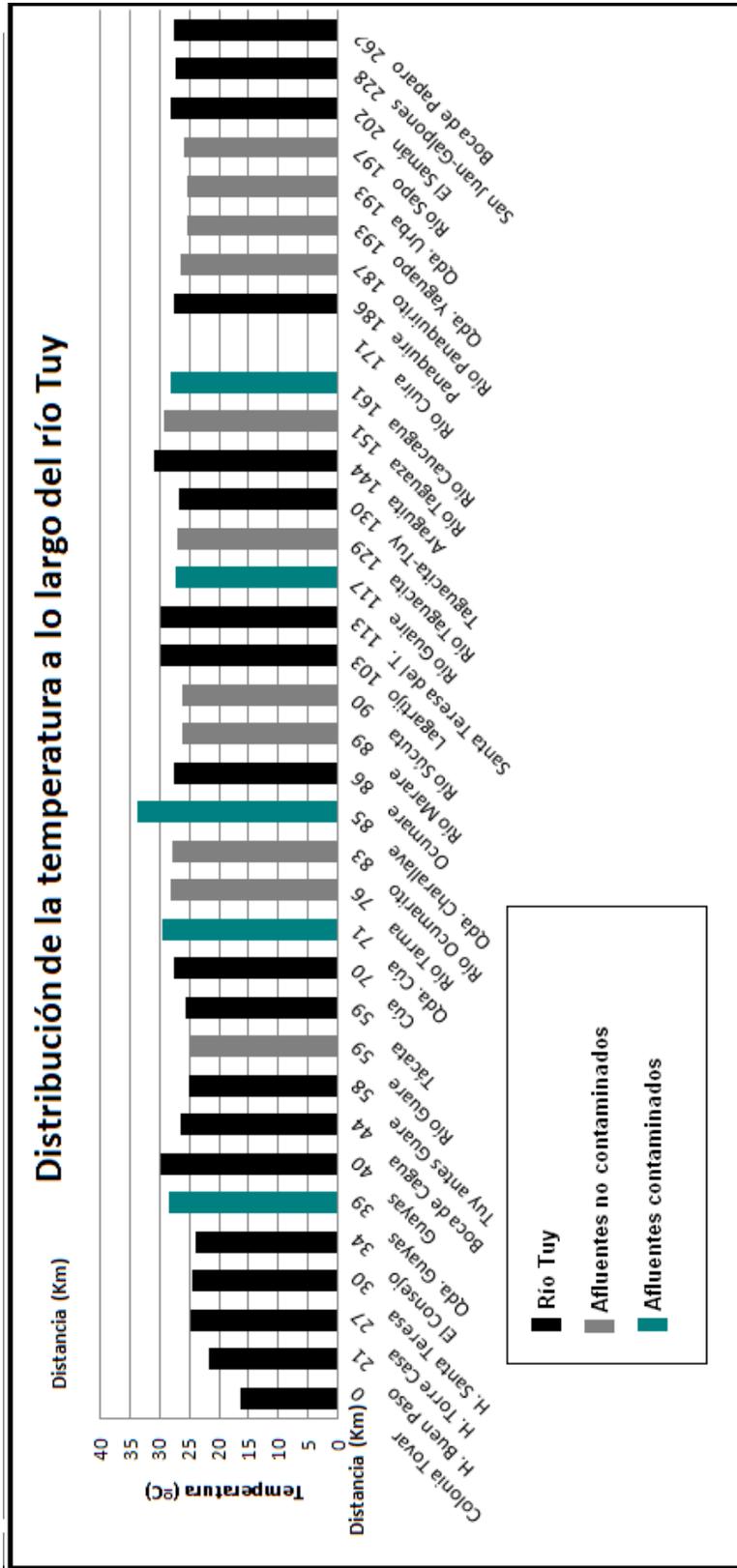


Figura 10 : Distribución de la temperatura en el Río Tuy y sus afluentes principales



En la tabla 8 y figura 11 son mostradas las medidas de campo adicionales realizadas por el Laboratorio Nacional de Hidráulica, en algunos de los puntos de muestreo del Río Tuy. Dichas medidas corresponden a oxígeno disuelto (OD), caudal y turbiedad.

En relación al oxígeno disuelto, puede evidenciarse que las concentraciones más altas fueron encontradas en las cabeceras del río, es decir en la Colonia Tovar (7,2 mg/L) y El Consejo (7,0 mg/L), probablemente atribuido a las pocas actividades antrópicas y a que estas zonas son de mayor pendiente, de manera que cuando el río se desplaza por dichas zonas, ocurre mayor oxigenación en las aguas. Por su parte los valores más bajos del límite permitido (5 mg/L según Decreto 883) son observados en San Juan (1,1 mg/L), Panaquire (2,4 mg/L) y Taguacita-Tuy (1,6 mg/L), debido a que en estas zonas si hay desarrollo de actividades industriales y domésticas, causando así que las aguas residuales generen desechos orgánicos al río, aumentando la cantidad de materia orgánica y conllevando a la disminución del oxígeno disuelto en las aguas del mismo. (Sánchez, 2007).

En cuanto a la turbiedad, puede observarse que en la Colonia Tovar predominan los más bajos valores (6,3 NTU), pudiendo deberse a que en esta zona, donde nace el río Tuy, no hay actividades domésticas que generen desechos al río, ya que la materia orgánica puede aumentar la turbiedad en los cuerpos acuáticos (Sánchez, 2007). Por su parte en Ocumare, Taguacita-Tuy y San Juan, los valores son mayores a 1000 NTU, lo cual sobrepasa el límite máximo permitido (250 NTU) para aguas tipo B de acuerdo con el decreto 883. Estos altos valores de turbiedad en estas zonas podrían estar asociados a la presencia de partículas en suspensión, así como también de materia orgánica proveniente de efluentes domésticos (Sánchez, 2007).



Los valores de caudal (tabla 8), son de gran utilidad para saber los máximos y mínimos en concentraciones, ya que cuando el caudal es alto, como el observado en Panaquire y San Juan, las concentraciones de los elementos suelen ser más bajas debido a que hay mayor cantidad de agua en el río, lo cual genera una dilución de los elementos presentes en las mismas. Esto particularmente se hace evidente durante la época de lluvias.

Tabla 8: Medidas de campo adicionales en algunos puntos del río Tuy

Localidad	caudal (m³/s)	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
Colonia Tovar	0,12	7,2	6,3
El Consejo	1,25	7	80,4
Boca de Cagua	2,4	6,7	6,4
Tácata	3,4	6,8	289
Ocumare	8,58	4,8	>1000
Río Guaire	14,07	5,8	519
Taguacita-Tuy	24,48	1,6	>1000
Río Caucagua	11,62	4,2	381
Panaquire	149,85	2,4	346
San Juan-Galpones	74,42	1,1	>1000

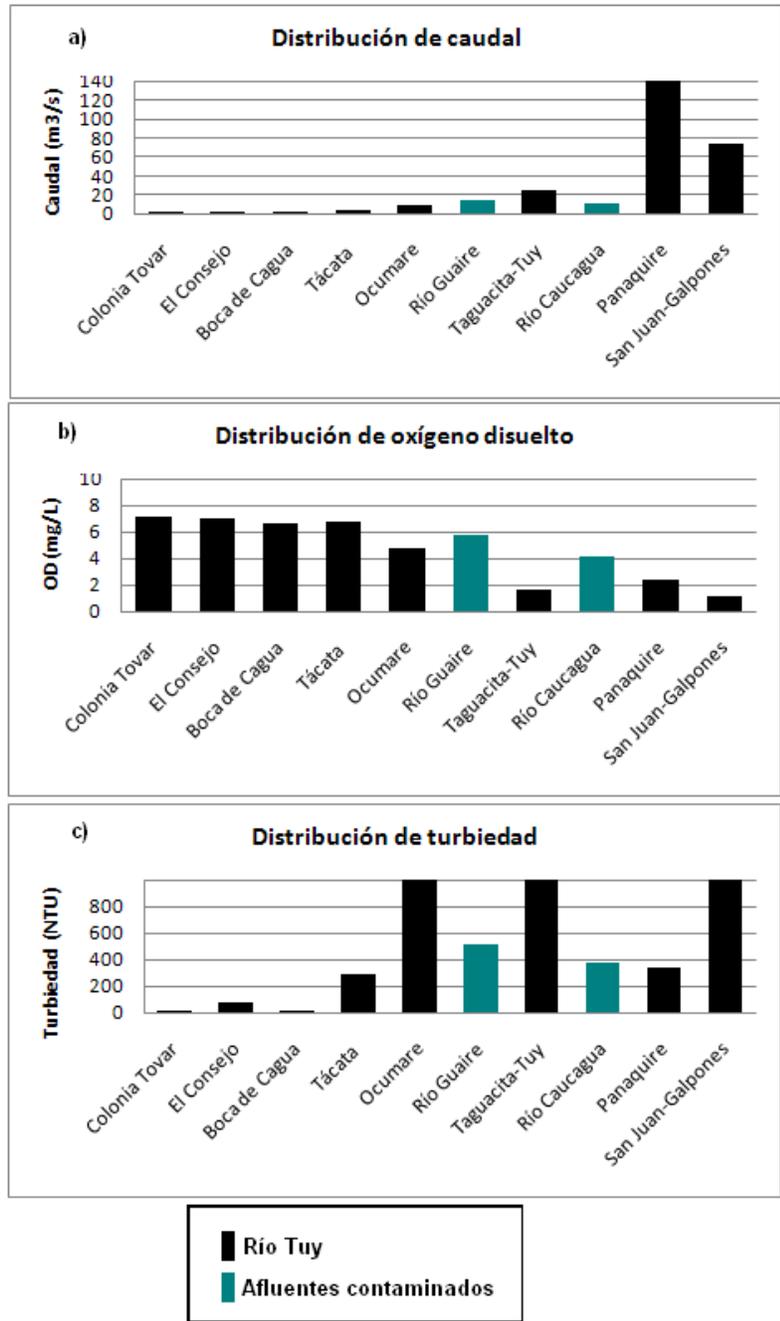


Figura 11: Distribución de a)Caudal, b) oxígeno disuelto y c)Turbiedad en el Río Tuy



La tabla 9 señala los valores de Eh realizados durante las campañas de captación de muestras. Es importante mencionar que debido a fallas en el medidor de Eh, estas medidas no pudieron ser realizadas en todos los puntos de muestreo seleccionados. De acuerdo con dicha tabla y la figura 12 puede observarse que en el cauce principal los menores valores fueron encontrados en Guayas (70 mV), debido a la influencia de la quebrada Guayas la cual presentaba bajos valores (67 mV) por la gran cantidad de desechos domésticos que descargaban en esta. Esto genera una contaminación de tipo orgánica, generando una disminución en los valores de Eh.

Por su parte, la zona de Ocumare también presentó bajos valores de Eh (70 mV) ya que hacia esta zona del río, desembocan quebradas con alta contaminación orgánica como la Quebrada Cúa, la cual presentó condiciones tan reductoras que sus valores de Eh resultaron negativos. Entre otras zonas influenciadas por descargas domésticas e industriales están la Hacienda Santa Teresa, cuyo valor de Eh fue de 89 mV. Por el contrario en las cabeceras del río (Hacienda Buen Paso), fueron obtenidos altos valores de Eh (215 mV) debido a la poca influencia doméstica e industrial la cual son las que generan condiciones reductoras en las aguas y por ende alto grado de contaminación orgánica, y también, como fue discutido anteriormente con el oxígeno disuelto, esta zona presenta mayores pendientes.



Tabla 9: Medidas de Eh en algunos puntos del río Tuy

Punto	Eh (mV)
H. Buen Paso	215
H. Torre Casa	119
H. Santa Teresa	89
Qda. Guayas	67
Guayas	70
Tuy antes Guare	73
Río Guare	18
Tácata	106
Cúa	240
Qda. Cúa	-111
Qda. Ocumarito	42
Qda. Charallave	112
Ocumare	70
Río Súcuta	33
Lagartijo	115
S.Teresa del Tuy	67
Taguacita	100
Araguita	155

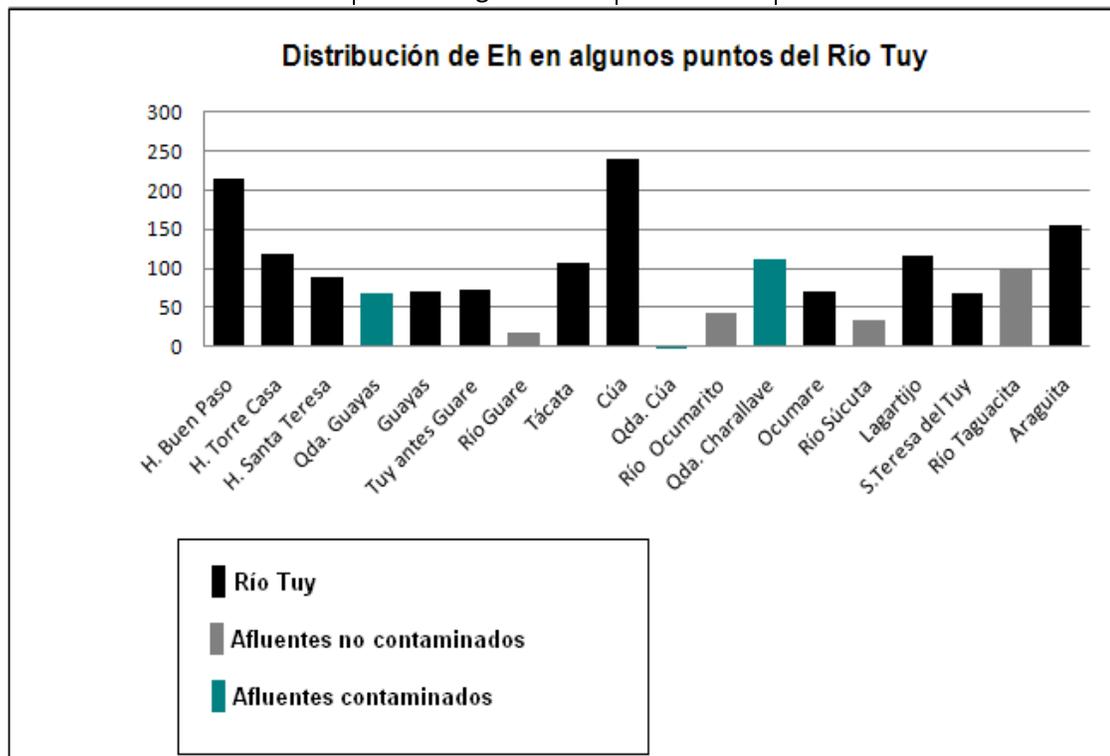


Figura 12: Distribución de las medidas de Eh en algunos puntos del Río Tuy



Elementos mayoritarios

A continuación son presentados y discutidos los resultados correspondientes a las determinaciones de las concentraciones de los cationes mayoritarios Na, K, Ca y Mg en las muestras recolectadas en el Río Tuy y sus principales afluentes (Tabla 10). De igual forma las figuras 13, 14, 15 y 16 muestran la distribución espacial de estos elementos.

De acuerdo con la tabla 10 y la figura 13 puede observarse que las concentraciones de Na presentan valores entre 5,8 mg/L y 161 mg/L; mientras que los valores más altos fueron encontrados en la zona de Guayas, Araguaita, Ocumare, Lagartijo y Santa Teresa del Tuy.

La concentración de Na en los puntos de muestreo cercanos al nacimiento del Río Tuy varió de la siguiente manera: desde la Colonia Tovar y El Consejo los valores de concentración correspondieron a 9,3 y 12 mg/L, respectivamente, los cuales están por encima del valor de la concentración promedio de Na en aguas naturales, que es 6,3 mg/L (Hem, 1985), lo que pudiera ser debido a que estas zonas son agrícolas y los componentes de Na son usados en muchas aplicaciones que incluyen fertilizantes (APHA, 1995). Por su parte en las haciendas Buen Paso, Torre Casa y Santa Teresa fueron detectados valores más bajos de la concentración promedio motivado a las pocas poblaciones que se encuentran en estas zonas por lo cual se generan pocos efluentes domésticos.

El Río Tuy a la altura de Guayas aumenta notablemente la concentración de Na a 39,9 mg/L. Este alto valor es atribuido por una parte a las descargas domésticas de las poblaciones Las Tejerías y Curiepe, y por otro lado el Río Tuy en esta zona está afectado por la entrada de la quebrada Guayas, la cual está fuertemente afectada también por descargas domésticas y actividades industriales, reflejado en su alta concentración de 26,1 mg/L.


Tabla 10: Medidas de elementos mayoritarios en el Río Tuy y sus afluentes.

Punto	Distancia (Km)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)
Colonia Tovar	0	12,0	3,0	2,3	15,5
H. Buen Paso	21	9,5	1,9	7,9	46,8
H. Torre Casa	27	9,8	2,0	8,2	51,6
H. Santa Teresa	30	10,9	2,2	8,4	54,4
El Consejo	34	9,3	2,2	7,6	48,3
Qda. Guayas	39	26,1	8,0	12,7	119,2
Guayas	40	39,9	5,5	12,2	82,6
Boca de Cagua	44	24,1	4,9	11,9	83,1
Tuy antes Guare	58	16,5	4,2	9,9	57,9
Río Guare	59	8,4	1,1	22,3	27,5
Tácata	59	11,6	3,9	13,2	51,3
Cúa	70	13,2	3,5	11,6	53,8
Qda. Cúa	71	161,0	10,6	53,6	106,6
Río Tarma	76	11,5	1,3	15,2	34,6
Río Ocumarito	83	43,4	4,0	18,0	36,0
Qda. Charallave	85	105,2	7,5	38,6	96,7
Ocumare	86	38,3	5,1	20,3	69,4
Río Marare	89	18,5	1,6	10,7	22,2
Río Súcuta	90	13,6	1,5	10,9	28,6
Lagartijo	103	36,6	4,6	17,6	61,6
S. Teresa del Tuy	113	41,4	4,5	16,7	58,6
Río Guaire	117	33,0	6,0	8,5	39,9
Río Taguacita	129	7,1	0,6	8,3	10,7
Taguacita-Tuy	130	27,1	5,6	14,1	82,0
Araguita	144	49,0	6,2	13,1	48,5
Río Taguaza	151	5,4	0,5	5,2	10,7
Río Caucagua	161	42,3	5,3	8,3	65,2
Río Cuira	171	7,8	0,9	9,0	15,2
Panaquire	186	28,6	4,6	6,2	43,0
Río Panaquirito	187	5,8	0,6	5,4	8,9
Qda. Yaguapo	193	7,2	0,6	5,8	9,8
Qda. Urba	193	6,3	0,7	7,2	16,4
Río Sapo	197	6,6	0,7	4,0	9,5
El Samán	202	25,9	4,4	12,6	39,6
San Juan	228	23,2	4,0	8,3	41,4
Boca de Paparo	262	25,4	4,0	12,2	41,2
Afluentes					
Río Tuy					



En Tácata ocurre una disminución considerable en la concentración de Na a 11,6 mg/L, ya que el Río Tuy está influenciado por la inyección del afluente Río Guare, el cual presentó la concentración de Na más baja de 8,4 mg/L, que la del cauce principal, generando de esta manera un efecto de dilución en el Río Tuy. De acuerdo con trabajos previos (Angulo 1980, Yanes 1980, Pineda 1982) el Río Guare es clasificado como río no contaminado.

