

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
SERVICIO GEOLÓGICO
Subdirección de Geología Básica

**GEOQUIMICA DE METALES PESADOS EN SUELOS DE LA
CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ**

Informe No.

Por
Orlando Vargas
Gloria Prieto
Luz Myriam González
Adriana Matamoros

Bogotá, julio de 2004

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA- INGEOMINAS

**REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA**

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

SERVICIO GEOLÓGICO

Subdirección de Geología Básica

**GEOQUIMICA DE METALES PESADOS EN LOS SUELOS DE LA CUENCA DEL
RIO BOGOTÁ**

Por

Orlando Vargas
Gloria Prieto
Luz Myriam González
Adriana Matamoros

Bogotá, julio de 2004

CONTENIDO

RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	13
2.1 LOCALIZACIÓN.....	13
2.2 ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL.....	13
2.3 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS	16
2.4 CUENCA DEL RIO BOGOTA	17
2.4.1 Calidad del agua del río Bogotá.....	17
2.4.2 Principales contaminantes del río Bogotá.....	21
2.4.3 Efectos producidos por la contaminación sobre los ecosistemas y la salud humana.....	21
2.4.4 Usos del agua del río Bogotá.....	24
2.5 GEOLOGÍA	26
2.5.1 Cretácico.....	26
2.5.2 Paleógeno y Neógeno.....	29
2.5.3 Depósitos cuaternarios.....	30
2.5.4 Depósitos piroclásticos y cenizas.....	30
2.6 SUELOS	31
2.6.1 Suelos del paisaje de montaña.....	31
2.6.2 Suelos del paisaje de planicie.....	36
2.6.3 Suelos de paisaje de valle.....	37
2.7 CLIMA Y VEGETACIÓN.....	37
3. METODOLOGIA	40
3.1 METODOLOGIA DE MUESTREO.....	40
3.1.1 Principios y definiciones	40
3.1.2 Diseño de muestreo.....	40
3.1.3 Tipo de muestras.....	41
3.1.4 Identificación de las muestras	41
3.1.5 Precauciones generales durante el muestreo.....	41
3.1.6 Recolección de muestras y mediciones de campo.....	42
3.1.7 Control de muestreo.....	42
3.1.8 Documentación fotográfica	42
3.1.9 Preservación y envío de las muestras.....	42
3.2 METODOLOGIA ANALITICA	43
3.2.1 Preparación de las muestras.....	43
3.2.2 Análisis químico.....	43
3.2.3 Control de calidad analítica	44
3.3 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE DATOS	44
3.3.1 Tratamiento estadístico	45
3.3.2 Elaboración de mapas.....	46
4. RESULTADOS.....	48
4.1 INFORMACIÓN DE CAMPO	48
4.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS QUIMICOS EN LABORATORIO	48
4.3 ANALISIS ESTADISTICO E INTERPRETACIÓN	48
4.4 MAPAS DE CONCENTRACIÓN PUNTUAL Y DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	60
4.5 CONTROL DE CALIDAD ANALÍTICO	61
4.5.1 Estimación de precisión	61
4.5.2 Estimación de exactitud.....	62
5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	64

5.1 NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS EN SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ	64
5.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y RELACIONES ENTRE ELEMENTOS	65
5.3. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS Y PROPIEDADES MEDIDAS EN CAMPO	67
5.3.1 Potencial de hidrógeno (pH)	67
5.3.2 Textura	71
5.3.3 Color	73
5.4. INFLUENCIA DEL CLIMA EN EL COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO DE LOS ELEMENTOS	76
5.5 TIPO DE SUELO Y COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO DE LOS ELEMENTOS	77
5.6 ELEMENTOS CUYA CONCENTRACIÓN SOBREPASA LOS VALORES DE REFERENCIA PARA SUELOS	78
5.6.1 Acumulación de metales por municipio, relación con el material parental y con actividades antrópicas	78
5.6.2 Distribución y acumulación de cada elemento en la cuenca del río Bogotá	85
5.7 ELEMENTOS TRAZA EN AGUAS Y SU RELACION CON SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ	97
6. CONCLUSIONES.....	109
7. REFERENCIAS	113

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO BOGOTÁ, PROMEDIOS DE 1969 A 1971.....	18
TABLA 2. CONTAMINANTES QUÍMICOS EN AGUAS Y SEDIMENTOS DE AFLUENTES DEL RÍO BOGOTÁ	18
TABLA 3. CARGA DE METALES PESADOS AL RÍO BOGOTÁ (CAR, 1986)	19
TABLA 4. CONTENIDO DE METALES EN AGUAS DE AFLUENTES DEL RÍO BOGOTÁ.....	20
TABLA 5. FUENTES Y EFECTOS POR EXPOSICIÓN A ALTAS CONCENTRACIONES DE METALES TÓXICOS EN SERES VIVOS.....	23
TABLA 6. ELEMENTOS ANALIZADOS EN LABORATORIOS DE INGEOMINAS Y LÍMITES DE DETECCIÓN, ELEMENTOS ANALIZADOS POR ICP-AES	44
TABLA 7. ELEMENTOS ANALIZADOS EN <i>ACTIVATION LABORATORIES</i> Y LÍMITES DE DETECCIÓN	44
TABLA 8. RESUMEN DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LOS ELEMENTOS ANALIZADOS	50
TABLA 9. CORRELACIONES BIVARIADAS ENTRE LOS ELEMENTOS	54
TABLA 10. EXTRACCIÓN DE COMUNALIDADES POR COMPONENTES PRINCIPALES.....	56
TABLA 11. VARIANZA TOTAL EXPLICADA	56
TABLA 12. MATRIZ DE COMPONENTES ROTADOS	57
TABLA 13. MATRIZ DE DISTANCIAS	58
TABLA 14. HISTORIAL DE CONGLOMERACIÓN	58
TABLA 15. CONCENTRACIÓN DE METALES TRAZA EN SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ	64
TABLA 16. CONCENTRACIÓN MEDIA Y RANGOS DE METALES TRAZA EN SUELOS	65
TABLA 17. VALORES DE REFERENCIA DE CALIDAD DE SUELOS.....	78
TABLA 18. ELEMENTOS QUE EXCEDEN LOS VALORES DE REFERENCIA.....	81
TABLA 19 CONTENIDO DE METALES EN DRENAJES DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ (PLANCHAS 5-09 Y 209).....	98

TABLA 20. CONCENTRACIÓN DE METALES EN AGUAS SUPERFICIALES DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ (JICA-EAAB, 2002).....	100
TABLA 21. CONCENTRACIÓN DE METALES EN AGUAS TOMADAS POR LA EAAB EN LA FASE II DE SU PROGRAMA DE AFORO Y MUESTREO.....	101
TABLA 22. CONTENIDO DE METALES EN AGUAS DEL NIVEL FREÁTICO, CANALES Y RESERVORIOS EN ALGUNOS SITIOS DE LA SABANA DE BOGOTÁ	102
TABLA 23. COMPARACIÓN DE CONTENIDOS DE METALES EN AGUAS Y SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ	105

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Zona de estudio.....	14
Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del río Bogotá.....	28
Figura 3. Mapa de suelos de la cuenca del río Bogota.....	34
Figura 4. Diseño de Muestreo.....	41
Figura 5. Mapa de ubicación de sitios de muestreo.....	49
Figura 6. Histogramas y diagramas de caja de los elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn.....	52
Figura 7. Gráficos de dispersión a lo largo de las coordenadas este y norte.....	52
Figura 8. Gráfico de sedimentación.....	57
Figura 9. Diagrama de témpanos vertical.....	60
Figura 10. Dendograma.....	60
Figura 11. Acidez y alcalinidad de suelos de la Cuenca del río Bogotá.....	70
Figura 12. Textura de suelos de la Cuenca del río Bogotá.....	72
Figura 13. Color de los suelos de la Cuenca del río Bogotá.....	74
Figura 14. Suelos con influencia de ceniza volcánica en la cuenca del río Bogotá.....	75
Figura 15. Sitios con contenidos de arsénico en suelos mayores que el valor de referencia.....	88
Figura 16. Sitios con contenidos de cromo en suelos mayores que el valor de referencia.....	89
Figura 17. Sitios con contenidos de molibdeno en suelos mayores que el valor de referencia.....	90
Figura 18. Sitios con contenidos de níquel en suelos mayores que el valor de referencia.....	91
Figura 19. Sitios con contenidos de cinc en suelos mayores que el valor de referencia.....	92
Figura 20. Sitios con contenidos de cobre en suelos mayores que el valor de referencia.....	93
Figura 21. Sitios con contenidos de cadmio en suelos mayores que el valor de referencia.....	95
Figura 22. Sitios con contenidos de plomo en suelos mayores que el valor de referencia.....	96

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1	Información de campo colectada en el muestreo de suelos de la cuenca del río Bogotá.....Bolsillo 1
Anexo 2	Resultados de análisis químicos de suelos.....118
Anexo 3	Mapas de concentración puntual y de distribución espacial para los elementos químicos As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Pb y Zn.....Bolsillo 2
Anexo 4	Control de calidad analítica.....124

RESUMEN

Con el objetivo de estudiar procesos geoquímicos locales en la Región Central de Colombia, el proyecto Compilación, Levantamiento y Generación de Información Geoquímica de INGEOMINAS, adelantó durante el año 2003 un muestreo geoquímico sistemático de suelos en la Cuenca del río Bogotá, desde su nacimiento en el páramo de Guacheneque, hasta su desembocadura en el río Magdalena, cubriendo un área de 6.000 km² aproximadamente.

El muestreo se realizó con base en una red bidimensional (celdas de 5 x 5 km), tomando una muestra cada 25 km² y un duplicado de celda cada 100 km². Se colectaron (266) muestras de suelos superficiales (A₀₋₂₅) y de horizonte C (profundo hasta máximo 2m), siguiendo orientaciones del Programa Internacional de Correlación Geológica (IGCP) proyecto 259/360 y estándares de INGEOMINAS. En los laboratorios de INGEOMINAS se determinaron contenidos pseudo-totales de Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu y Ni, (agua regia y multiácido, ICP-AES); y en *Activation Laboratories* de Canadá se determinaron 48 elementos (multiácido, ICP-AES; INAA). La calidad analítica se controló mediante uso de patrones primarios y secundarios (exactitud) y por análisis de duplicados (precisión).