Al seguir avanzando por el Río Tuy es importante observar que hay otro aumento de Na a la altura de Ocumare cuyo valor es de 38,3 mg/L, atribuido a la entrada en este punto de las quebradas Cúa (161 mg/L) y Charallave (105,2 mg/L). Estas presentaron los mayores valores de concentración que en el cauce principal y las más altas concentraciones en todo el muestreo, debido a que a ellas llegan las descargas industriales y domésticas de la zona. El Río Ocumarito presentó mayor concentración de Na que el Río Tuy la altura de Ocumare, por lo que también es uno de los causantes del aumento de Na en Ocumare.

En Lagartijo la concentración de Na no varía considerablemente a pesar de la entrada de los afluentes del Río Marare y Río Súcuta, que presentaron valores más bajos de Na que en el canal principal, por lo cual puede decirse que la concentración en Lagartijo proviene de las industrias que descargan sus aguas directamente al río y de los efluentes domésticos de las poblaciones cercanas tales como San Francisco de Yare.

Por su parte, en Santa Teresa del Tuy y Araguita las concentraciones aumentan a 41,4 mg/L y 49 mg/L respectivamente, atribuido a las descargas domésticas de la población Santa Teresa; mientras que en Araguita por ser una amplia zona de cultivos, el Na pudiera provenir de algunos fertilizantes que utilizan compuestos de Na (APHA, 1995).

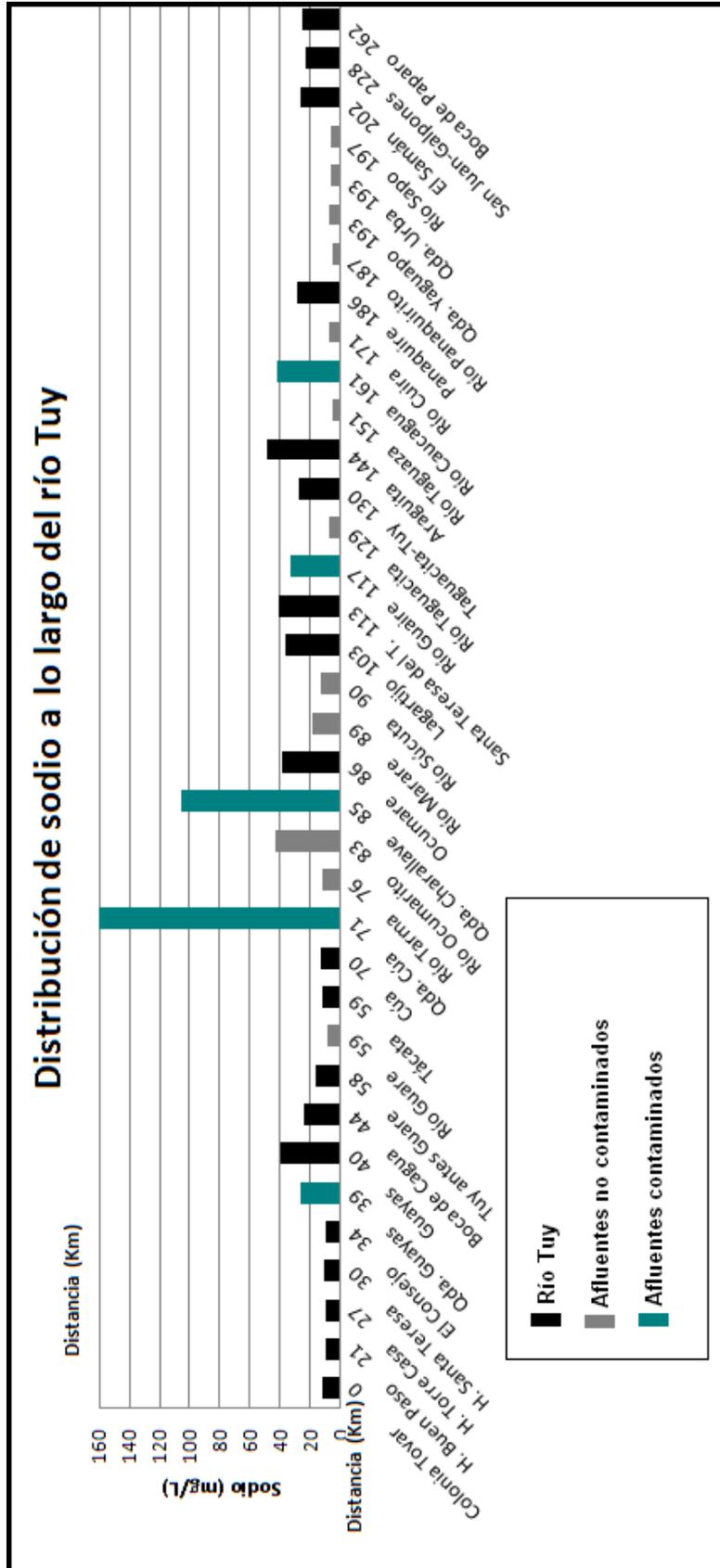


Figura 13 : Distribución de sodio en el Río Tuy y sus afluentes principales



El río Tuy a la altura de Panaquire, presentó un descenso de Na (28,6 mg/L) que pudiera deberse a la entrada de los afluentes Río Cuira y Río Taguaza, los cuales son considerados como no contaminados (Angulo 1980, Yanes 1980, Pineda 1982) y presentaron concentraciones entre 5 mg/L y 7 mg/L de Na, similar a la abundancia promedio de este elemento en ríos (6,3 mg/L)(Hem 1985). En las zonas cercanas a la desembocadura los afluentes no contaminados correspondientes a Río Panaquirito, Quebrada Yaguapo, Quebrada Urba y Río Sapo, no ejercieron dilución en el Río Tuy, sino que la concentración se mantuvo similar a Panaquire, este Na pudiera provenir de los fertilizantes utilizados en las actividades agrícolas que se desarrollan en las zonas cercanas a la desembocadura. Por su parte, en Boca de Paparo, el Na pudiera estar siendo llevado al río por vientos marinos (González, 1982), así como por actividades agrícolas.

La distribución de K a lo largo del río Tuy es presentada en la figura 14. Nótese que los valores determinados están entre 0,6 mg/L y 10,6 mg/L. La distribución de este elemento fue muy similar a la de Na, encontrándose los mayores valores, en este caso superiores a la abundancia promedio de K en ríos correspondiente a 2,3 mg/L de acuerdo con Hem (1985), en las mismas zonas donde fueron encontrados los máximos valores de Na, por lo cual son atribuidas las mismas razones que se explicaron para Na.

La concentración de Ca presenta intervalos entre 8,9 mg/L y 119,2 mg/L. La tabla 9 y la figura 15 indican sus máximos valores en Boca de Cagua, Guayas, Taguacita y Ocumare; así como en los afluentes pertenecientes a las quebradas Cúa, Charallave y Guayas cuyos valores se encuentran muy por encima de 15 mg/L, el cual es el promedio en aguas de ríos (Hem, 1985). Estos valores pueden ser atribuidos a las actividades industriales y domésticas que descargan sus residuos a las quebradas Guayas, Charallave y Cúa. Los afluentes pertenecientes a la unidad norte de la cuenca (quebradas Guayas, Cúa y Charallave y ríos Guaire y Caucagua) presentaron altas concentraciones debido a que drenan una zona de litología esencialmente félsico-carbonática, constituida por rocas meta-sedimentarias (Zambrano, 1970), de manera que la meteorización de estas rocas genera iones Ca^{2+} en las aguas de estos ríos.

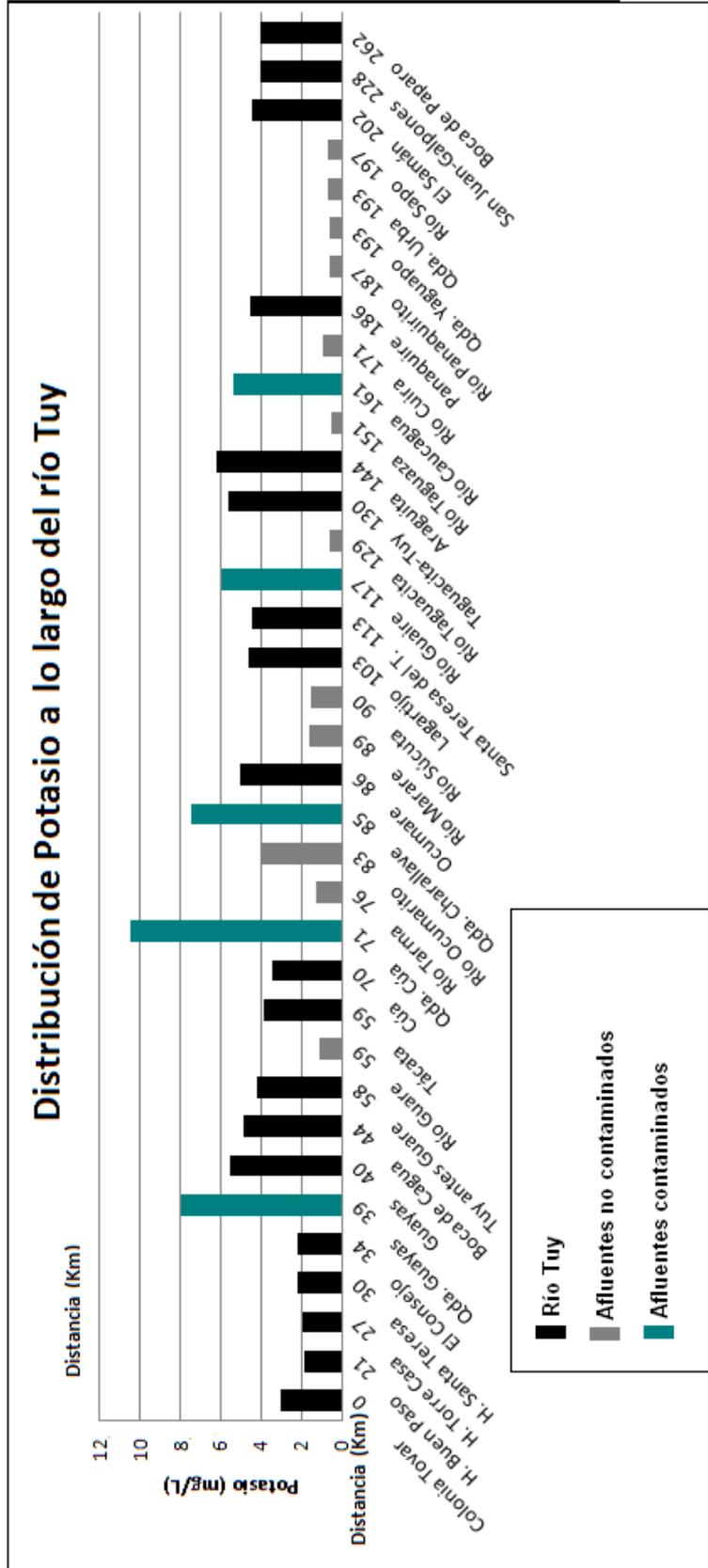


Figura 14 : Distribución de potasio en el Río Tuy y sus afluentes principales

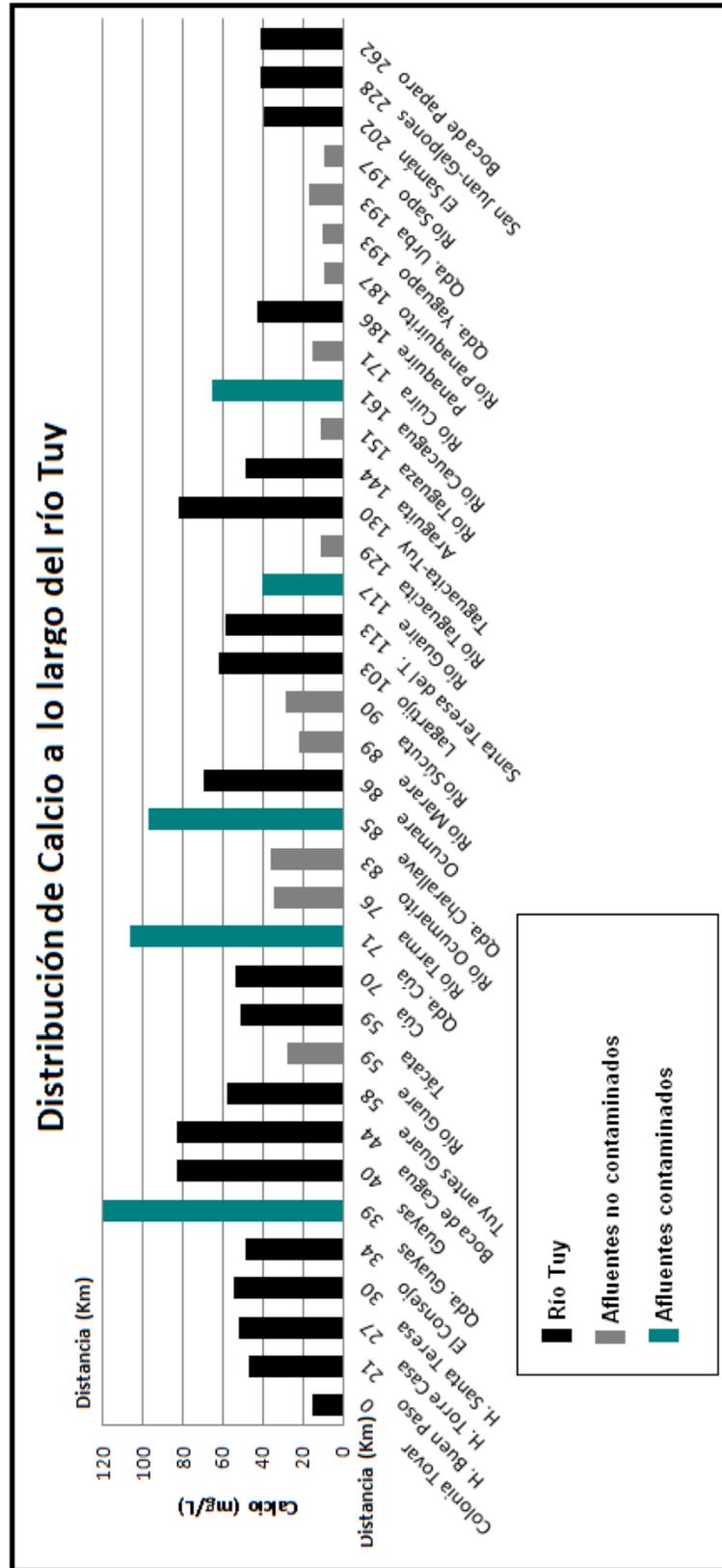


Figura 15 : Distribución de calcio en el Río Tuya y sus afluentes principales



Es importante observar que la concentración de Ca en el Río Tuy a la altura de Santa Teresa del Tuy es de 58,6 mg/L, mientras en el punto Taguacita Tuy, luego de la entrada de los afluentes Río Guaire (39,9 mg/L) y Río Taguacita (10,7 mg/L), la concentración aumenta a 82 mg/L, de manera que los dos afluentes mencionados no ejercen efecto de dilución al río sino que el Ca está siendo inyectado directamente al punto Taguacita-Tuy río por descargas locales.

El mínimo valor de Ca fue detectado en la Colonia Tovar (15,5 mg/L), por lo cual puede señalarse que el río Tuy en esta zona no presenta contaminación por Ca, ya que sus valores son similares al valor promedio en ríos de 15 mg/L (Hem, 1985) y a los de afluentes considerados como no contaminados (Angulo 1980, Yánes 1980, Pineda, 1982) tales como Río Cuira, Río Taguaza y Quebrada Urba. El comportamiento de Ca fue muy similar al K.

Los valores de concentración de Mg varían entre 2,3 mg/L y 53,6 mg/L. La figura 16 señala que desde la Colonia Tovar hasta El Consejo la concentración de Mg presenta bajos valores y similares a los de ríos considerados como no contaminados, como Río Panaquirito, Quebrada Yaguapo, Río Sapó, así como en algunos casos como la Colonia Tovar la concentración de Mg es menor que la abundancia promedio en río que es 5 mg/L (Hem, 1985). Por lo tanto dichos puntos de muestreo presentan poca contaminación por Mg. La zona de Guayas presenta un incremento en la concentración de Mg atribuido a la entrada de la quebrada Guayas, en la cual descargan los desechos de las actividades industriales y domésticas desarrolladas en la zona. En el afluente Río Guaire, a pesar de ser un río no contaminado, es observado un alto valor en la concentración de Mg (22,3 mg/L), atribuido a la litología de la zona, ya que afloran peridotitas serpentinizadas de la zona de lomas de hierro (Zambrano, 1970), por lo cual los minerales ferromagnesianos como micas, piroxenos y anfíboles, tras la meteorización de las peridotitas, se disuelven aportando iones Mg^{2+} al río a través de reacciones tales como (Fyfe, 1981):





Luego es observado un incremento en la zona de Ocumare (20,3 mg/L) por la entrada de las quebradas Cúa (53.6 mg/L) y Charallave (38, 6 mg/L), así como del Río Ocumarito (18, 0 mg/L), los cuales presentaron los valores más altos de Mg en todo el muestreo. Esto es debido a que a los tributarios llegan efluentes industriales, domésticos y agropecuarios, sin embargo este incremento no es tan alto por lo cual los afluentes antes mencionados ejercen poca influencia. Los ríos Marare y Súcuta no ejercieron dilución en el río Tuy ya que a la altura de Lagartijo y Santa Teresa del Tuy, las concentraciones de Mg siguen siendo altas con valores de 17,6 y 16,7 mg/L respectivamente. En las zonas de Taguacita-Tuy y Araguaita hay un pequeño descenso a 14,1 mg/L por la inyección del Río Taguacita (8,3 mg/L), y el Río Guaire (8,5 mg/L) que presentaron menores valores que en el cauce principal. En Panaquire (6,2 mg/L) la concentración se hace mucho más baja por la influencia del río Taguaza (5,2 mg/L). Luego en la desembocadura el aumento de la concentración de Mg a 12,2 mg/L puede deberse a influencia marina (González, 1982).