Este informe se centra en el análisis de los resultados obtenidos para los elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn en las muestras correspondientes al horizonte superficial (A₀₋₂₅) del suelo. Para el análisis se incorporaron datos de proyectos adelantados por INGEONIMAS en años anteriores; y datos sobre contenidos de metales en aguas de la zona. Los datos se sometieron a procesamiento estadístico y geoestadístico, con base en los resultados se elaboraron mapas de concentración puntual y mapas de distribución espacial de los elementos.

El análisis efectuado permitió delimitar dos zonas con diferentes patrones de distribución geoquímica: La **zona 1** que comprende la cuenca alta del río Bogotá incluyendo la Sabana de Bogotá hasta el embalse del Muña en Sibate, los suelos poseen pH con tendencia ácida (pH 4 a 6.5), y concentraciones relativamente bajas para la mayoría de los elementos y la **zona 2**, que comprende la cuenca baja del río hasta su desembocadura, el pH de los suelos es más básico (pH 6.6 a 9), la textura es predominantemente franco arcillosa y se presentan contenidos altos de elementos trazas.

El muestreo sistemático adelantado en suelos de la cuenca del río Bogotá, permitió determinar contenidos y acumulación de elementos potencialmente tóxicos, evaluar posible origen (antropogénico o geogénico) y analizar localmente parámetros y factores condicionantes de la movilidad y bio-disponibilidad de estos elementos.

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de información geoquímica multipropósito hace parte de los objetivos del proyecto Compilación, Levantamiento y Generación de Información Geoquímica, de esta manera se apoyan no solo los estudios geológicos y de evaluación de recursos minerales, sino también las evaluaciones ambientales. Además el proyecto estudia los procesos geoquímicos que pueden llevar a la dispersión o acumulación de elementos químicos en el ambiente.

El estudio geoquímico de suelos, adicional al de aguas y sedimentos, permite tener una perspectiva más completa del paisaje geoquímico del país, apoyándose en la comprensión de los procesos que controlan la distribución, la migración, y la biodisponibilidad de los elementos.

La información geoquímica permite: a) conocer el contenido y tipo de elementos potencialmente tóxicos acumulados en los suelos, b) establecer posibles orígenes de estos elementos, por aportes de actividades antrópicas o del material parental, c) analizar localmente la posible movilidad y biodisponibilidad de estos elementos hacia las cadenas tróficas, d) analizar los parámetros limitantes de la movilidad de los elementos en puntos específicos.

En este informe se presentan los resultados del estudio adelantado sobre la geoquímica de elementos potencialmente tóxicos en suelos de la cuenca del río Bogotá, donde se establece su abundancia y distribución en los suelos. También se suministran elementos para interpretar los factores que intervienen en su movilidad, transporte, acumulación e identificación de fuentes (naturales o antrópicas) e implicaciones de su presencia, para la salud de los ecosistemas.

Con estos objetivos, se efectuó un muestreo de suelos en la cuenca del río Bogotá desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Magdalena y se cuantificaron las concentraciones de Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu y Ni.

Como antecedentes se cuenta con varios estudios realizados en INGEOMINAS:

En 1995, Vargas y Mejía estudiaron el efecto del Hg y Pb, sobre los suelos y hortalizas, en seis diferentes zonas hortícolas de la Sabana de Bogotá, regados continuamente con aguas del río Bogotá y sus afluentes. Los suelos de las zonas muestreadas presentaron concentraciones promedio de Hg y Pb (0,5 y 110 ppm respectivamente) que superan los niveles considerados normales para éste tipo de suelos. En éste mismo estudio se encontró que los niveles de absorción de Pb por parte de las hortalizas superaron, ampliamente, los niveles considerados permisibles por la *World Health Organization* (WHO, 1976).

González y Vargas (1997), realizaron un estudio de contaminación a lo largo de la cuenca alta del río Bogotá desde Tocancipá hasta Bojacá, y detectaron alto grado de contaminación en los suelos al sur de Bogotá específicamente en la zona industrial y urbana, y en el sector entre Bojacá y Madrid; hecho que fue atribuido al riego con aguas que han recibido desechos industriales, y por el uso intensivo de agroquímicos. A pesar de que se identificaron sitios donde la contaminación obedece a causas puntuales, como el riego con aguas del río Bogotá, regionalmente no se descartó la posible influencia de procesos de origen litológico o pedológico.

Además se encontró que el bajo pH de los suelos unido a factores como la fluctuación de la tabla de agua y alta escorrentía, aumenta el riesgo de movilidad de los metales.