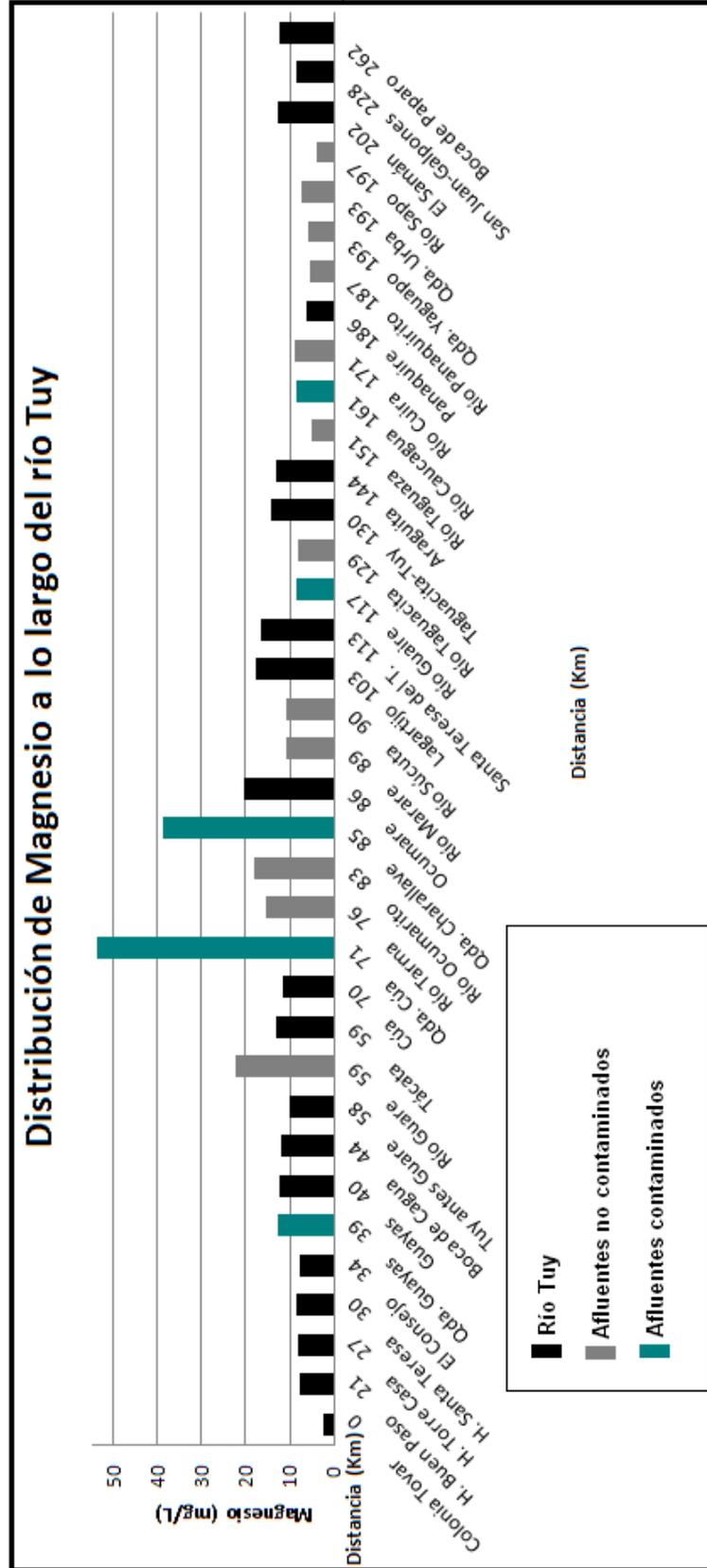


Figura 16 : Distribución de magnesio en el Río Tuy y sus afluentes principales



Aniones

A continuación se presentan y discuten las concentraciones correspondientes a las determinaciones de los aniones en las muestras del Río Tuy y sus principales afluentes (Tabla 11)

En cuanto a la concentración de Cl^- , los valores variaron desde 2,9 mg/L hasta 345,3 mg/L (figura 17). Aguas arriba de la cuenca, en la zona de alto Tuy, desde la Colonia Tovar hasta El Consejo los valores de concentración de Cl^- son bajos de 5 a 10 mg/L, similar a la composición promedio en ríos cuyo valor es de 7,8 mg/L (Fyfe, 1981). Sin embargo existe un aumento de 48,6 mg/L a la altura de Guayas, posiblemente debido a la entrada de la Quebrada Guayas al Río Tuy, en la cual, como fue indicado anteriormente, están siendo descargados efluentes domésticos provenientes de las poblaciones cercanas a Las Tejerías, así como las aguas residuales domésticas que descargan directamente al Río Tuy. En las zonas de Boca de Cagua y Tuy antes de Guare, las concentraciones de Cl^- descienden en un promedio de 18 mg/L, luego por la entrada del Río Guare es ejercido un efecto de dilución reflejado en otros descensos en la concentración en el Río Tuy a la altura de Tácata de 13,6 mg/L.

Luego puede observarse otro aumento en la zona de Ocumare en 35,1 mg/L de Cl^- , probablemente por la inyección al río de la Quebrada Charallave cuyo valor de Cl^- es de 133,9 mg/L; sin embargo, el aumento no es tan grande como es de esperarse por la alta concentración obtenida en Charallave, debido a que también se tiene el efecto de dilución del Río Tarma, considerado como no contaminado de acuerdo a trabajos previos como Angulo, (1980) y Pineda, (1982).


Tabla 11: Medidas de aniones en el Río Tuy y afluentes

Punto	Distancia (Km)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Colonia Tovar	0	9,2	6,1	5,02
H. Buen Paso	21	7,0	40,7	10,54
H. Torre Casa	27	5,7	50,3	9,12
H. Santa Teresa	30	10,7	47,1	10,20
El Consejo	34	10,0	40,7	7,93
Qda. Guayas	39	27,89	172,59	0,17
Guayas	40	48,6	93,3	0,59
Boca de Cagua	44	18,0	100,7	5,81
Tuy antes Guare	58	19,2	58,9	9,53
Río Guare	59	10,5	12,7	2,01
Tácata	59	13,6	65,1	9,95
Cúa	70	19,5	47,1	7,28
Qda. Cúa	71	345,3	138,14	0,17
Río Tarma	76	13,9	19,1	3,35
Río Ocumarito	83	23,5	49,2	0,17
Qda. Charallave	85	133,9	152,23	0,43
Ocumare	86	35,1	82,3	7,36
Río Marare	89	16,9	17,0	1,08
Río Súcuta	90	7,8	10,5	2,11
Lagartijo	103	33,3	71,3	5,47
S. Teresa del Tuy	113	51,1	60,2	5,89
Río Guaire	117	31,2	57,9	2,63
Río Taguacita	129	6,50	5,15	0,83
Taguacita-Tuy	130	28,0	60,0	0,17
Araguita	144	24,1	63,9	2,05
Río Taguaza	151	2,98	ND	0,01
Río Caucagua	161	24,1	104,4	2,71
Río Cuirá	171	8,4	12,7	1,01
Panaquire	186	24,6	43,9	4,60
Río Panaquirito	187	4,2	5,1	0,58
Qda. Yaguapo	193	4,70	ND	0,70
Qda. Urba	193	4,09	17,93	0,58
Río Sapo	197	6,5	7,3	0,65
El Samán	202	24,0	48,2	9,20
San Juan	228	27,2	42,8	5,11
Boca de Paparo	262	23,8	46,0	13,83
Afluentes		ND: No detectado		
Río Tuy				



En la zona de Santa Teresa del Tuy y Lagartijo también hay evidencias de altas concentraciones de Cl^- cuyo valor es de 51,1 mg/L, causado por las descargas de aguas residuales y domésticas de la población de Santa Teresa. Cabe destacar que desde Santa Teresa del Tuy hasta Araguaita la concentración de Cl^- sufre un descenso importante de 51,1 mg/L a 24,1 mg/L, probablemente debido a la influencia del Río Taguacita, cuya concentración es de 6,5 mg/L. Dicho valor es característico de ríos no contaminados, permitiendo de esta manera ejercer efecto de dilución al desembocar en el Río Tuy.

A partir de esta zona hasta El Samán la concentración en el canal principal se mantiene más o menos constante con valores que oscilan entre 20 mg/L y 24 mg/L, observándose que los ríos no contaminados Panaquirito, Quebrada Yaguapo, Quebrada Urba y Río Sapo no ejercieron dilución sobre el Río Tuy. Esto motivado probablemente a las actividades agrícolas y al desarrollo de areneras en la zona cercana a El Samán. En Boca de Paparo la concentración de Cl^- , como fue discutido anteriormente con el Na, pudiera ser atribuida a la influencia marina; de esta manera el NaCl en el río pudiera provenir del reciclado del agua de mar, donde el Cl^- es llevado al río por vientos marinos (González, 1982).

En la tabla 11 y la figura 18 es observada la concentración y distribución de SO_4^{2-} . En líneas generales el comportamiento es similar al del Cl^- , por lo cual se aplican las mismas consideraciones en cuanto a los aumentos y disminuciones de la concentración de este anión en las distintas zonas del río. Sin embargo, es importante observar que el Río Tuy antes de la entrada del Río Guare, presentó una concentración de 58,9 mg/L y después de la inyección de este afluente considerado como no contaminado por Angulo, (1980) y Pineda, (1982), la concentración aumentó a 65 mg/L, es decir que el Río Guare, cuya concentración es similar a la promedio (11,2 mg/L) en ríos (Fyfe, 1981), no ejerció efecto de dilución al Río Tuy, debido probablemente a que la altura de Táchata los residuos domésticos le llegan directamente al cauce principal.

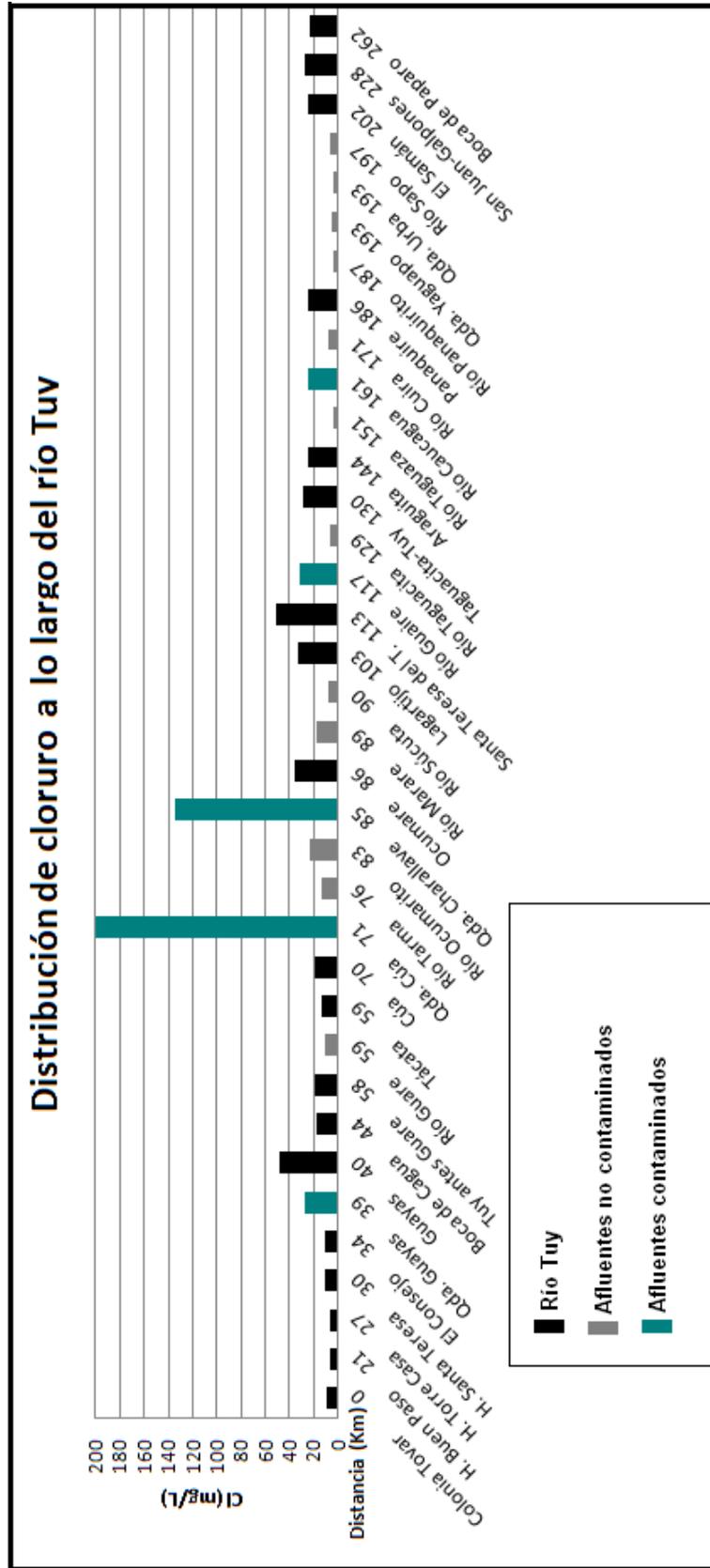


Figura 17 : Distribución de cloruro en el Río Tuy y sus afluentes principales

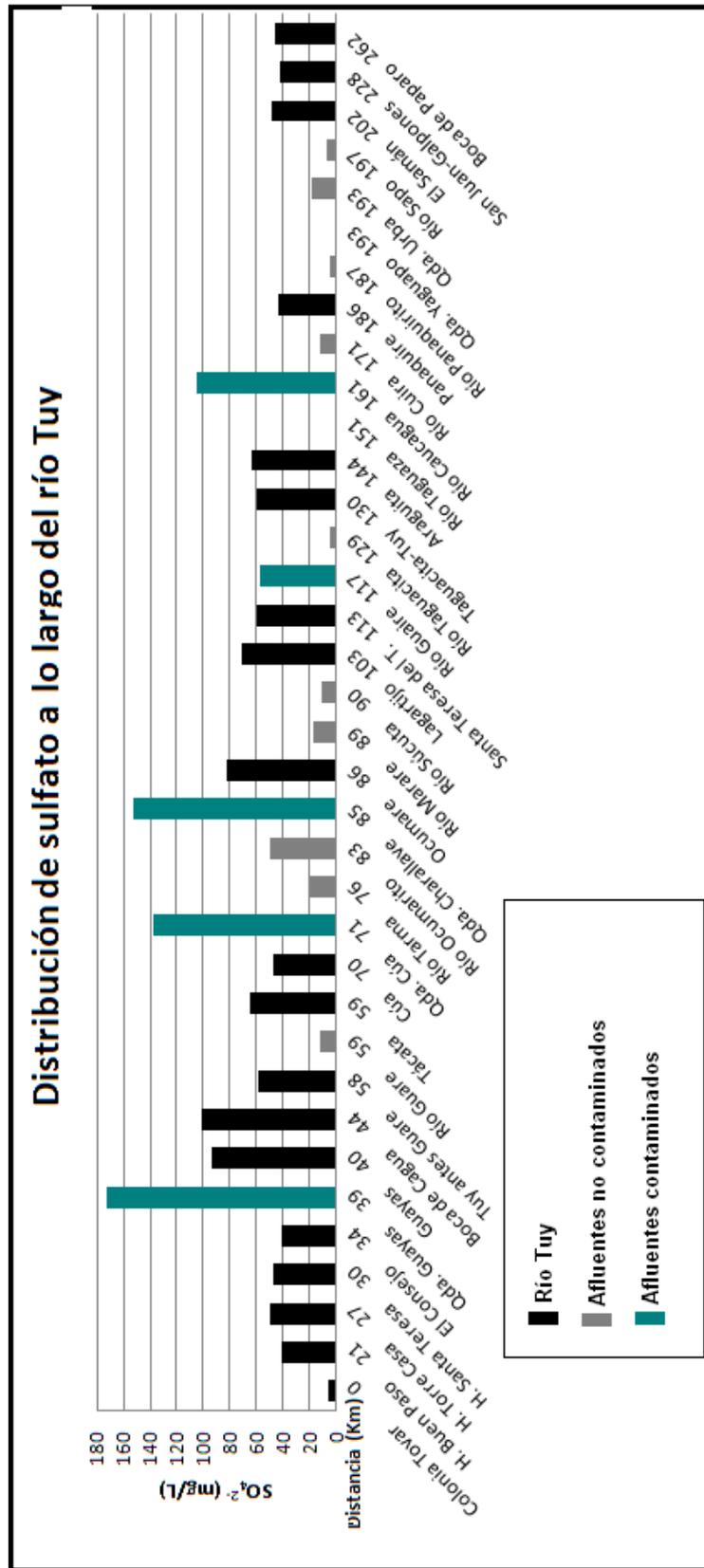


Figura 18 : Distribución de sulfato en el Río Tuy y sus afluentes principales



Con respecto a la concentración y distribución de NO_3^- en el río Tuy, (figura 19) puede observarse que los valores de concentración van desde 0,1 hasta 13,8 mg/L. En cuanto al cauce principal, se detectaron las mínimas concentraciones en Taguacita-Tuy, Guayas y Araguita, mientras que los máximos están en Boca de Paparo, Hacienda Buen Paso, Hacienda Santa Teresa y Tácata. Estos máximos valores encontrados en los sitios menos contaminados por otros aniones, tales como Hacienda buen Paso y Hacienda Santa Teresa, puede ser provocado por la lixiviación de fertilizantes aplicados en las áreas agrícolas circundantes. Lo mismo se aplica para afluentes no contaminados que presentaron altas concentraciones de NO_3^- tales como Río Tarma. Por su parte las quebradas Guayas, Cúa y Ocumarito, presentaron los más bajos valores de NO_3^- , lo cual se atribuye a que las aguas están influenciadas más por actividades domésticas e industriales, que agropecuarias, a diferencia de los ríos Caucagua y Guaire que se ven afectados tanto por actividades agrícolas como por domésticas, así como también por las industriales, particularmente en el caso de Río Caucagua.

En la zona del Río Tuy antes de la confluencia con el Río Guare, la concentración de NO_3^- es de 9,5 mg/L, luego de desembocar el Río Guare los valores aumentan a 11 mg/L, por lo cual se observa que no hay efecto de dilución por parte del Río Guare, motivado a que en Tácata las actividades agropecuarias son abundantes y por lo tanto los residuos son descargados directamente en el Río Tuy.

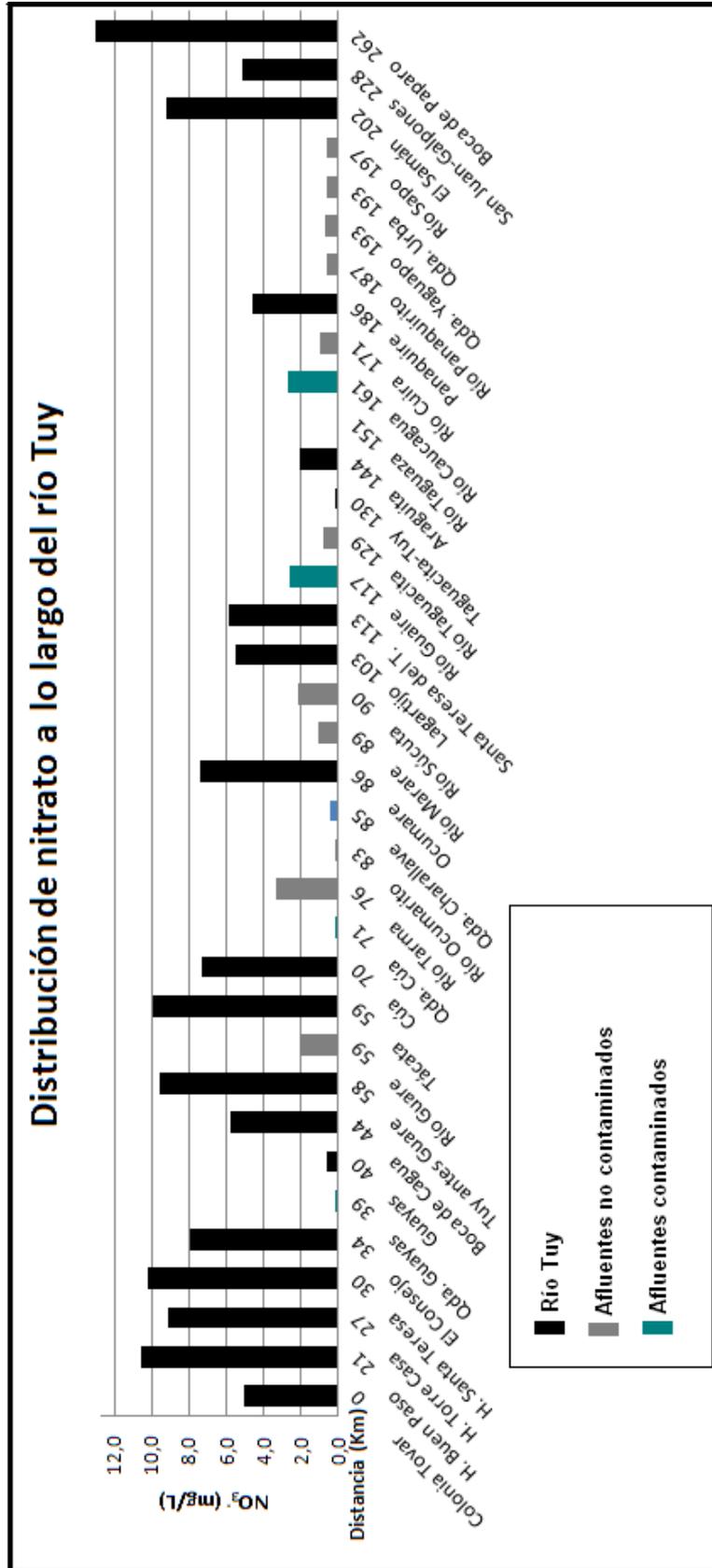


Figura 19 : Distribución de nitrato en el Río Tuyo y sus afluentes principales



Silicio y Fósforo

En esta sección son presentados los resultados correspondientes a las determinaciones de Si y P en los puntos de muestreo correspondientes a la cuenca del Río Tuy y sus principales afluentes (Tabla 12). Para realizar la discusión los datos son presentados adicionalmente en las figuras 20 y 21.