En aquellos sitios de la cuenca alta en que se detectó contaminación puntual, se ejecutaron posteriormente estudios específicos de contenidos pseudo-totales, movilidad y disponibilidad de metales traza en suelos (González y Vargas, 1997; Matamoros, 1998), los cuáles encontraron altos niveles de Pb, Ni, Cu, Cr, Co y V, considerados elementos potencialmente tóxicos. Se concluyó que la alta movilidad y biodisponibilidad de estos elementos, así como la posibilidad de migración hacia las aguas subterráneas, incrementan el riesgo para la salud pública.

Para examinar la importancia de la materia orgánica como factor determinante en la movilidad de estos elementos, se realizó en 1999 un estudio de evaluación de la capacidad de protección ambiental de la materia orgánica en suelos de la cuenca media y su relación con el contenido de metales traza (Reyes, Ballesteros y González, 1999).

En 1999, Gaviria llevó a cabo un estudio de los procesos de alteración geoquímica de formaciones superficiales en la cuenca del río Bogotá donde se indicó, que esta cuenca tiene una gran diversidad de geoecosistemas, los cuales han evolucionado bajo la acción de variados procesos geoquímicos dependientes principalmente de las condiciones climáticas y de los materiales parentales.

En la cartografía geoquímica de la plancha 5-09, que cubre el área de la cuenca del río Bogotá, como parte del Atlas Geoquímico de Colombia, se realizó un levantamiento geoquímico de baja densidad de muestreo, usando metodologías multimedio (aguas, sedimentos, suelos) y multielemento (48 elementos) con fines multipropósito (Vargas et. al., 2001). Este levantamiento permitió delimitar patrones geoquímicos de distribución que se correlacionan con las diferentes unidades geológicas, tanto en suelos como en sedimentos. De la misma manera se delimitaron zonas de concentraciones anómalas de elementos significativos para exploración de recursos minerales y para monitoreo ambiental.

En general, los resultados de estos estudios llamaron la atención sobre el deterioro de la calidad ambiental de los suelos de la cuenca alta del río Bogotá y su posible incidencia en la salud humana y animal.

Por lo anterior en este trabajo se amplió la zona de estudio para cubrir toda la cuenca, con especial interés en la cuenca baja, zona en la que el río Bogotá ha recibido toda la carga contaminante de las aguas residuales de tipo doméstico e industrial de la ciudad capital.

La información generada contribuye a la definición de líneas base geoquímicas, y sirve de apoyo a la planeación de uso del suelo y como soporte en la toma de decisiones sobre el manejo integral de ésta importante cuenca.

2. CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN

La zona de estudio comprende la cuenca del río Bogotá (Figura 1) desde su nacimiento en el páramo de Guacheneque, Municipio de Villapinzón, hasta su desembocadura en el río Magdalena en la ciudad de Girardot. El área total de la cuenca es de aproximadamente 6.000 km², cubriendo parcialmente las planchas a escala 1:100.000: 209 Zipaquirá, 227 La Mesa, 228 Bogotá, 245 Girardot y 246 Fusagasuga, en el departamento de Cundinamarca.

2.2 ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL

La cuenca actual del río Bogotá es el resultado de la evolución geológica desde el Cretácico, cuando el área se encontraba en el fondo del mar y estaba constituida principalmente por sedimentos marinos, arcillas y arenas, pasando por diversos fenómenos geológicos y geomorfológicos que moldearon y dieron origen a la región actual que alberga intensa y variada actividad antrópica (Van der Hammen, 1998).

Con la separación de los continentes ésta zona se convirtió en una planicie costera baja y plana, que en el Neógeno y Paleógeno perdió la influencia marina para dar paso a la formación de ríos. Como resultado de los movimientos de compresión, que hicieron plegar los sedimentos, se dio lugar a la formación de cerros bajos, que posteriormente formaron cadenas en el área actual de la Cordillera Oriental. La existencia de grandes extensiones de tierra baja y plana remanente, permitió el paso de los ríos desde la zona que actualmente ocupa el Valle del río Magdalena hacia la zona de lo que hoy se denominan los Llanos Orientales.

Terminado el levantamiento de la Cordillera Oriental, la región actual de la parte plana de la Sabana de Bogotá, comenzó a hundirse lentamente y formó una cuenca cerrada, donde desembocaron el actual río Bogotá y sus afluentes, con desborde de las aguas por la región del Tequendama, formándose una gran laguna en la Sabana, en la cual se depositaron sedimentos lacustres (principalmente arcilla, y algunas capas de arena y turba) hasta alcanzar acumulaciones entre 200 m de espesor, debajo de la Ciudad Universitaria, hasta 600 m en el centro de la Sabana cerca de Funza.

Posteriormente, durante la última glaciación, la erosión causada por el río en el sitio de desborde de la laguna era muy fuerte, lo cual ocasionó que este sitio se bajara tanto que cuando el clima se volvió menos lluvioso, hace unos 30.000 años, el nivel de la laguna bajó, salió la mayor parte del agua y desapareció la laguna grande.

Los ríos empezaron a pasar por el antiguo fondo sedimentario de la laguna y cortaron su curso en estos sedimentos, formándose los actuales valles de inundación del río Bogotá y sus afluentes. En las partes más baja de dicho fondo se formaron pequeñas lagunas y humedales, estos últimos también se formaron en los valles de inundación.

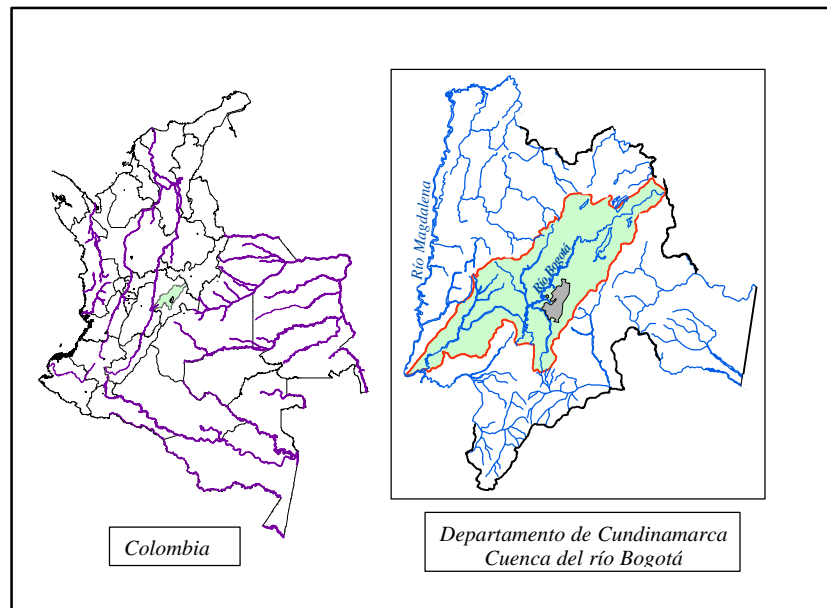


Figura 1. Zona de estudio

El río Bogotá nace en el municipio de Villapinzón en el páramo de Guacheneque, a 3300 m sobre el nivel del mar. y sus aguas fluyen hacia el suroeste para desembocar al río Magdalena en Girardot a 280 m sobre el nivel del mar. En su recorrido de 375 km, recibe las aguas de los ríos Sisga, Neusa, Tibitó, Negro, Frío, Chicú, Salitre, Fucha, Tunjuelito, Balsillas (recoge aguas de los ríos Subachoque y Bojacá), Calandaima y Apulo (CAR, 2000).

En su trayectoria se pueden identificar tres sectores: la cuenca alta (165 km), la cuenca media (90 km) y la cuenca baja (120 km), esta última es la más afectada por residuos de actividades humanas, ya que recibe las aguas residuales de los municipios de las cuencas alta y media.

En la cuenca alta las aguas son tranquilas debido al relieve plano en esta zona; en la cuenca media el río es torrencioso debido a un desnivel mayor a 2000 metros en un trayecto corto, lo cual provoca erosión; y en la cuenca baja vuelve a ser tranquilo por correr sobre una zona de poco desnivel topográfico.

En la cuenca alta existen obras de regulación y control de inundaciones del río como: jarillones construidos a lo largo de sus orillas, rectificación del cauce y represamiento de algunos de sus afluentes. La cuenca alta es la más importante desde el punto de vista hidrológico porque el río Bogotá y sus afluentes conforman una vasta red de drenaje en la Sabana, suministran agua a las poblaciones, a los cultivos, a la ganadería de las tierras adyacentes y se utilizan para la producción de energía eléctrica. Las lagunas y los pantanos sirven de reguladores de caudales al recibir los excesos de agua que llevan los ríos, y suministran al mismo tiempo gran parte del agua de riego utilizada en la Sabana.

En la cuenca media, la red hidrológica no es muy densa y la mayoría de las corrientes son de lecho profundo y valles estrechos, que dificultan el suministro de agua para consumo humano y otros usos. Los caudales en ésta zona son cada vez menores debido a la tala incontrolada de los bosques en la parte alta de la cuenca.

En esta parte se encuentran algunos ríos como el Calandaima, Apulo y Lindo que caen directamente al río Bogotá y el Bajamón y Curí que desembocan en el río Apulo.

En la cuenca baja la red hidrográfica es escasa. El suministro de agua es una de las principales limitantes para el desarrollo agropecuario de esta zona, especialmente en los alrededores de Girardot, Agua de Dios y Tocaima. Las principales corrientes acuosas diferentes al río Bogotá, son las quebradas La Palmera, que nace en Agua de Dios, El Buey, que nace en Ricaurte y Negra que nace en Tena; todas ellas desembocan directamente al río Bogotá.

2.3 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS

La actividad socioeconómica de la zona se ha incrementado y diversificado continuamente y ha estado ligada al uso intensivo de recursos naturales y al incremento no planificado de la población, especialmente en la Sabana de Bogotá en donde se sitúa la ciudad capital.

La expansión agrícola y urbana ha producido alta demanda del recurso suelo y ha propiciado cambios de uso de zonas naturales protegidas y zonas de uso agrícola y ganadero a zonas de uso industrial y urbano. Esta cuenca, incluyendo Bogotá D.C., en conjunto se ha convertido en una de las zonas de mayor densidad de población del país (19 % de la población total), es receptora de múltiples actividades humanas e industriales (30% de la industria nacional) y ejerce fuerte demanda de servicios públicos y de uso de recursos naturales.