Las concentraciones de P, expresadas como P_2O_5 , variaron entre 0,07 a 6,57 mg/L. La figura 20 muestra la concentración y la distribución de P a lo largo del Río Tuy. Allí puede observarse que las concentraciones más bajas están en las zonas de El Consejo (0,18 mg/L), Hacienda Torre Casa (0,53 mg/L), y Hacienda Buen Paso (0,25 mg/L), sin embargo la concentración promedio en ríos de P_2O_5 es de aproximadamente 0,01 mg/L (Hem, 1985). Nótese que en estas zonas hay valores mayores de concentración, probablemente por la distribución de desechos de animales provenientes de terrenos aledaños y al uso excesivo de fertilizantes en la agricultura, ya que en estas zonas predominan actividades agropecuarias. Al seguir avanzando en el Río Tuy, son observados aumentos de concentración en Guayas (1,12 mg/L) y Boca de Cagua (0,78 mg/L), lo cual pudiera estar asociado a las diversas actividades industriales realizadas en la zona, así como a los desechos domésticos de las comunidades cercanas.

La zona de Ocumare muestra uno de los máximos valores de concentración de fósforo (0,96 mg/L), esto se atribuye a que en este punto el río se encuentra influenciado por la entrada de las quebradas Cúa y Charallave, las cuales presentaron una de las mayores concentraciones de fósforo en todo el muestreo. Los altos valores de concentración para estas quebradas, probablemente sean consecuencia de que en ellas descargan aguas residuales domésticas las cuales contienen detergentes. Adicionalmente, los fertilizantes fosforados provenientes de actividades agrícolas también contribuyen al aumento de las concentraciones de P (Owen, 2000).


Tabla 12: Medidas de silicio y fósforo en el Río Tuy y sus afluentes principales

Punto	P ₂ O ₅ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Colonia Tovar	0,39	19,1
H. Buen Paso	0,25	19,3
H. Torre Casa	0,21	19,3
H. Santa Teresa	0,53	18,7
El Consejo	0,18	18,7
Qda. Guayas	0,09	14,9
Guayas	1,12	21,4
Boca de Cagua	0,78	20,7
Tuy antes Guare	0,27	14,1
Río Guare	0,21	25,7
Tácata	0,37	17,4
Cúa	0,30	14,3
Qda. Cúa	6,57	21,2
Río Tarma	0,18	27,0
Río Ocumarito	1,19	23,9
Qda. Charallave	1,53	20,7
Ocumare	0,96	23,2
Río Marare	0,16	29,9
Río Súcuta	0,21	28,0
Lagartijo	0,82	26,6
Santa Teresa del T.	0,46	20,0
Río Guaire	0,89	14,3
Río Taguacita	0,05	26,2
Taguacita-Tuy	1,17	23,7
Araguita	1,37	21,4
Río Taguaza	0,07	20,3
Río Caucagua	0,89	18,7
Río Cuirá	ND	33,1
Panaquire	0,78	20,1
Río Panaquirito	ND	17,5
Qda. Yaguapo	ND	22,4
Qda. Urba	ND	17,8
Río Sapo	ND	22,0
El Samán	0,27	20,3
San Juan-Galpones	0,41	20,1
Boca de Paparo	0,27	19,4

Afluentes	ND: No detectado
Río Tuy	



El valor más alto de P fue encontrado en quebrada Cúa (6,57 mg/L), probablemente debido a que los niveles de agua estaban muy bajos para la fecha de muestreo, por lo cual se tienden a preconcentrar los elementos presentes en el agua. No obstante, puede señalarse que como este lugar tiene asentamientos humanos marcados, es posible que existan descargas de aguas residuales domésticas ricas en fósforo.

La zona de El Samán presentó uno de los valores más bajos de fósforo, debido a la influencia de los afluentes no contaminados como Río Panaquirito, Quebrada Yaguapo, Quebrada Urba y Río Sapo, que hacen efecto de dilución al río, estos afluentes presentaron concentraciones tan bajas de fósforo que no fueron detectadas.

Con relación a los valores de concentración obtenidos para las zonas de Taguacita en Tuy de 1,17 mg/L, para Araguaita de 1,37 mg/L y para Panaquire de 0,78 mg/L, los altos valores de fósforo son observados debido a la influencia de la entrada de los ríos Guaire y Caucagua, en los cuales llegan gran cantidad de efluentes domésticos que como fue señalado anteriormente, contienen detergentes que presentan altas concentraciones de P, por lo tanto las aguas residuales domésticas inyectan una gran cantidad de este elemento a los ríos (Manaham, 2000).

En la zona de la quebrada Guayas, la concentración de fósforo es muy baja (0,09 mg/L) a pesar de los reportes de contaminación en esta zona. Esto pudiera deberse a que el fósforo en esta zona esté adsorbido sobre partículas de hidróxidos de hierro y aluminio formando partículas insoluble (Marín, 2003).

Si se compara la concentración de P con la de algunas de las medidas de oxígeno disuelto (Tabla 8), puede observarse que en zonas como Taguacita-Tuy y Panaquire mientras menos oxígeno disuelto existe, mayor concentración de fósforo esta presente. Esto pudiera deberse a que la presencia de materia orgánica genera condiciones reductoras en las aguas, conllevando así a una disminución de oxígeno, lo cual corrobora que en las aguas el fósforo se encuentra principalmente unido a materia orgánica formando fosfatos orgánicos (APHA, 1995).

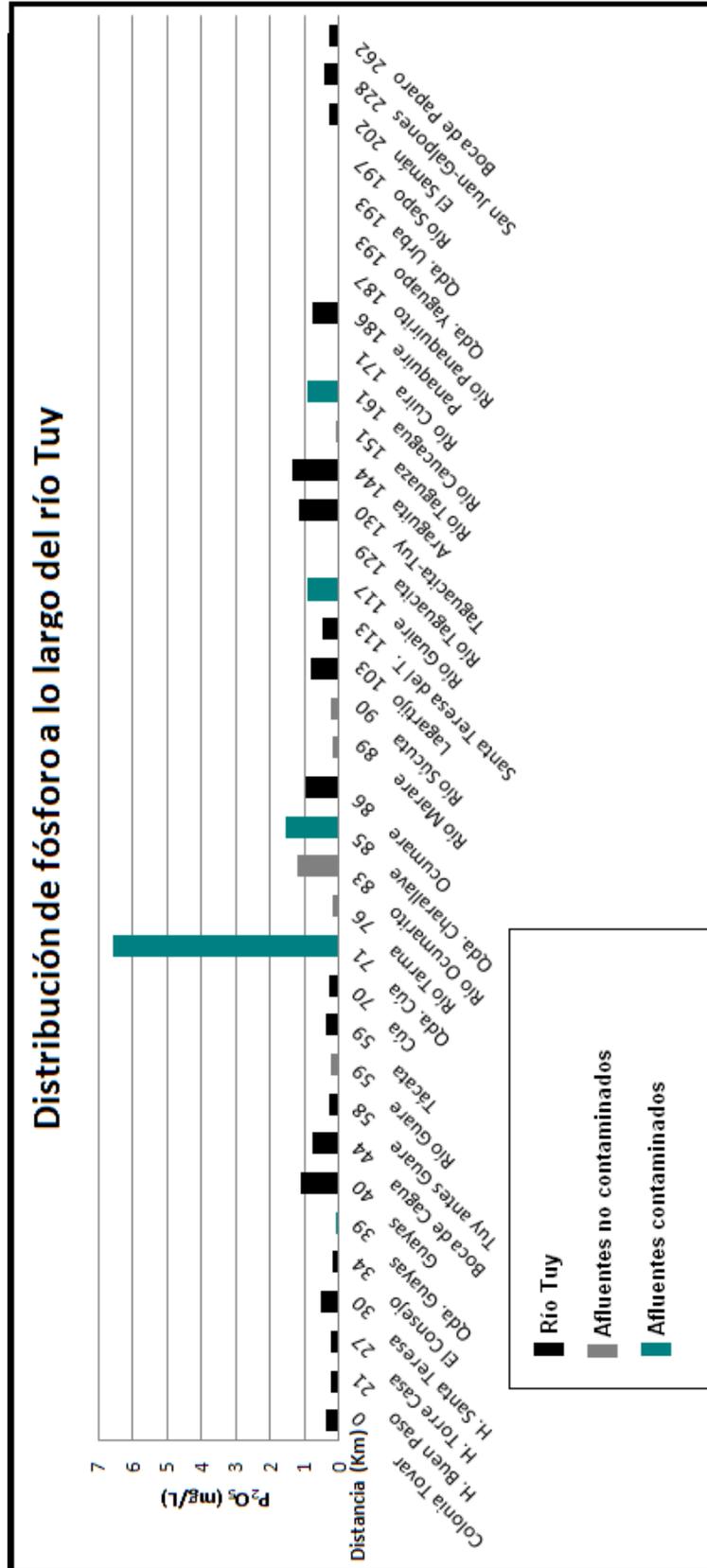


Figura 20 : Distribución de fósforo en el Río Tuy y sus afluentes principales



La concentración de SiO_2 a lo largo del río Tuy presentó valores que fluctuaron entre 14,1 y 33,1 mg/L. Estos valores están dentro del intervalo normal de concentración de sílice en aguas naturales, que corresponde entre 1 a 30 mg/L (Manaham, 2000). En cuanto a la distribución a lo largo del río se observa en la figura 21 que no hay variaciones significativas. Los valores extremos son encontrados en quebrada Cuira, Río Marare, Río Súcuta y Río Tarma; los cuales son considerados como ríos no contaminados por Angulo, (1980) y Pineda, (1982), por lo cual se puede asumir que el control de sílice en las aguas del río Tuy es natural, y que el aporte de este elemento al río es consecuencia del proceso de meteorización de silicatos, considerando que el silicio se encuentra en prácticamente en todas las rocas.

Los más bajos valores fueron reportados en las zonas de Tuy antes de Guare, Cúa, Río Guaire y Quebrada Guayas; es decir, en los lugares más contaminados. Probablemente en estas zonas, el silicio esté precipitado con otros elementos tales como Al^{3+} por lo cual exhibe bajas concentraciones en la fase disuelta (Marín, 2003).

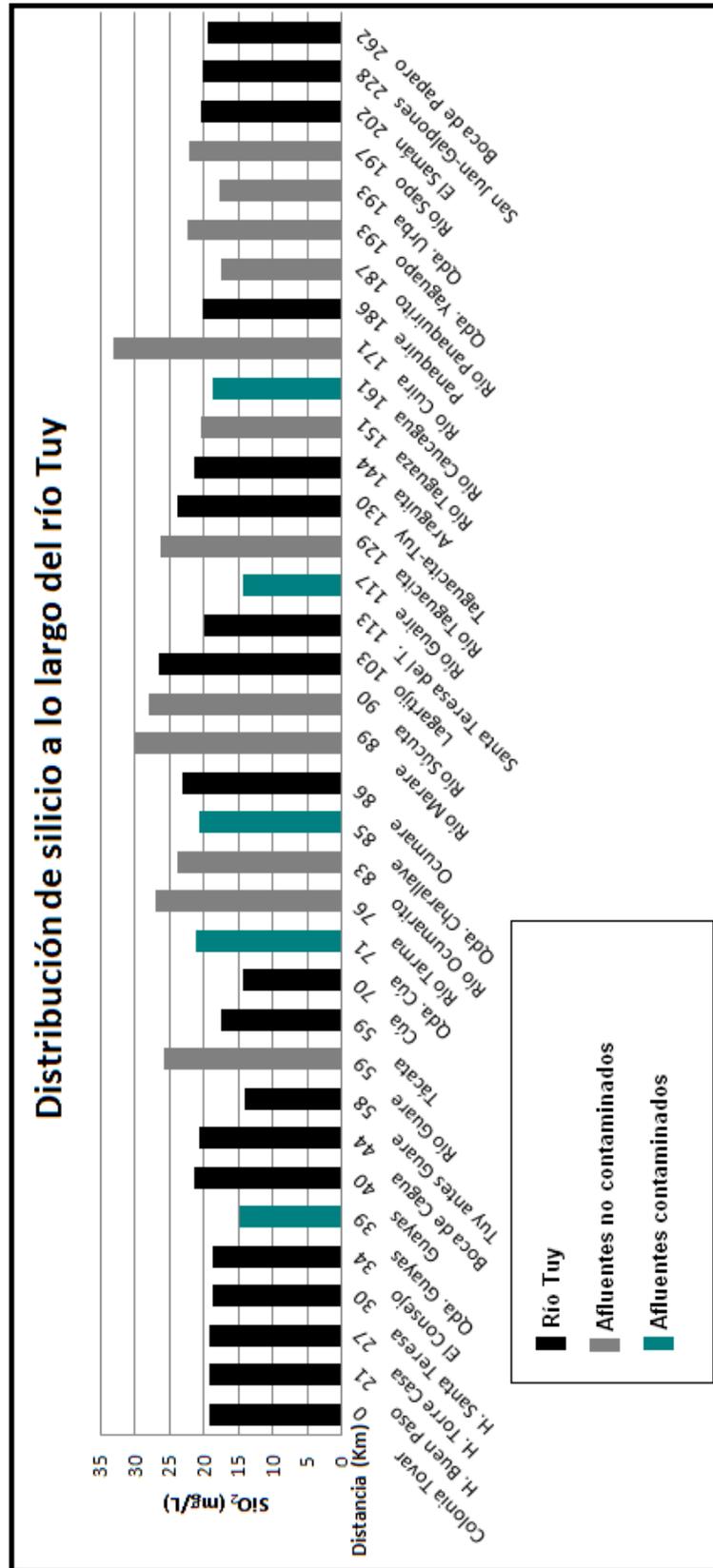


Figura 21: Distribución de silicio en el Río Tuy y sus afluentes principales



Metales traza

En esta parte de la investigación son presentadas y discutidas las concentraciones de los metales traza en las muestras recolectadas en el Río Tuy y sus afluentes principales (Tabla 13).

De acuerdo con la tabla 13 puede observarse que en comparación con los otros elementos discutidos anteriormente los metales traza en las muestras del río Tuy están en concentraciones muy bajas (en el orden $\mu\text{g/L}$) debido a que estos elementos en general no se presentan como cationes libres, sino formando complejos aniónicos (Auge, 2004) o pudiendo estar asociados a compuestos orgánicos de baja movilidad. Por lo tanto metales suelen ser más altos en las fases sólidas de los sistemas acuosos que bajo su forma totalmente disuelta (Rodríguez, 2009).

En las figuras 22 hasta 29 se muestra la distribución espacial de los diferentes metales traza en el Río Tuy.

El primer metal a discutir será el Al, el cual al igual que los demás metales traza, presenta muy bajas concentraciones. Esto sucede particularmente debido a que en el intervalo de pH de 6 a 9, que es el habitual en aguas naturales y similar al encontrado en el Río Tuy, la solubilidad de Al contenido en las rocas y en los suelos que están expuestos al agua es muy pequeña (Baird, 2001), por lo tanto como fue indicando anteriormente en las fases sólidas serán encontrados las mayores concentraciones de este metal. En la tabla 13 puede observarse los valores de las concentraciones de Al que fluctuaron entre $9,3 \mu\text{g/L}$ a $87,8 \mu\text{g/L}$.


Tabla 13: Concentración de metales en los puntos de muestreo.

Punto	Al (µg/L)	Fe(µg/L)	Mn(µg/L)	Ni(µg/L)	Cu(µg/L)	Zn(µg/L)	Pb(µg/L)	Co(µg/L)
Colonia Tovar	45,7	43,1	3,0	1,4	2,1	1,5	2,0	0,3
H. Buen Paso	47,1	30,8	7,9	1,8	2,2	2,0	0,3	0,3
H. Torre Casa	44,3	21,9	20,0	1,6	1,8	1,6	0,9	0,1
H. Santa Teresa	38,7	15,4	12,7	1,5	1,6	0,3	1,4	0,2
El Consejo	53,3	29,7	5,9	1,8	1,6	1,3	2,3	0,4
Qda. Guayas	14,1	319,4	210,5	2,6	1,1	2,0	1,6	0,6
Guayas	26,1	24,1	88,5	2,5	2,1	2,1	0,3	0,4
Boca de Cagua	21,5	18,7	22,6	3,6	2,0	1,8	2,2	0,4
Tuy antes Guare	39,1	25,1	4,2	2,8	3,0	1,7	1,4	0,3
Río Guare	23,2	55,4	8,4	3,9	2,1	0,9	1,9	0,1
Tácata	40,0	34,3	15,8	2,6	3,1	2,0	0,5	0,3
Cúa	25,4	16,2	4,6	3,0	3,1	2,2	1,1	0,2
Qda. Cúa	18,9	80,6	331,4	4,4	1,0	2,5	1,5	0,2
Río Tarma	14,4	14,2	17,9	1,4	2,4	1,4	1,9	0,1
Río Ocumarito	87,8	38,9	297,8	2,4	1,3	1,7	0,8	0,3
Qda. Charallave	16,0	21,1	30,6	9,6	2,6	2,0	0,5	0,7
Ocumare	15,9	14,4	9,1	4,4	2,9	2,5	0,7	0,2
Río Marare	16,7	33,9	28,6	0,7	1,9	1,6	1,4	0,1
Río Súcuta	31,7	37,4	1,6	0,7	2,5	1,6	1,0	0,1
Lagartijo	14,3	15,6	2,7	7,6	3,6	2,6	1,3	0,2
S.Teresa del Tuy	33,0	19,2	42,5	5,7	6,5	5,3	0,4	0,4
Río Guaire	40,9	32,1	24,4	8,5	6,3	5,4	2,9	0,8
Río Taguacita	27,7	86,1	43,8	1,2	1,7	1,8	0,9	0,1
Taguacita-Tuy	17,2	28,9	NM	3,5	0,7	0,2	0,8	0,4
Araguita	42,6	25,7	47,1	7,3	2,9	1,9	1,5	0,6
Río Taguaza	9,3	127,1	297,3	0,6	1,0	1,7	1,3	0,3
Río Caucagua	16,4	24,7	10,2	6,8	3,7	2,7	2,6	0,6
Río Cuira	25,2	41,0	16,4	1,6	1,3	0,6	1,6	0,1
Panaquire	28,6	20,2	436,8	6,9	4,4	3,0	1,2	0,7
Río Panaquirito	18,3	61,4	45,0	1,2	0,8	1,3	1,1	0,1
Qda. Yaguapo	15,5	147,7	80,1	1,0	1,2	0,5	2,0	ND
Qda. Urba	24,8	41,6	5,1	1,2	1,1	1,3	1,2	0,2
Río Sapo	NM	NM	14,2	3,4	3,6	2,9	1,8	0,2
El Samán	42,7	95,6	19,2	8,8	4,1	3,9	1,6	0,5
San Juan	19,2	20,1	63,9	4,6	4,0	3,3	0,8	0,2
Boca de Paparo	24,5	84,6	122,7	7,2	3,3	3,6	2,3	0,5
Afluentes Río Tuy				ND: No detectado NM: No medido				