El manejo de la cuenca del río Bogotá depende de la Corporación Autónoma Regional CAR, entidad que tiene potestad para “reservar, alinderar, administrar o sustraer, en los términos y condiciones que fijen la ley y los reglamentos, los distritos de manejo integrado, los distritos de conservación de suelos, las reservas forestales y parques naturales de carácter regional y reglamentar su uso y funcionamiento”.

Desde su nacimiento hasta su desembocadura, el río soporta actividades agropecuarias e industriales y se ha constituido en factor de desarrollo de su zona de influencia al suministrar agua a las poblaciones. Paralelo a lo anterior la cuenca ha sido receptora de residuos sólidos, líquidos y gaseosos de industrias y de actividades domésticas, agropecuarias y extractivas. La producción promedio de residuos sólidos se ha calculado en 0.22 kg/hab/día para áreas rurales incluyendo cabeceras municipales y en 0.65 kg/hab/día en Bogotá sin incluir residuos industriales y escombros. Se considera que el 18% de estos residuos son reciclados (CAR, 2000).

Algunas cabeceras municipales cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales (18) y existen planes para ampliar la cobertura a otros municipios (10). Se presenta deficiencia en infraestructura para disposición de basuras y residuos sólidos, aunque existen planes para la construcción de rellenos sanitarios regionales que subsanen las deficiencias existentes (CAR, 2000)

Las actividades agropecuarias, mineras e industriales que se desarrollan en ésta zona han estado ligadas al desarrollo del comercio y actividades financieras (sector terciario), a intensa urbanización, a explotación ganadera, a industria de lácteos y al cultivo de flores para la exportación.

La actividad industrial incluye floricultura 30%, cuero y curtiembres 27%, alimentos 23%, productos químicos 3%, estaciones de servicio 2% y otras actividades 2% (incluyendo ganadería) (CAR, 2000). En la parte alta de la cuenca se destacan las industrias del cuero y curtiembres; en la cuenca media (Sabana de Bogotá) se diversifica y concentra la industria que genera bienes de consumo, tales como metalmecánica, vidrio, sustancias químicas,

alimentos, cervezas y bebidas, entre otras; y en la cuenca baja existen principalmente industrias de bebidas y alimentos.

En toda la cuenca del río Bogotá, especialmente en la Sabana, se desarrollan actividades agrícolas que soportan la industria de alimentos y la floricultura de exportación (80% de la producción nacional). La agricultura se concentra principalmente en cultivos transitorios que representan cerca del 92% de la producción agrícola total, de los cuales 13% corresponden a cultivo de flores en la parte alta y media. Las actividades ganaderas surten el mercado local y a las industrias de lácteos, alimentos y del cuero.

La industria extractiva minera está centrada principalmente en la explotación a pequeña escala de carbón con producción de coque, aprovechamiento de sal (Zipaquirá y Nemocón), explotación de calizas, arenas silíceas y materiales de construcción (gravas, recibos, arcillas, piedras ornamentales). Aunque existen yacimientos de otros minerales industriales como yeso, diatomitas, hierro, azufre y fosfatos, no son explotados comercialmente.

2.4 CUENCA DEL RIO BOGOTA

El adecuado manejo de la cuenca del río Bogotá es de vital importancia para el desarrollo social y económico de la zona central del país que alberga la ciudad capital, su problemática esta íntimamente relacionada con el manejo del agua en la sabana, la disponibilidad del recurso hídrico y su calidad.

2.4.1 Calidad del agua del río Bogotá

En su mayoría las aguas de riego que se utilizan para los cultivos y pastos en la Sabana de Bogotá provienen del río Bogotá y sus afluentes. Estas aguas son y han sido objeto de estudio por parte de diferentes investigadores y entidades públicas y privadas a través de los últimos 60 años, los cuáles han revelado que presentan contaminación con diferentes tipos de sustancias orgánicas e inorgánicas, dentro de las cuáles has sido identificados elementos potencialmente tóxicos.

El contenido de estos elementos en las aguas del Río Bogotá y sus afluentes se debe fundamentalmente al enorme volumen de desechos urbanos y residuos industriales que reciben de la capital y de las poblaciones e industrias de la Sabana. A estos contaminantes industriales y urbanos se suman otros no menos importantes como son los originados por residuos de los insumos agrícolas. El uso sistemático y cotidiano de las aguas contaminadas como única fuente de riego a lo largo de la cuenca del río y durante mas de medio siglo, explica la contaminación que ha sido detectada en suelos, aguas superficiales, aguas subterráneas y en la atmósfera de la zona de influencia del río Bogotá (CAR, 1986).