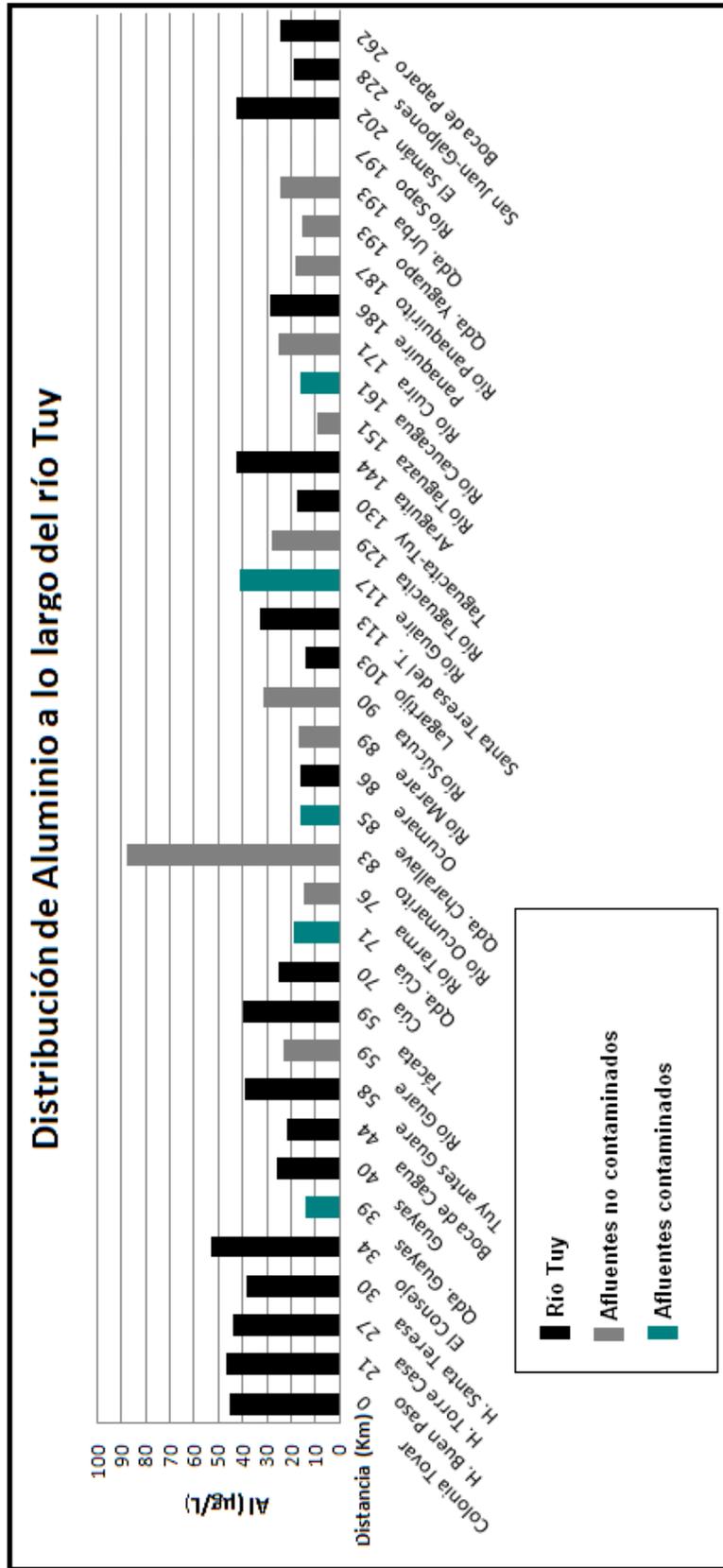


Figura 22 : Distribución de aluminio en el Río Tuy y sus afluentes principales



En la figura 22 es mostrada la distribución espacial del Al, allí puede observarse que desde la colonia Tovar hasta El Consejo, están los valores más altos en cuanto al cauce principal se refiere; esto puede ser atribuido a las actividades agropecuarias que se desarrollan en esa zona, donde el Al pudiera provenir del lavado de suelos a causa de las aguas de escorrentía producidas por las lluvias. Por otro lado, estas altas concentraciones de Al pueden ser motivado a la acidificación de las muestras recolectadas lo cual conlleva a la dispersión de partículas coloidales de Al que se encuentran en dichas muestras, agregando de esta manera, constituyentes disueltos de Al (Yánes, 1980).

En las zonas donde se encuentran los ríos no contaminados tales como río Taguaza, Quebrada Panaquirito y Quebrada Urba, predominan bajas concentraciones de Al. Esto puede ser atribuido a que estas son aguas limpias bien oxigenadas, por lo cual no hay condiciones de preservación de materia orgánica, conllevando así a que no existan complejos solubles de aluminio-materia orgánica favoreciendo la formación de hidróxidos insolubles (Hem, 1985).

Las concentraciones de Fe variaron entre 14,2 $\mu\text{g/L}$ y 319,4 $\mu\text{g/L}$. La figura 23 indica que en la zona que va desde la Colonia Tovar hasta El Consejo, las concentraciones se encuentran en el orden de 40 a 50 $\mu\text{g/L}$, luego se observa un gran incremento de hasta 319,4 $\mu\text{g/L}$ en la quebrada Guayas. Esto pudiera deberse a que en las zonas mencionadas de primero, donde nace el río, son aguas bien oxigenadas, evidenciado por lo valores de OD en la Colonia Tovar, observaciones en campo, y los valores de Eh, de manera que en presencia de oxígeno, el ión ferroso es inestable y forma partículas coloidales insolubles de hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Polevoy, 1996). Por su parte, en la quebrada Guayas se encuentran una gran cantidad de desechos domésticos los cuales generan condiciones de preservación de la materia orgánica, conllevando así a que el hierro esté en la fase soluble formando complejos organometálicos (Lindsay W, 1978); la misma explicación se aplica para las altas concentraciones detectadas en Quebrada Cúa (80,6 $\mu\text{g/L}$) y Río Ocumarito (38,9 $\mu\text{g/L}$).

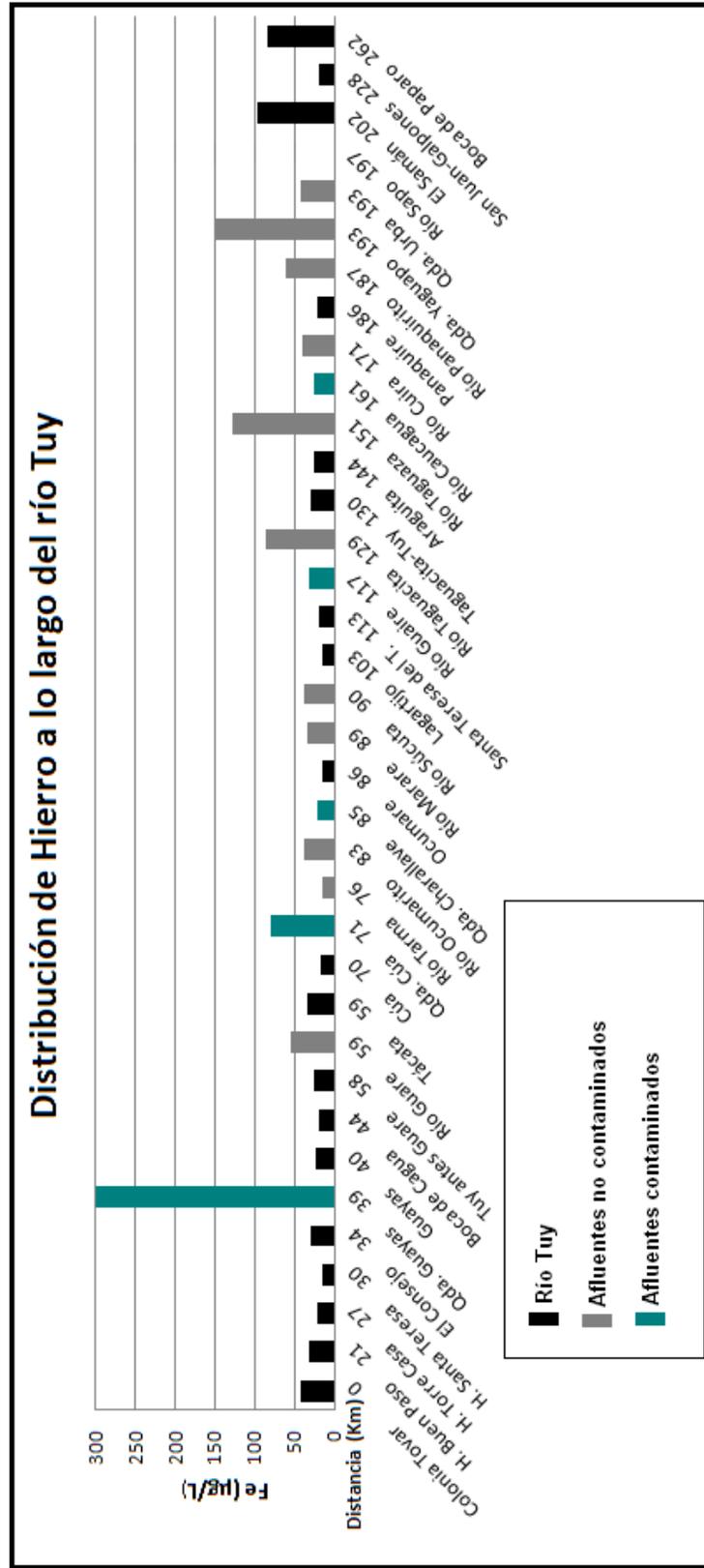


Figura 23: Distribución de hierro en el Río Tuy y sus afluentes principales



En ríos no contaminados como Taguacita, Taguaza, Sapo y Quebrada Yaguapo, se detectaron altas concentraciones de Fe, las cuales pueden estar atribuidas a factores naturales más que antrópicos. Para el caso de Taguacita y Taguaza la concentración de Fe es alta debido a que estos ríos están ubicados en la unidad ambiental sur-este con litología formada por rocas meta-volcánicas de composición basáltico-andesítica y algunos afloramientos de rocas ultramáficas (Zambrano, 1970), generándose Fe producto de la meteorización de estas rocas.

En líneas generales, la baja concentración de Al y Fe encontradas en las muestras se atribuye a que de acuerdo con los diagramas de estabilidad de dichos elementos, a pH entre 6 y 8, que es el pH en el cual están las muestras del río Tuy, las especies que predominan están en estado sólido, por lo cual estos elementos estarán en mayores concentraciones en la fase de sólidos suspendidos y sedimentos (Rodríguez, 2009).

Las concentraciones de Mn están en un intervalo que oscila desde 1,6 $\mu\text{g/L}$ hasta 436,8 $\mu\text{g/L}$; la distribución de la concentración de Mn a lo largo del río es mostrada en la figura 24.

La mayor concentración de este metal es encontrada en Panaquire con un valor de 436,8 $\mu\text{g/L}$; sin embargo de acuerdo con la tabla 8, la concentración de oxígeno disuelto en esta zona está por debajo de los límites permitidos, lo que indica que pudiera haber materia orgánica presente, de esta manera el Mn estaría formando complejos con esa materia orgánica, permitiendo la predominancia de la forma soluble de este metal (Marín, 2003).

Los altos valores de Mn en Quebradas Guayas y Quebrada Cúa probablemente también sean debido a que éstas presentan una alta concentración de desechos orgánicos, esto evidenciado por el bajo Eh, indicando que el manganeso se encuentre formando complejos solubles con la materia orgánica.



Es importante mencionar que el Río Ocumarito es considerado como un afluente no contaminado por investigadores como Angulo (1980), Yánes(1980), y Pineda (1982); sin embargo, en la figura 24 pueden observarse altas concentraciones de Mn. En líneas generales este afluente presentó altas concentraciones de los demás elementos determinados, esto pudiera estar motivado a que en la campaña de recolección no se tomaron las muestras directamente del embalse sino en una zona más cercana al cauce principal, por lo cual probablemente esta zona pudiera estar alterada por descargas locales.

La tabla 13 y la figura 25 indican que las concentraciones de Cu varían desde 0,7 $\mu\text{g/L}$ hasta 6,5 $\mu\text{g/L}$, encontrándose por debajo de la concentración promedio de 10 $\mu\text{g/L}$ (Hem, 1985), sin embargo estos valores son reportados para aguas, que incluye sólidos disueltos y sólidos suspendidos y no específicamente fase de sólidos disueltos. Los mayores valores en Santa Teresa del Tuy y en las zonas cercanas a la desembocadura del río. En los afluentes como el Río Guaire se observaron los valores más altos (6,3 $\mu\text{g/L}$), atribuido a aportes antrópicos provenientes de las descargas de la ciudad de Caracas; en el Río Caucagua también se observan altos niveles (3,7 $\mu\text{g/L}$), tal vez por a las actividades tanto domésticas provenientes de Guarenas, Guatire, así como por las actividades agrícolas, ya que como la mayoría de las sales de Cu son solubles, este elemento es transportado por los ríos por las aguas de lluvia que limpian las zonas de cultivo (Murgel, 1984). De igual manera como en las zonas cercanas a la desembocadura hay desarrollo de actividades agrícolas, también aplican las mismas consideraciones que el Cu. Los menores valores de Cu en los ríos no contaminados Panaquirito (0,8 $\mu\text{g/L}$), Taguaza (1,0 $\mu\text{g/L}$), Quebrada Urba (1,1 $\mu\text{g/L}$), Quebrada Yaguapo (1,2 $\mu\text{g/L}$), se atribuyen al poco desarrollo de actividades agrícolas. En los puntos de muestreo El Consejo y Hacienda Torre Casa también fueron encontrados bajos valores de concentración de Cu debido a que predominan pocas actividades industriales.

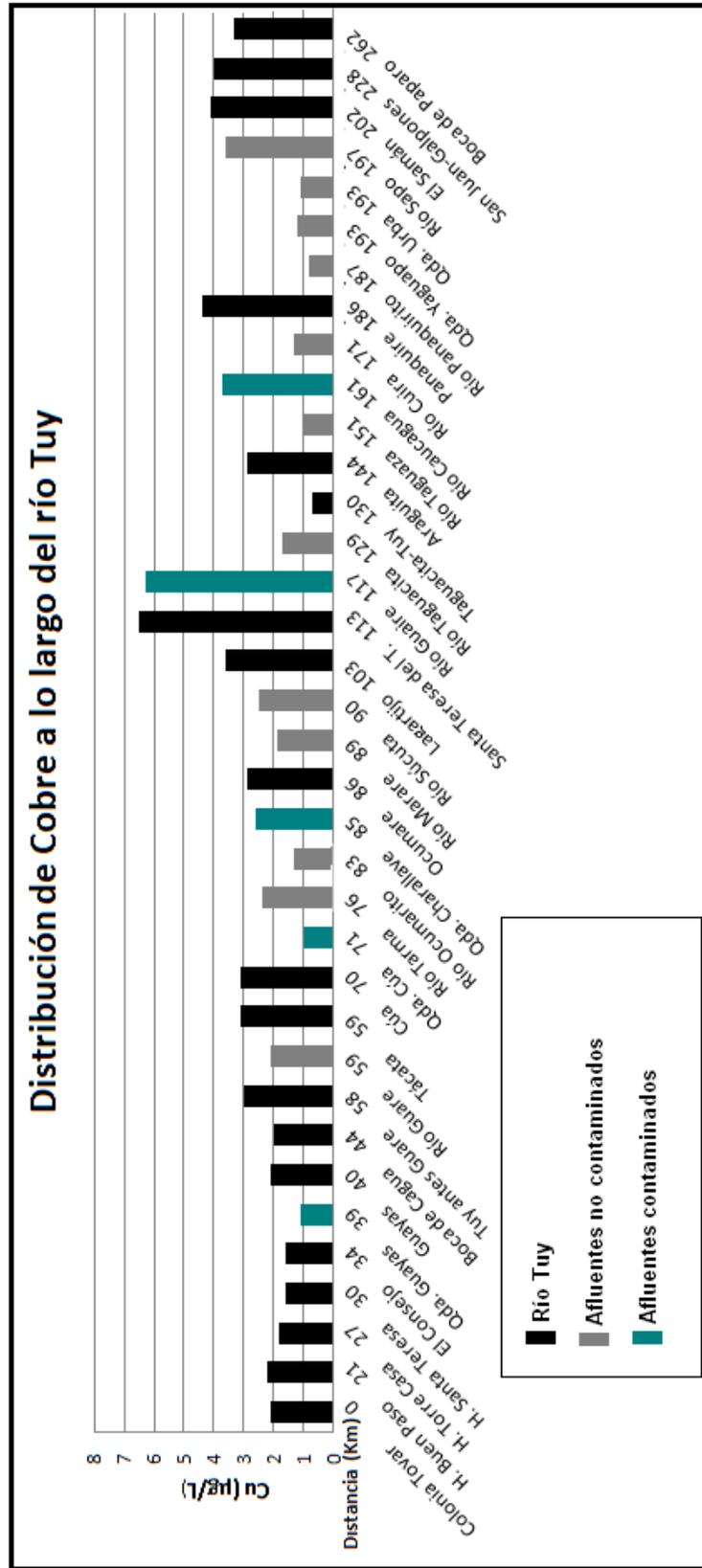


Figura 25 : Distribución de cobre en el Río Tuy y sus afluentes principales



El Zn también presentó un comportamiento muy similar al Cu, (figura 26), cuyo intervalo de concentraciones en las muestras fue de 0,2 $\mu\text{g/L}$ a 5,4 $\mu\text{g/L}$. Los máximos valores de igual manera que el Cu, fueron encontrados en el río Guaire y en Santa Teresa del Tuy, atribuyendo esto a las aguas domésticas, ya que la mayoría de las tuberías son elaboradas de hierro galvanizado (Murgel, 1984). El Zn está presente en fungicidas (Murgel, 1984), lo cual explica los incrementos en las zonas cercanas a la desembocadura. En líneas generales el Zn presentó un comportamiento similar al Cu. De igual manera los valores estuvieron por debajo del intervalo promedio para aguas de 5 a 45 $\mu\text{g/L}$ (Hem, 1985).

En cuanto al Ni, este también presentó un comportamiento similar al Cu, las concentraciones variaron desde 0,6 $\mu\text{g/L}$ hasta 9,6 $\mu\text{g/L}$. En la figura 27 puede observarse que desde la Colonia Tovar las concentraciones se mantienen bajas con ligeros aumentos en Guayas, Boca de Cagua y Ocumare. Esto debido a que existe un mayor incremento poblacional con respecto a los primeros puntos de muestreo; asimismo, el aumento en Ocumare de 4,4 $\mu\text{g/L}$ se debe probablemente a la entrada de la quebrada Charallave, la cual es la que presenta las mayores concentraciones de níquel (9,6 $\mu\text{g/L}$). Cabe mencionar que en el Río Guare, la concentración de Ni fue de 3,0 $\mu\text{g/L}$, resultando alta para ser un afluente no contaminado; esto podría ser debido a que este elemento puede estar sustituyendo al Fe en minerales ferromagnesianos (Hem, 1985), considerando que en el Río Guare afloran peridotitas serpentizadas (Zambrano, 1970), ocurre un proceso similar al explicado para la concentración de Mg en este afluente. Puede notarse en la figura 27 que el Río Guare a pesar de presentar mayor concentración de Ni, no ejerce ningún efecto inmediato de aumento en el Río Tuy, sin embargo al seguir avanzando por el cauce principal puede observarse que la tendencia es a un aumento en la concentración.