Datos históricos sobre la calidad del agua del río Bogotá (Demanda Bioquímica de Oxígeno -DBO y Oxígeno Disuelto -OD) indican que la carga residual de aguas negras ha sido crítica desde hace varias décadas. (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores de calidad del agua del Río Bogotá, promedios de 1969 a 1971
(Memorando Técnico No.188.7-5-004 de la EAAB, 1979)

Tramo del río	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	pH	Cl ⁻ (mg/L)
Espino-Puente Vargas	5.0	2	8.5	230
Puente Vargas-Vuelta Grande	5.4	2	9.2	118
Vuelta Grande-Río Fucha	0.3	90	7.1	91
Río Fucha-Río Tunjuelito	0.0	60	7.0	80
Río Tunjuelito-Alicachín	0.0	105	7.0	-

En el año 1979, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) efectuó un estudio en varias estaciones de muestreo sobre el río Bogotá, localizadas entre el Espino, cerca de Tocancipá, y Girardot. Desde el Espino a Vuelta Grande, cerca de Engativá, el río conserva niveles de OD (6.5 mg/L) y DBO (cerca a cero) aceptables, reflejando condiciones de un ambiente acuático sano. Entre Vuelta Grande y La Laguna, cerca de Fontibón, se deterioran las condiciones de oxigenación del agua y se evidencian condiciones de un río contaminado. Desde la Laguna hasta las Ventas, cerca del Embalse del Muña, el río presenta evidencias de alta contaminación y la condición es tóxica para la vegetación y la vida animal. Desde Mesitas del Colegio hasta Girardot el río no posee una buena capacidad de auto-depuración y fluye hacia el río Magdalena en condición contaminada.

Posteriormente en 1981, la CAR y el Instituto Nacional de Salud (INAS) realizaron un estudio para determinar el grado de contaminación del río Bogotá por metales pesados, pesticidas y fenoles, en estaciones de muestreo localizadas en los ríos Juan Amarillo, Fucha y Tunjuelo, algunos resultados se incluyen en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Contaminantes químicos en aguas y sedimentos de afluentes del Río Bogotá (CAR e INAS, 1981)

Contaminante	Fuente	Río Juan Amarillo (mg/L)	Río Fucha (mg/L)	Río Tunjuelo (mg/L)
Mercurio	Agua	0.25	0.2	3.0
Mercurio	Sedimento	2.21	0.64	1.33
Arsénico	Agua	Ninguno	Ninguno	0.2
Plomo	Agua	0.2	Ninguno	0.04
Fenol	Agua	Ninguno	0.10	0.09
Lindano	Agua	Trazas	Trazas	Trazas
Lindano	Sedimento	6.0	0.1	36
Dieldrine	Agua	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Dieldrine	Sedimento	18	Ninguno	Ninguno
Aldrín	Agua	Ninguno	Trazas	Ninguno
Aldrín	Sedimento	Ninguno	0.3	Ninguno
Heptaepóxido	Agua	Ninguno	Trazas	Ninguno
DDT	Sedimento	8	0.9	0.3

En estudios más recientes provenientes de un programa de muestreo desarrollado por la CAR (1986), se consideraron 12 estaciones en seis oportunidades durante los años 1980-

1982, se efectuaron mediciones de DBO, DQO, OD, pH, sólidos totales disueltos, nitrógeno amoniacal y se concluyó que las aguas del río Bogotá se encuentran cada vez más contaminadas. Dentro de estos monitoreos también se efectuaron medidas de metales pesados en las aguas del río Bogotá y de sus afluentes, comprobando la presencia de estos elementos potencialmente peligrosos (**Tablas 3 y 4**).

El primer aporte destacable de contaminantes al río Bogotá, ocurre a la altura del corredor Villapinzón -Chocontá, donde recibe las aguas residuales del proceso de curtiembre de aproximadamente 200 tenerías, que utilizan en el curtido de pieles insumos tales como: sulfuro de sodio, cal, sulfato de amonio, ácido fórmico, ácido sulfúrico, cromo en polvo, bicarbonato de sodio, amoniaco y aceites; generando pérdida de oxígeno disuelto e incremento de DBO y DQO, así como aumento de cloruros, sulfatos, cromo, contenido de sólidos y conductividad. La capacidad depuradora del río, la acción de los sistemas de tratamiento de los vertimientos municipales, sumado al aumento del caudal aportado por sus tributarios recuperan parte del oxígeno perdido y permiten utilizar el recurso para el acueducto de Bogotá captando 4.5 m³/s en la bocatoma de Tibitoc, con posibilidad de ampliación hasta 10.5 m³/s. Aguas abajo, el efecto de las descargas del río Negro y de algunas industrias establecidas cerca de la ribera del río y que no disponen de sistema de tratamiento, vuelven a disminuir el nivel de oxígeno.