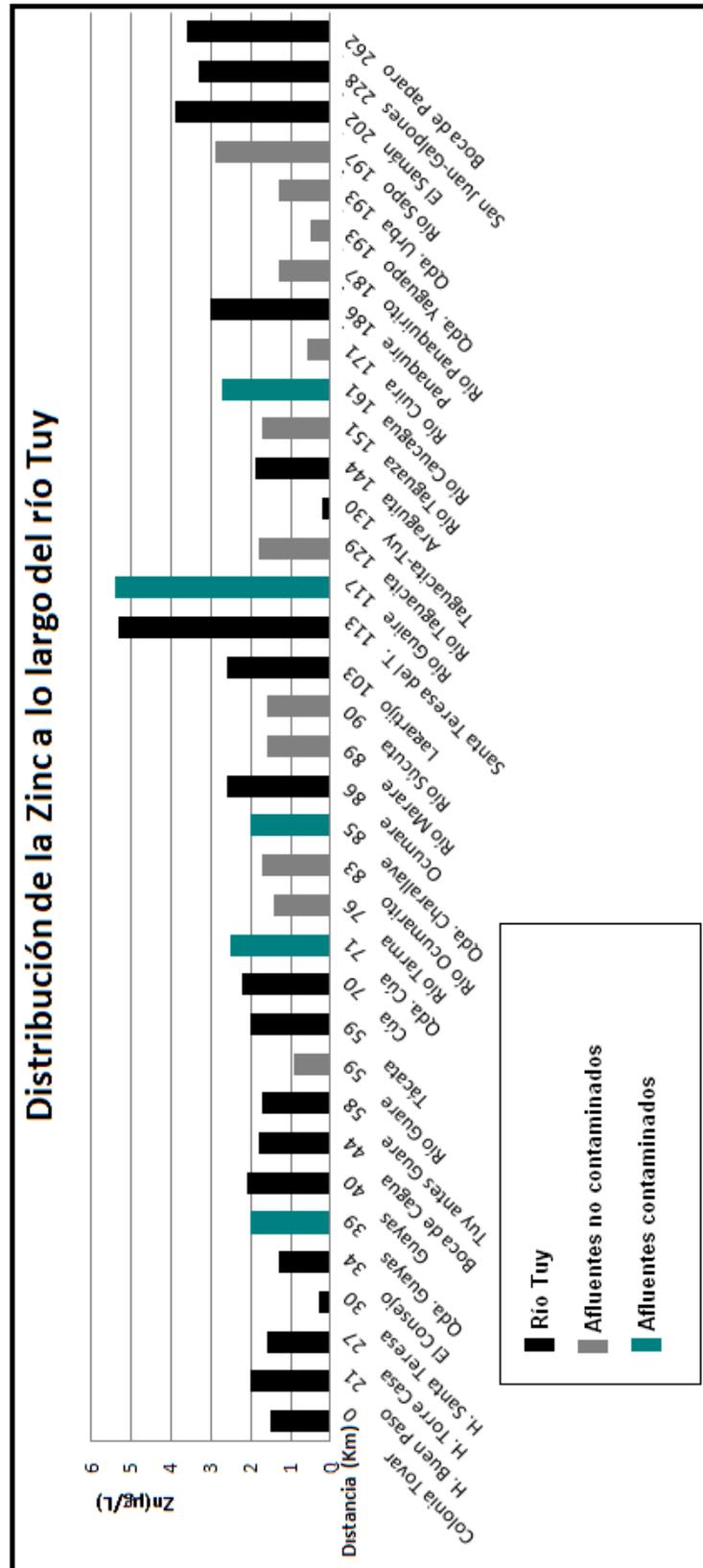


Figura 26 : Distribución de zinc en el Río Tuy y sus afluentes principales

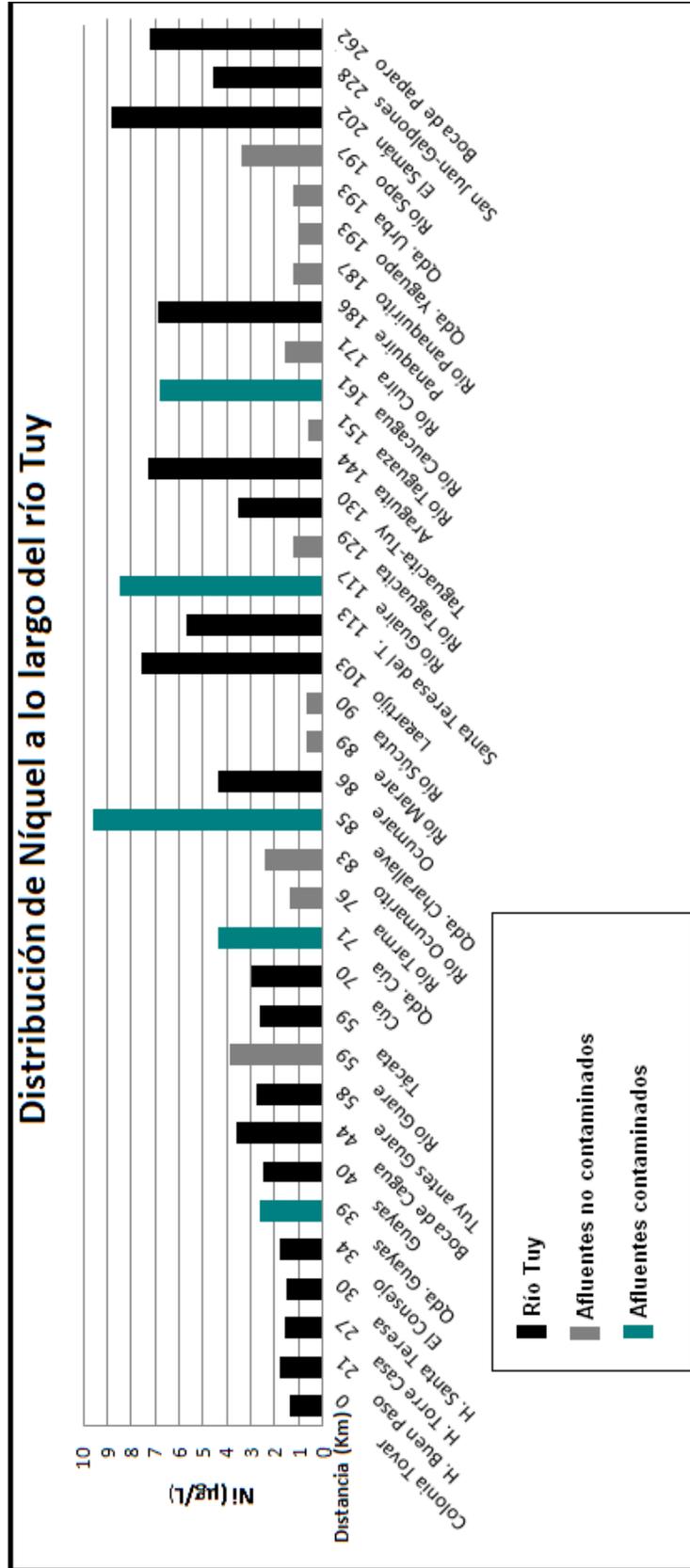


Figura 27 : Distribución de níquel en el Río Tuy y sus afluentes principales



En las zonas medias como Santa Teresa y Lagartijo, las concentraciones de Ni incrementan más, al igual que en Araguaita, Panaquire y en las zonas cercanas a la desembocadura El Samán, San Juan y Boca de Paparo. Estos altos niveles se deben probablemente a las actividades domésticas desarrolladas en las zonas medias y a las industrias que pueden aportar Ni, al igual que la agricultura en las zonas cercanas a la desembocadura. Los afluentes correspondientes a Río Cuira, Río Panaquirito, Quebrada Yaguapo, Quebrada Urba y Río Sapo presentaron muy bajas concentraciones de Ni debido a que hay poco desarrollo de actividades antrópicas, ya que estudios previos han demostrado que estos ríos son considerados como no contaminados por Angulo, (198) y Pineda , (1982).

Para el Pb el intervalo de concentraciones va desde 0,3 $\mu\text{g/L}$ a 2,9 $\mu\text{g/L}$. Se observa en la figura 28 que las concentraciones más altas en cuanto a afluentes se encuentran en los ríos Guaire y Caucagua, esto debido a que a estos ríos llegan los efluentes domésticos de las grandes ciudades Caracas (río Guaire), Guarenas y Guatire.

El Pb proviene del polvo de la calle originado a partir de las partículas emitidas por la combustión de la gasolina con Pb (Murgel, 1984), así como también proviene del humo de cigarrillos, es decir que estas actividades se dan principalmente en las grandes ciudades en las cuales hay mayor afluencia vehicular. De igual manera el Pb también es utilizado para la construcción de cañerías, por lo cual las aguas residuales domésticas que llegan a los ríos Guaire y Caucagua, vienen con altas concentraciones de este metal. En la zona de Boca de Paparo se detectaron altas concentraciones de Pb, lo cual puede ser explicado por el hecho de su cercanía la Mar Caribe, donde hay tráfico de embarcaciones, ocasionando partículas residuales de aerosol de Pb que llegan al río. (Luna, 1997).

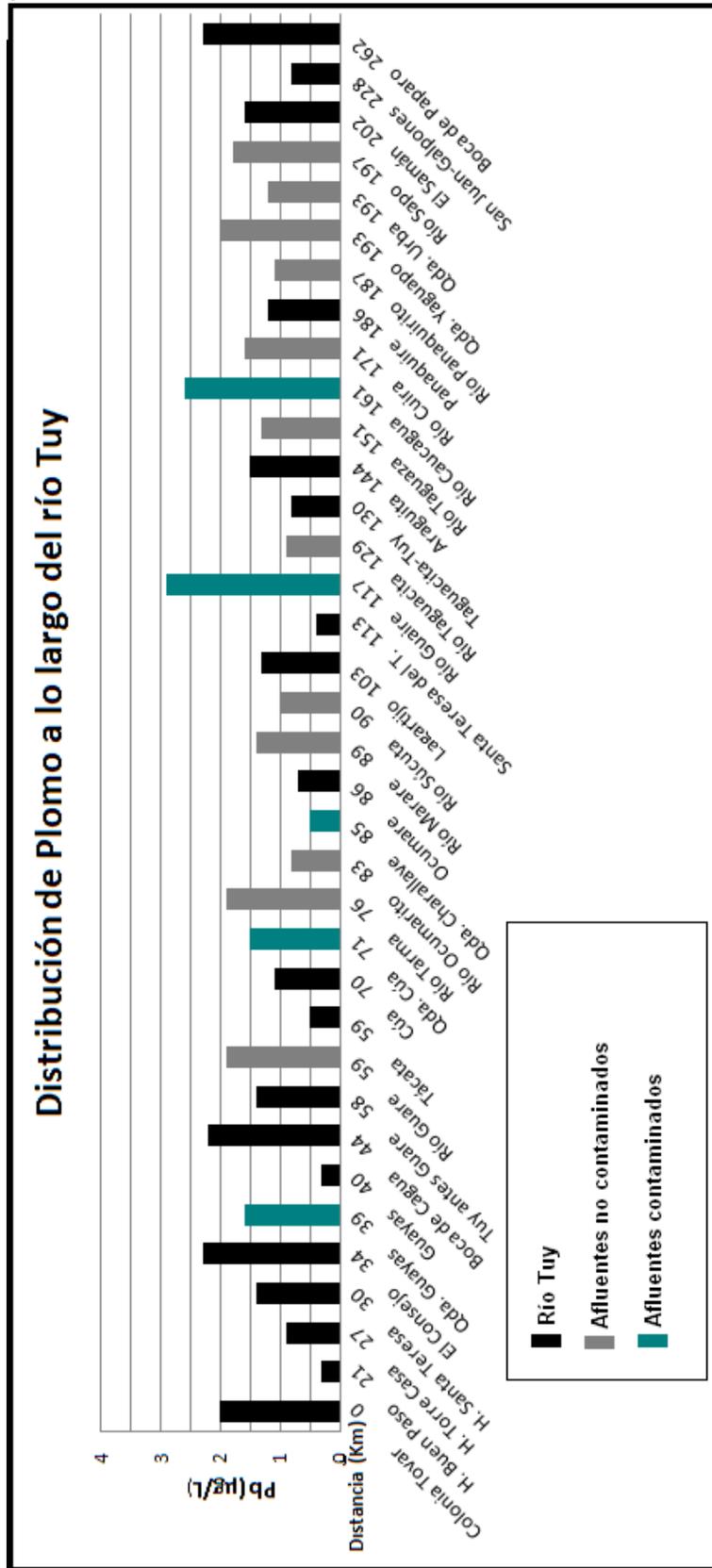


Figura 28 : Distribución de plomo en el Río Tuyo y sus afluentes principales



En la Colonia Tovar se encontraron altas concentraciones de Pb, que pudieran ser atribuidas a las actividades agrícolas, principalmente por el uso de maquinarias agrícolas cuyas baterías están compuestas por Pb (Murillo, 1987). Las más bajas concentraciones predominan en Hacienda Buen Paso, Guayas, Santa Teresa del Tuy y Táchata.

Las concentraciones de cobalto identificadas en las muestras fueron de muy bajos valores, ya que este elemento suele estar coprecipitado por óxidos de manganeso y hierro (Hem, 1985). La tabla 13 y la figura 29 presentan los valores de concentración de Co, los cuales variaron entre 0,1 $\mu\text{g/L}$ y 0,8 $\mu\text{g/L}$, obteniendo las mayores concentraciones en los afluentes que están más afectados por las actividades humanas, a saber: Río Guaire (0,8 $\mu\text{g/L}$), Río Caucagua (0,7 $\mu\text{g/L}$), Quebrada Guayas (0,6 $\mu\text{g/L}$) y Quebrada Charallave (0,7 $\mu\text{g/L}$). Debido a ello puede afirmarse que el Co está asociado a efluentes domésticos e industriales, por ejemplo este metal es utilizado como pigmento en cerámicas y pinturas (Cespón, 2008). En el cauce principal los mayores valores están en Panaquire (0,7 $\mu\text{g/L}$) y Taguacita-Tuy (0,4 $\mu\text{g/L}$), por la influencia de la entrada de los Ríos Guaire y Caucagua. Por otro lado, en los ríos no contaminados (Angulo et al, 1980; Pineda et al, 1982) la concentración de este metal en su mayoría fue menor a 0,2 $\mu\text{g/L}$, que es el valor promedio en ríos (Hem, 1985) y en líneas generales fueron las concentraciones de Co más bajas del muestreo.

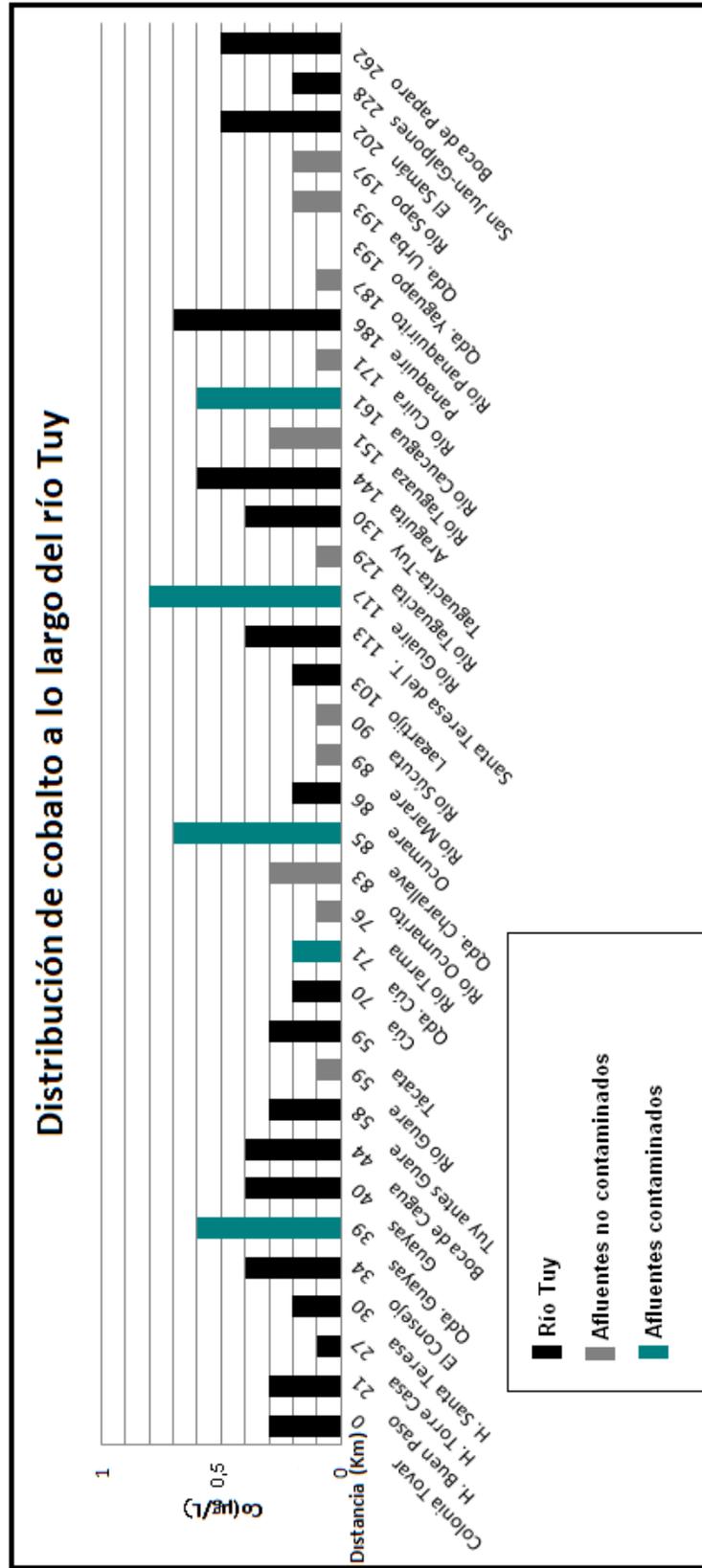


Figura 29 : Distribución de cobalto en el Río Tuy y sus afluentes principales



Correlaciones Inter-elementales

A continuación serán presentadas en la tabla 14 y 15 los coeficientes de regresión entre los elementos medidos en las muestras del Río Tuy.

Tabla 14: Coeficientes de correlación entre los iones, sólidos disueltos totales y parámetros fisicoquímicos medidos en la Cuenca del Río Tuy

	T	pH	CE	SDT	Na	K	Mg	Ca	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
T	1,00	-0,04	0,58	0,55	0,54	0,48	0,50	0,43	0,38	0,55	0,56	-0,32
pH		1,00	-0,05	-0,09	-0,12	-0,23	0,15	0,01	-0,01	-0,13	-0,12	0,05
*EC			1,00	0,97	0,93	0,87	0,88	0,82	0,83	0,86	0,87	-0,14
SDT				1,00	0,90	0,90	0,85	0,88	0,82	0,89	0,93	-0,08
Na					1,00	0,81	0,90	0,64	0,94	0,68	0,74	-0,22
K						1,00	0,65	0,86	0,69	0,88	0,83	-0,02
Mg							1,00	0,60	0,89	0,58	0,73	-0,17
Ca								1,00	0,55	0,94	0,85	0,08
Cl ⁻									1,00	0,56	0,60	-0,20
SO ₄ ²⁻										1,00	0,86	-0,08
HCO ₃ ⁻											1,00	-0,06
NO ₃ ⁻												1,00

*CE: Conductividad eléctrica

Tabla 15: Coeficientes de correlación de los metales pesados

	Al	Fe	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb	Co
Al	1,00	0,59	-0,09	-0,03	0,14	0,12	0,09	-0,03
Fe			0,07	-0,14	-0,16	0,02	0,21	0,03
Mn				0,02	-0,26	-0,17	-0,16	0,21
Ni					0,66	0,66	0,16	0,71
Cu						0,87	0,10	0,49
Zn							0,09	0,53
Pb								0,25
Co								1,00



En las tablas 14 y 15 son mostrados los coeficientes de correlación entre las distintas especies y parámetros determinados en el Río Tuy y sus principales afluentes. De acuerdo con las tablas, se observa que la mayoría de los cationes y aniones están correlacionados entre sí, por ejemplo el Na presentó fuerte correlación con todos los demás aniones y cationes a excepción de NO_3^- , lo cual sugiere una fuente común en estos elementos. La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales mostraron fuerte correlación entre ellos y entre los demás elementos a excepción de nitrato. Por lo tanto se puede señalar que estos cationes y aniones se correlacionan entre si porque tienen un origen común, atribuido probablemente a la meteorización de carbonatos (HCO_3^- , Mg, Ca, CE, SDT) silicatos y minerales evaporíticos (Na, K, Cl y SO_4^{2-}). El hecho de que el nitrato no se correlacione con ninguna especie ni parámetro, refleja que su presencia se debe principalmente a factores antrópicos.

En relación a los metales traza, de acuerdo con la tabla nº 4, el Ni tiene correlación con Cu, Zn y Co, por lo tanto puede decirse que tienen una fuente común esos metales. El Cu presentó fuerte correlación con el Zn, mientras que Al y Fe también tienen correlación lo cual significa que pudieran estar asociados y tener el mismo comportamiento geoquímico.

El Fe y Al tienen origen común, debido a que como se dijo en la discusión de metales traza, se comportan similar, incorporándose como complejos solubles con materia orgánica y a pH de 6 a 8 precipitan como hidróxidos.



CONCLUSIONES

- El Río Tuy presenta las mayores concentraciones de las especies Na, K, Ca, Mg, Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- en las zonas de Guayas, Ocumare y Lagartijo, atribuido a las descargas domésticas e industriales cercanas a la zona, así como la entrada de afluentes contaminados que presentaron mayores concentraciones de estas especies.
- En las zonas aguas arriba desde la Colonia Tovar hasta El Consejo, el Río Tuy presentó concentraciones de Na, K, Ca, Mg, Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- similares a los de afluentes no contaminados, debido principalmente a la poca influencia antrópica, por lo tanto en estas zonas el Río Tuy tiene bajo nivel de contaminación.
- Los afluentes correspondientes a Quebrada Cúa, Quebrada Charallave, Quebrada Guayas, Río Caucagua y Río Guaire presentaron las mayores concentraciones de las especies Na, K, Ca, Mg, Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- lo cual implica que estos ríos tienen alto grado de contaminación y deterioran las aguas del Río Tuy.
- El NO_3^- presentó sus máximos valores de concentración en Boca de Paparo, Hacienda Buen Paso Hacienda Santa Teresa y Tácata, atribuido a que en estas zonas hay desarrollo de actividades agropecuarias las cuales utilizan fertilizantes que tienen alto contenido de esta especie
- Las mayores concentraciones de P se encontraron Araguaita, Taguacita-Tuy, Guayas y Ocumare y en los afluentes Quebrada Cúa, Quebrada Charallave, Río Caucagua y Río Guaire, motivado principalmente al uso de fertilizantes fosforados provenientes de actividades agrícolas y a la entrada de aguas residuales domésticas.



- La distribución de SiO_2 a lo largo del Río Tuy no presentó variaciones significativas; el control de esta especie en este río es natural, y su presencia se atribuye a la meteorización de silicatos.
- Los metales trazas Cu y Zn presentaron las concentraciones más altas en Santa Teresa del Tuy, El Samán, Panaquire y el Río Guaire, atribuido a descargas de actividades domésticas y agropecuarias desarrolladas en esas zonas.
- Los metales Fe y Al presentaron sus máximos principalmente en zonas con alta contaminación orgánica, debido a que forman complejos solubles con la materia orgánica.
- El Co y el Ni presentaron una distribución similar, presentando los máximos en las quebradas Charallave y el Río Guaire y los mínimos en las zonas de las cabeceras del río.
- Los ríos Guaire y Caucagua presentaron los máximos valores de Pb, indicando contaminación proveniente de los efluentes domésticos de las grandes ciudades Caracas, Guarenas y Guatire
- La concentración de Mn presentó altos valores en zonas como Panaquire, Guayas y las quebradas Guayas y Cúa; debido probablemente al alto contenido de desechos orgánicos en dichas zonas, formándose complejos solubles de Mn con la materia orgánica.



RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis de las mismas especies determinadas en esta investigación pero en distintas épocas del año y comparar la variación.
- Tomar medida, por parte de los organismos competentes, para mejorar la calidad de las aguas del Río Tuy, especialmente en las zonas más contaminadas detectadas en esta investigación.



REFERENCIAS

- American Public Health Association, APHA (1995) *Standard Methods of Examination of Water and Wastewater*. Washington, 20th Edition.
- Andara, A. (1987). Estudio geoquímico de la contaminación de la subcuenca alta del río Turbio. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas.
- Andara, A. (1993). *Transporte de nutrientes por los ríos Mitare, Tocuyo, Yaracuy, Unare, Neverí y Manzanares*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería; Facultad de Ciencias, Postgrado en Geoquímica. Caracas.
- Angulo, N. (1980). *Estudio Geoquímico de la Cuenca del Río Tuy-I (Fe, Mn, Cr, Cl, Na y Hg)*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 109 p.
- Arrieché, I. (1980). *Influencia Geoquímica del Río Tuy sobre el Mar Caribe*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas
- Álvarez, M. (1985). *Hidroquímica de los ríos Manzanares y Mitare*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas
- Auge, M. (2004) *Regiones hidrogeológicas*. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. 104 p
- Bailarón L. (2002) *Gestión de Recursos Hídricos*. UPC Barcelona, 488 pp.
- Baird, C. (2001) *Química Ambiental*. Editorial Reverté. Barcelona, 622p
- Barreto, E. (2006). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas superficiales de la zona costera comprendida entre las bocas de los ríos Yaracuy y Tocuyo, estado Falcón, Venezuela*. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 120p.
- Blanco J (2007) *Concentración y Distribución de Metales Pesados en Sólidos Suspendidos del Río Guaire*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Departamento de Geoquímica. Caracas, 86 p.



- Callejón, A. (1985) *Estudio de la geoquímica de la contaminación de las cuencas de los ríos Tigre y Caris, estados Anzoátegui y Monagas*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería; Facultad de Ciencias, Postgrado en Geoquímica. Caracas.
- Carles, J. (2003) *Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada*. Biblioteca de la Universidad de Barcelona. Volumen 1. Primera edición. España.
- Cazaña, M. (1983). *Determinación de Sólidos Disueltos en muestras de agua de la cuenca del Río Tuy*. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Cespón, R. (2008). *Desarrollo de métodos analíticos automáticos para la determinación de metales en el medio ambiente laboral*. Tesis Doctoral, Facultad de Química, Universidad de Santiago de Compostela. España 589p.
- Cravotta, C (1988). *A mass-balance approach for interpreting the chemical composition of a conduit spring in Blair County, Pennsylvania*. In Proceedings of the Ground Water Geochemistry Conference: Dublin, Ohio, National Water Well Association, p. 103-126
- Colina, A. (1980). *Estudio Geoquímico de la Cuenca del Río Tuy-V (Mg, Co, Cd, H₂S, CN y SO₄²⁻)*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 80 p.
- Costa, J. (2005) *Diccionario de química física*. Editorial Díaz de Santos. España. 912 p.
- Cukrov, N., Cmik, P., Mlakar, M., and Omanovic, D. (2008). *Spatial distribution of trace metals in the Krka River, Croatia: An example of the self-purification*. Chemosphere 72, 1559–1566.
- Da Ros G (1995) *La contaminación de aguas en Ecuador: Una Aproximación Económica*. Editorial Abya Yala, Quito 251 p.
- Decreto 883, (1995), Gaceta Oficial Extraordinaria. 5.021.
- Dargam R. (1998) *Procesos de meteorización química en una cuenca semiárida de montaña, Río Salsipuedes, Córdoba*. Revista de la Asociación Geológica de Argentina, 53 (4), 517-525.
- Del Guidice, A. (1980). *Estudio Geoquímico de la Cuenca del Río Tuy-IV (Ni, K, Br, V y Ni)*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 79 p
- Dómenech, X. (2006) *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. Editorial Reverté. Barcelona, 237 pp.



- FAO (1992) *Prevención de la contaminación del Agua por la Agricultura y Actividades Afines*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Santiago, Chile, 386 pp.
- Faust, S. (1998) *Chemistry of water treatment*. Editorial Acid-free paper. Segunda edición. USA, 587 p.
- Fyfe, W. (1981) *Introducción a la geoquímica*. Editorial Reverté. Primera edición. España, 118 p.
- Gibbs, R. (1967) The Geochemistry of the Amazon River System, The factor that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geological Society of America Bulletin*, 78 (10), 1203-1232
- González de Juana, C., Iturralde de Arozena, J., y Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*. FONINVES, Caracas, 407 p.
- González, F. (1982) *Introducción a la geoquímica*. Secretaría General de los Estados Americanos. Washington, D.C. 139 p.
- Glasstone, S. (1972) *Tratado de Química Física*. Editorial Aguilar S.A. Segunda Edición. España, 1180 p.
- Hem, J. (1985) *Study and Interpretation of the chemical characteristics of Natural Water*. U. S. Geological Survey. Tercera Edición. USA, 210 p.
- Humphreys, H. (1975). *Estudio de la contaminación y tratamiento de los afluentes cloacales e industriales del río Tuy*. Instituto Nacional de Obras Sanitarias. Caracas.
- Huang, X., Sillanpää, M., Duo, B., and Gjessing, E. (2008). *Water quality in the Tibetan Plateau: Metal contents of four selected rivers*. *Environmental Pollution* 156, 270-277
- Jiménez, B. (2002) *La Contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, 926 p.
- Jonas, P., and Millward, G. (2010). *Metals and nutrients in the Severn Estuary and Bristol Channel: Contemporary inputs and distributions*. *Marine Pollution Bulletin*, 61, 52-67.
- Li, Siyue., and Zhang, Q. (2008). *Geochemistry of the upper Han River basin, China, 1: Spatial distribution of major ion compositions and their controlling factors*. *Applied Geochemistry* 23, 3535–3544.
- Lindsay, W. (1978). *Development of a DPTA soil test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper*. *Soil Science Society of America Journal*. Vol 42 Nº 3. USA



- Luna, I. (2010). *comportamiento del Hierro, Cromo, Cadmio y Plomo en las aguas superficiales del Río Manzanares, Venezuela, durante los períodos de sequía y lluvia en el año 1994*. Caribbean Journal of Science, Vol. 33, No. 1–2, 105–111.
- Meybeck, M. (1987) *Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved load*. American Journal of Science, 287. 401-428
- Manaham, S. (2000) Environmental Chemistry. Editorial Acid-free paper. Séptima Edición. USA, 876 p.
- Marín, M. (2002) Análisis químico de suelos y aguas. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. España, 174 p
- Marín, R. (2003) *Fisicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos: Tratamiento y Control de Calidad de Aguas*. Editorial Díaz de Santos S.A. Primera edición. Madrid, 336 p.
- Martínez, P. (2003) Fundamentos de hidrogeología. Ediciones Mundi-prensa. España 284 p.
- Mendiguchía, C., and García M. (2007). *Evaluation of natural and anthropogenic influences on the Guadalquivir River (Spain) by dissolved heavy metals and nutrients*. Chemosphere 69, 1509-1517.
- Mogollón, J. (1984) *Uso de los Parámetros Fisico-químicos de las aguas fluviales como indicadores de influencias naturales y antrópicas*. Interciencia 18 (5): 249- 254.
- Mogollón, J. (1995) *Influence of sampling strategy, lithology, vegetation and rainfall on metal background concentrations in sediment of the tropical Tuy River basin, Venezuela*. Chemical Geology 121, 263-272.
- Murgel, S. (1984) *Limnología sanitaria. Estudio de la polucion de aguas continentales*. Secretaria general de la OEA. Programa regional de desarrollo científico y tecnológico. Monografía nº 28. Washington. 79 p
- Murillo, N. (1987) *Tractores y Maquinaria Agrícola*. EUNED San José Costa Rica. 252 p.
- Murphy J. y Riley H. P. (1962) *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters*. Anal. Chim. Acta 27: 31-36.
- Okonkwo, J., and Mothiba, M. (2005). *Physico-chemical characteristics and pollution levels of heavy metals in the rivers in Thohoyandou, South Africa*. Journal of Hydrology 308,122-127.
- Owen, S. (2000) *Conservación de recursos naturales*. Editorial Pax. Segunda Edición. México, 622 . 308,122-127.



- Picard, X. (1968) *Geología de la Cuenca de Santa Lucía, Ocumare del Tuy*. Boletín de Geología N° 19. Caracas, 296 p.
- Pineda, M. (1982) *Determinación de Na, K, Ca, Mg, HCO₃⁻, Cl, SO₄²⁻ en muestras de agua de la Cuenca del Río Tuy*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 84 p.
- Polevoy, S. (1996) *Water Science and Engineering. Editor Blackie Academic and Professional*. Londres. 257 pp.
- Raíces, M. (1982). *Determinación de Al, DQO, N- (NO₃⁻, NH₄⁺) y P-(PO₄³⁻) en muestras de agua de la Cuenca del Río Tuy*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 123 p.
- Ramírez, A. (1984). *Hidrogeoquímica de la Cuenca del Río Tuy*. Trabajo de Ascenso. Instituto de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, 81 p.
- Raudel, R. (2002) *El Agua en el Medio Ambiente: muestreo y análisis*. Editorial Plaza y Valdés S.A. Primera Edición. México, 51 p.
- Reyes, M. (1999) *Estudio hidrogeoquímico de las aguas de los ríos del Estado Táchira-Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas,
- Rivera, A. (1982). *Determinación de Cu, Co, Cr, Mn, Ni, Fe, Pb y Zn en muestras de agua de la Cuenca del Río Tuy*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 111 p.
- Rodríguez, R. (1980). *Estudio Geoquímico de la Cuenca del Río Tuy-III (Co, Pb, Ag, F, I y HCO₃⁻)*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 99 p.
- Rodríguez, J. (2009) *Fisicoquímica de aguas*. Ediciones Díaz de Santos. Madrid-España, 466 p.
- Rojas (1983) *Aspectos de la Contaminación de Aguas en Venezuela*. Caracas, Venezuela. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables , 12 p.
- Roldán, G. (2003) *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Editorial Universidad de Antioquia. Primera edición. Colombia, 142 p.
- Sabater, S. (2009) *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA. Editorial Ribes. España, 447 p.



- Sánchez, O. (2007) *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Escuela de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México, 293 p.
- Seoánez M (2000) *Manual de Contaminación Marina y Restauración del Litoral*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 565 pp.
- Silva, J. (1998) *Aspectos Geográficos e Históricos de las Tierras Mirandinas*. Revista electrónica Tucuy. Venezuela.
- Sigel, H. (1988) *Metal ions in biological system: nickel and its role in biology*; vol. 23 New York.
- Skoog, D., and West, D. (2001). *Química Analítica*. Editorial Mc Graw Hill. Séptima Edición. México, 795 p.
- Yánes, C. (1980). *Estudio Geoquímico de la Cuenca del Río Tuy-II (Al, Si, Cu, Zn, P y Mo)*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 105 p.
- Zambrano, S. (1970) *Estudio Fisiográfico Regional de la Cuenca del Río Tuy*. Boletín de Geología. N° 21. Caracas, 206 p.



APÉNDICE



APÉNDICE 1: Curvas de calibración utilizadas para la determinación de la concentración de las distintas especies químicas.

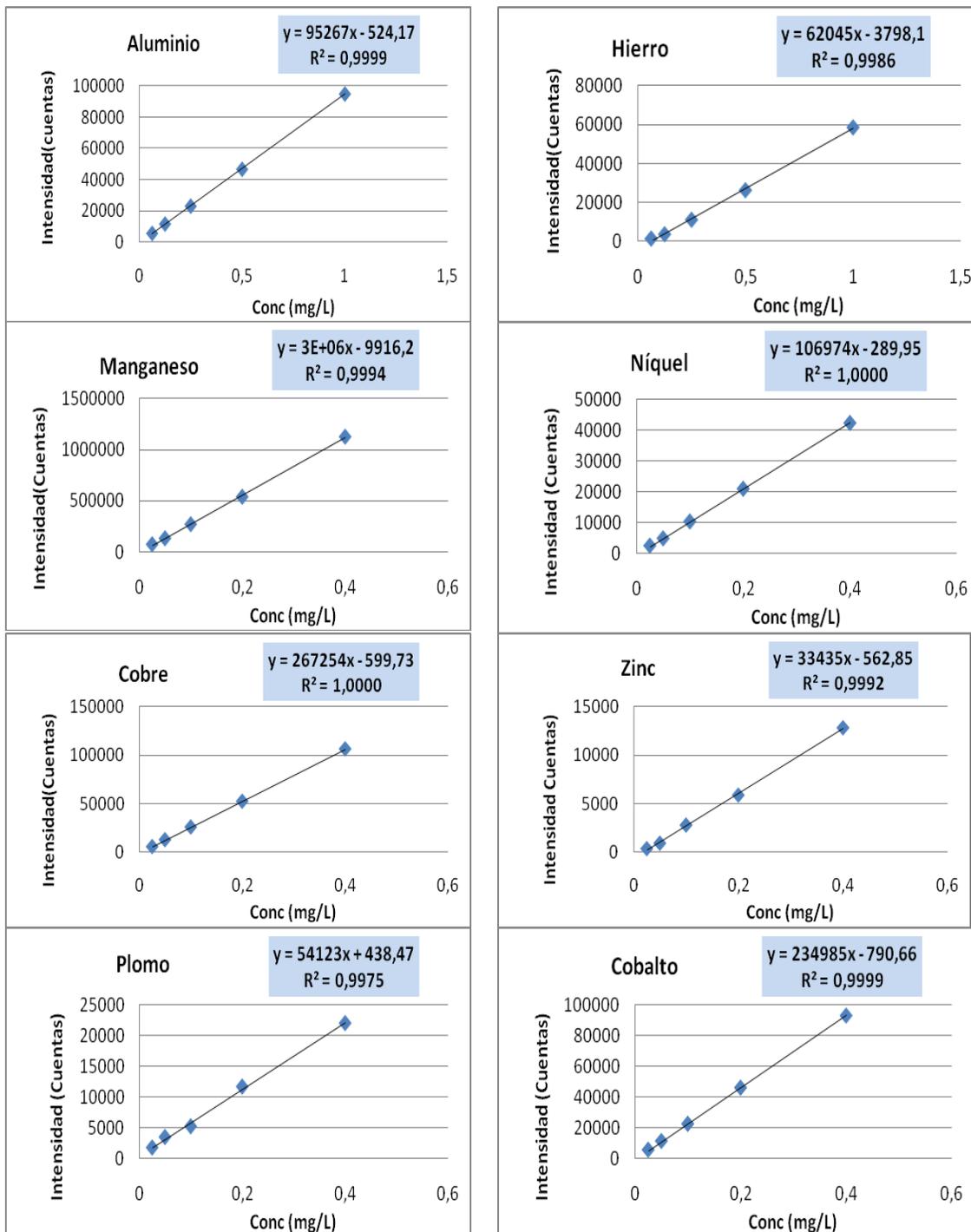


Figura 30: Curvas de calibración de los elementos Al, Fe, Mn, Ni, Cu, Pb, Zn y Co

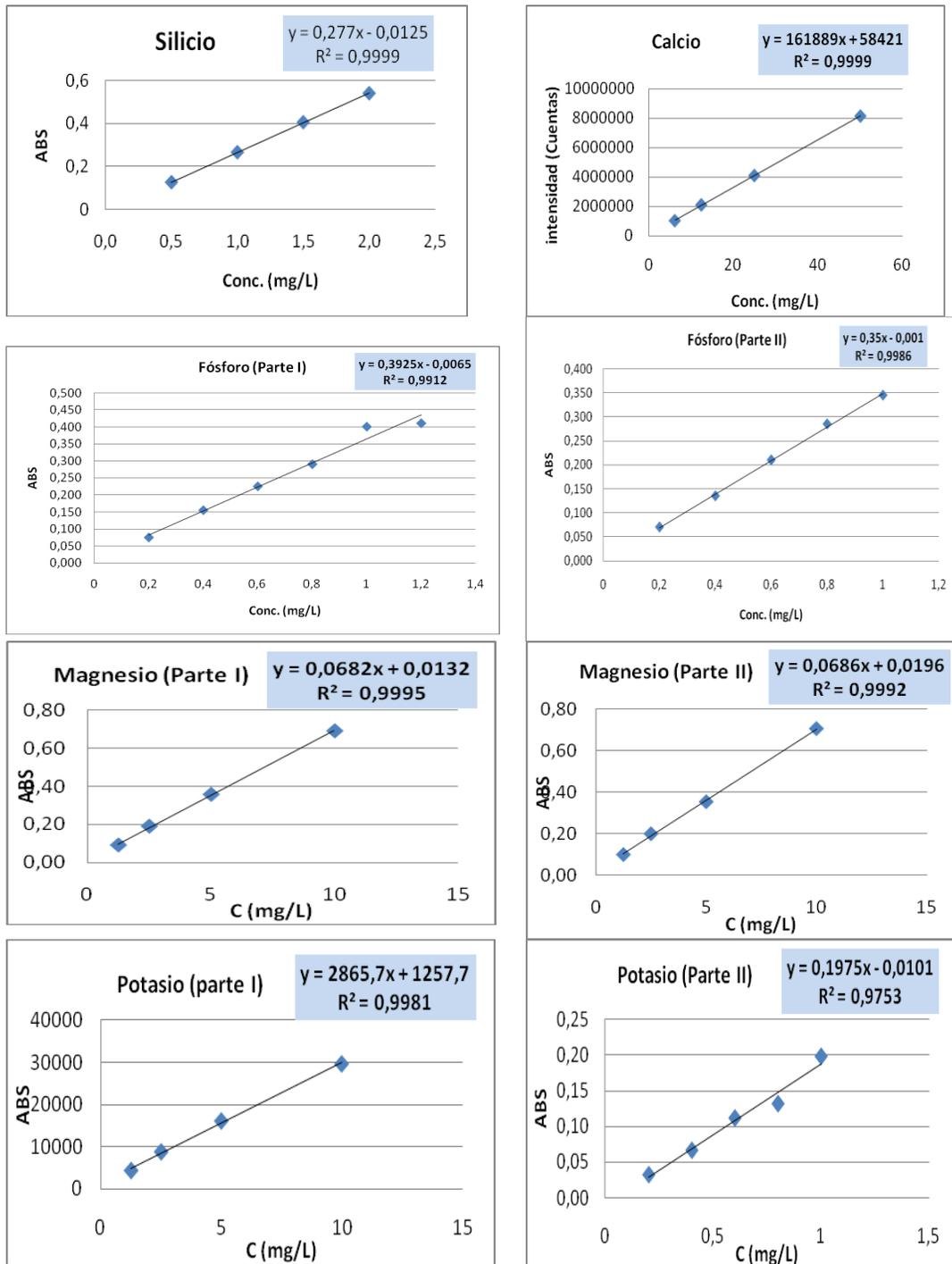


Figura 31: Curvas de calibración de los elementos Si, Ca, P, K y Mg

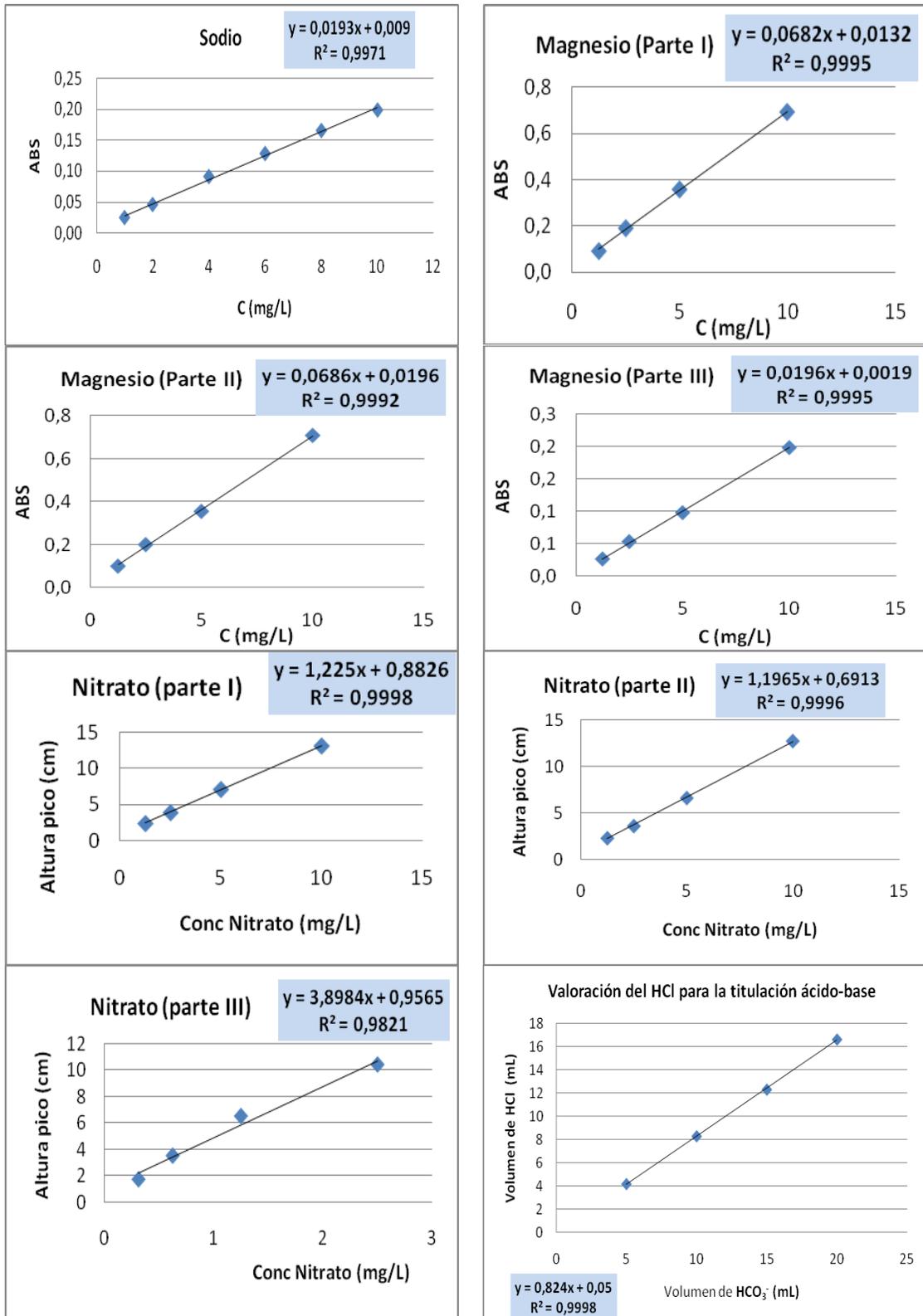


Figura 32: Curvas de calibración de sodio, magnesio y nitrato. Y curva de valoración del HCl empleado para las mediciones de alcalinidad

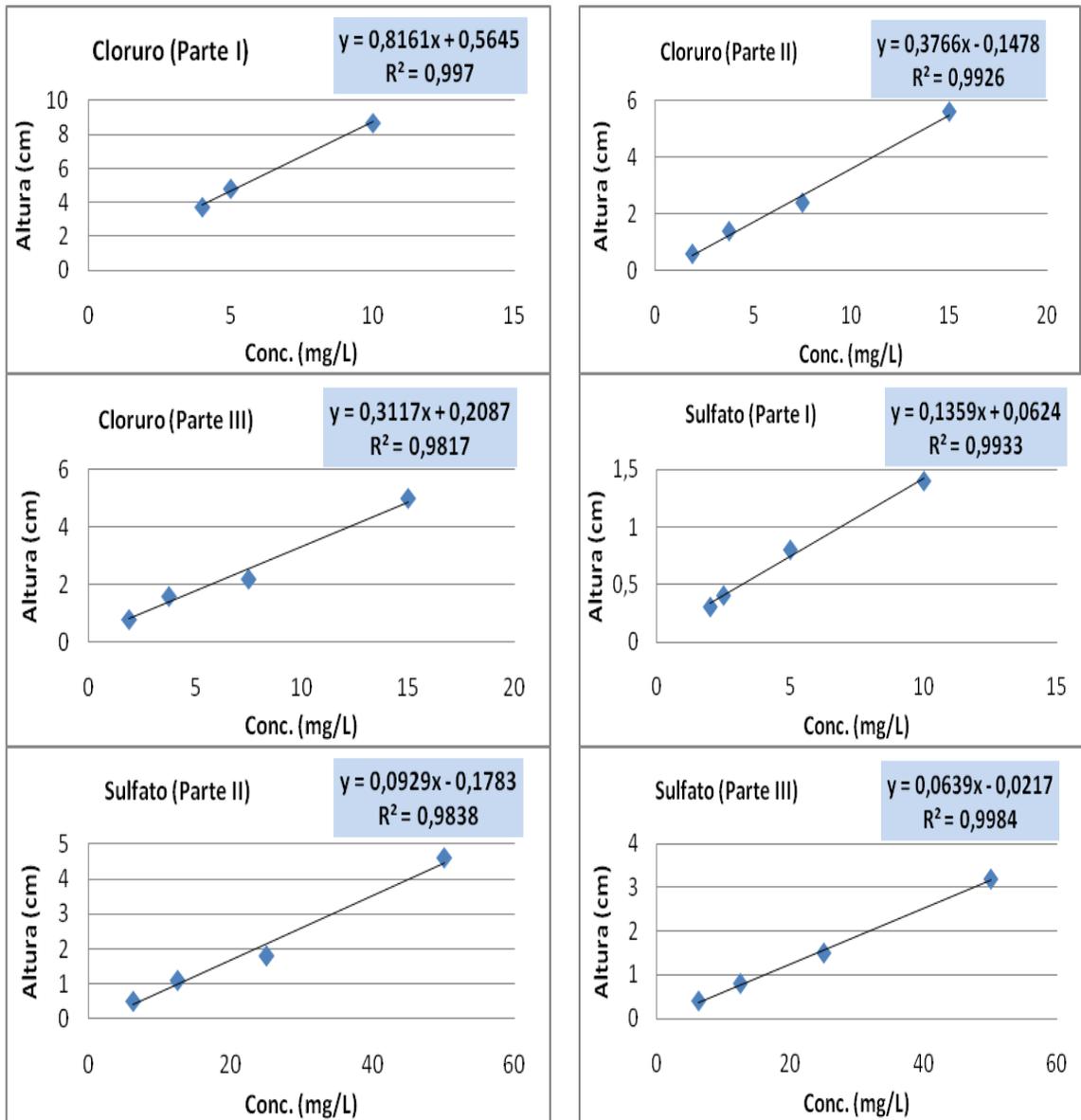


Figura 33: Curvas de calibración de los aniones cloruro y sulfato.



APÉNDICE 2: Cálculos de porcentaje de error y conductividades teóricas

A continuación serán presentados los cálculos llevados a cabo para estimar la conductividad teórica y el porcentaje de error. Necesarios en la validación de los datos obtenidos.

Conductividad teórica:

Viene expresada por la siguiente ecuación:

$$CT = \sum U_i + C_i$$

Donde U_i es la conductividad iónica equivalente a 25°C expresada en ($\mu\text{S}\cdot\text{L}/\text{cm}\cdot\text{mg}$) (Tabla 16). C_i es la concentración de cada especie iónica disuelta expresada en mg/L.

Como ejemplo será determinada la conductividad teórica de la muestra correspondiente al Río Cuira

$$CT = \sum ([K^+] \cdot 1,89 + [Na^+] \cdot 2,17 + [K^+] \cdot 1,89 + [Mg^{2+}] \cdot 4,34 + [Ca^{2+}] \cdot 3,00 + [Cl^-] \cdot 2,14 + [SO_4^{2-}] \cdot 1,67 + [HCO_3^-] \cdot 0,74 + [NO_3^-] \cdot 1,15) \text{mg/L} \cdot \mu\text{S} \cdot \text{L}/\text{cm} \cdot \text{mg}$$

$$CT = \sum (16,85) + (1,79) + (39,20) + (45,47) + (17,89) + (21,17) + (73,27) + (1,16) \mu\text{S} / \text{cm}$$

$$CT = 216,80 \mu\text{S} / \text{cm}$$

El valor obtenido en campo para esta muestra fue de 212,0 $\mu\text{S} / \text{cm}$, el cual es inferior al valor teórico.



El balance de carga iónico, o porcentaje de error, fue determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$\%Error = (\Sigma^+ - \Sigma^-) / (\Sigma^+ + \Sigma^-) * 100\%$$

$$\text{Donde } \Sigma^+ = [Na^+] + [K^+] + [Mg^{2+}] + [Ca^{2+}]$$

$$\Sigma^- = [Cl^-] + [SO_4^{2-}] + [HCO_3^-]$$

Para el caso de la misma muestra, Río Cuira:

$$\%Error = (1,86 - 2,14) \text{ meq/L} / (1,86 + 2,14) \text{ meq/L} * 100\% = 6,9 \%$$

En la tabla 17 son mostrados los valores de porcentaje de error en todas las muestras recolectadas en el Río Tuy y sus afluentes principales.

Tabla 16: Conductividades iónicas equivalentes de los iones en solución acuosa a 25°C (Cravotta, 1988)

Especie iónica	Conductividad a 25 °C ($\mu S^*L/cm^*mg$)
Ca ²⁺	3,00
Mg ²⁺	4,34
Na ⁺	2,17
K ⁺	1,89
Cl ⁻	2,14
HCO ₃ ⁻	0,74
SO ₄ ²⁻	1,67
NO ₃ ⁻	1,15


Tabla 17: Porcentaje de error en las muestras recolectadas

Punto	Σ cationes (meq/L)	Σ aniones (meq/L)	Error	% Error
Colonia Tovar	1,56	1,20	0,13	13,3
H. Buen Paso	3,45	3,50	-0,01	-0,8
H. Torre Casa	3,72	3,79	-0,01	-0,9
H. Santa Teresa	3,94	4,07	-0,02	-1,6
El Consejo	3,49	3,57	-0,01	-1,2
Qda. Guayas	8,33	9,26	-0,05	-5,3
Guayas	7,00	7,35	-0,02	-2,4
Boca de Cagua	6,30	8,49	-0,15	-14,8
Tuy antes Guare	4,53	4,48	0,00	0,5
Río Guare	3,60	3,85	-0,03	-3,4
Tácata	4,25	4,64	-0,04	-4,4
Cúa	4,30	4,39	-0,01	-1,0
Qda. Cúa	17,00	18,78	-0,05	-5,0
Río Tarma	3,51	4,17	-0,09	-8,6
Río Ocumarito	5,27	5,56	-0,03	-2,7
Qda. Charallave	12,77	12,99	-0,01	-0,9
Ocumare	6,93	7,09	-0,01	-1,2
Río Marare	2,84	3,07	-0,04	-4,0
Río Súcuta	2,95	3,16	-0,03	-3,3
Lagartijo	6,23	6,35	-0,01	-0,9
Santa Teresa del T.	6,21	6,30	-0,01	-0,7
Río Guaire	4,28	6,58	-0,21	-21,2
Río Taguacita	1,54	1,58	-0,01	-1,4
Taguacita-Tuy	6,57	5,24	0,11	11,2
Araguaita	5,79	5,43	0,03	3,2
Río Taguaza	1,21	1,12	0,04	3,7
Río Caucagua	5,91	6,92	-0,08	-7,9
Río Cuira	1,86	2,14	-0,07	-6,9
Panaquire	4,02	4,26	-0,03	-2,9
Panaquirito	1,16	1,27	-0,04	-4,4
Qda. Yaguapo	1,29	1,32	-0,01	-1,2
Qda. Urba	1,70	1,87	-0,05	-4,9
Río Sapo	1,11	1,30	-0,08	-7,9
El Samán	4,25	4,55	-0,03	-3,4
San Juan-Galpones	3,86	3,97	-0,01	-1,4
Boca de Paparo	4,27	4,48	-0,02	-2,4

APÉNDICE 3: Fotografías de los equipos empleados para los análisis de las distintas especies.



Figura 34: fotografía del montaje de filtración de muestras, equipo de absorción atómica, y cromatógrafo iónico empleado en los análisis.



Figura 35: Foto del espectrofotómetro Spectronic 20 y del espectrofotómetro de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado ICP-AES empleados en los análisis de las muestras


APÉNDICE 4
Tabla 18. Valores de SDT y conductividad teórica en las muestras del Río Tuy

Punto	Cond. Teórica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SDT (meq/L)
Colonia Tovar	156,8	2,76
H. Buen Paso	397,2	6,95
H. Torre Casa	432,0	7,52
H. Santa Teresa	459,4	8,01
El Consejo	404,8	7,06
Qda. Guayas	1052,8	17,59
Guayas	840,0	14,35
Boca de Cagua	837,2	14,79
Tuy antes Guare	526,5	9,01
Río Guare	392,6	7,45
Tácata	516,9	8,89
Cúa	499,7	8,70
Qda. Cúa	2169,5	35,78
Río Tarma	412,8	7,68
Río Ocumarito	595,3	10,83
Qda. Charallave	1513,7	25,76
Ocumare	802,7	14,02
Río Marare	322,5	5,91
Río Súcuta	323,3	6,11
Lagartijo	719,5	12,59
Santa Teresa del T.	721,5	12,51
Río Guaire	606,8	10,85
Río Taguacita	165,9	3,12
Taguacita-Tuy	681,4	11,82
Araguita	634,0	11,22
Río Taguaza	120,5	2,33
Río Caucagua	744,2	12,83
Río Cuirá	216,8	4,00
Panaquire	474,0	8,27
Qda Panaquirito	128,8	2,43
Qda Yaguapo	135,4	2,62
Qda. Urba	196,9	3,58
Río Sapo	131,5	2,41
El Samán	503,4	8,80
San Juan-Galpones	454,1	7,83
Boca de Paparo	501,4	8,74