Tabla 3. Carga de metales pesados al Río Bogotá (CAR, 1986)

Elemento	Ríos Bogotá y Juan Amarillo (kg/día)	Río Bogotá (mg/L)
Cromo	152.00	0.050 - 0.076
Plomo	49.77	0.35
Mercurio	2.94	0.067
Cadmio	---	0.01
Níquel	---	0.104

Tabla 4. Contenido de metales en aguas de afluentes del Río Bogotá (CAR, 1986)

Metal (mg/L)	Río Juan Amarillo	Río Tunjuelito	Río Fucha
Cadmio	0.006	0.025	0.006
Cromo	0.005	0.080	0.006
Cobre	0.009	0.028	0.017
Plomo	0.113	0.353	0.087
Zinc	0.174	0.327	0.433
Níquel	0.031	0.135	0.044
Hierro	1.260	8.050	1.902

El río Bogotá recibe las aguas negras domiciliarias de 26 municipios, algunos de los cuales cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, tales como: Cajicá, Chía, Chocontá., Facatativá, Funza, Gachancipá, Guatavita, Madrid I, Madrid II, Mosquera, Nemocón, Sesquilé, Sopó, Subachoque, Suesca, Tocancipá, Zipaquirá I, Zipaquirá II. Sin embargo, estas plantas no alcanzan a tratar todas las aguas residuales de cada municipio y en muchos casos sólo se somete una parte de las aguas negras a tratamiento, mientras que la otra parte es vertida directamente al río Bogotá.

A partir de la confluencia con el río Teusacá hasta Bogotá, la calidad del agua del río es apta para riego, con ciertas restricciones. A medida que el río atraviesa la zona urbana de la capital, su proceso de deterioro se incrementa con los aportes de carga contaminante de los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo. Las cuencas anteriores o en algunos casos el río Bogotá directamente, reciben vertimientos de siete áreas independientes en la periferia de la ciudad, estas son: Torca, Conejera, Jaboque, El Dorado, Tintal y Soacha.

El oxígeno mantiene condiciones límites entre las fases aeróbica y anaeróbica y la DBO registra los mayores niveles de concentración de todo su recorrido. Estos valores críticos prevalecen por más de 80 km, hasta Puente Canoas, donde el río es trasvasado, casi en su totalidad, al embalse del Muña, uno de los principales generadores de energía del país; con una grave implicación ambiental (Sarmiento et. al., 2002).

La cuenca del Salitre esta dividida en tres subcuencas principales, Salitre, Córdoba y San Marcos. Las aguas negras en la subcuenca del Salitre se recolectan de los interceptores de Río Negro, Río Nuevo, y Salitre; la subcuenca de Córdoba de los interceptores de la Uribe, El Cedro, Los Molinos, Britalia y Córdoba; y la subcuenca de San Marcos recibe los aportes del interceptor de San Marcos. Suba y el área entre la estación de bombeo y San Marcos descargan actualmente sus aguas negras directamente al río Salitre.

La cuenca del Fucha, abarca la mayor actividad comercial e industrial de la ciudad. Esta dividida en cinco subcuencas: Fucha, San Francisco, del Sur, Kennedy y Fontibón. Los interceptores son Río Seco, Fucha, Las Américas, Comuneros y Albina en la subcuenca de Fucha; San Francisco, Boyacá y CAN en la subcuenca de San Francisco y los interceptores del Sur, Kennedy y Fontibón.

La cuenca del Tunjuelo, contiene áreas residenciales, industriales y mixtas. La explotación de los materiales aluviales del río Tunjuelo y las descargas directas de aguas negras domésticas e industriales causan una alta contaminación del río Tunjuelo.

En su recorrido por la cuenca baja, la calidad del agua presenta dos transformaciones importantes: la primera es una recuperación importante del oxígeno disuelto gracias a la caída constante de aproximadamente 2000 metros en menos de 50 kilómetros; la segunda ocurre después de la confluencia del río Apulo, donde el oxígeno comienza a disminuir paulatinamente por la acción de la materia orgánica que aun no se ha degradado y por la pérdida de velocidad. Finalmente, en las estaciones las Lomitas y Salsipuedes el aumento de la DBO y la disminución del oxígeno disuelto reflejan el efecto del vertimiento de las aguas residuales de los municipios de Tocaima y Girardot sobre el río.

2.4.2 Principales contaminantes del río Bogotá

Existe una gran cantidad de contaminantes que pueden afectar el río Bogotá, sin embargo aún no se han podido determinar todos y quizás nunca se conozca con exactitud todo su espectro. En estudios realizados por entidades como la CAR, EAAB, INGEOMINAS y la Universidad Nacional de Colombia, entre otras (CAR, 1995, 2001; EAAB, 1979; González y Mejía, 1995; González, 1997; González y Vargas, 1997; Matamoros, 1998; Mejía, 1995, 1998; Morales, 1998; Reyes, 1999; Vargas, 1995, Vargas y Mejía, 1998), se ha reportado la presencia de los siguientes tipos de contaminantes:

- ? Materia orgánica, bacterias, hongos y virus provenientes de las aguas negras.
- ? Desperdicios industriales principalmente cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos. También desechos ácidos, alcalinos y gases tóxicos disueltos en el agua como los óxidos de azufre, de nitrógeno, amoníaco, cloro y sulfuro de hidrógeno.
- ? Insumos agrícolas como fertilizantes, pesticidas y herbicidas que han sido aplicados a los cultivos aledaños al río y son transportados por las aguas de escorrentía o por la influencia de los vientos.
- ? Productos químicos de uso doméstico (detergentes, limpiadores, insecticidas) cuyos desechos son aportados a las aguas negras que llegan al río.
- ? Metales pesados (plomo, cadmio, mercurio, arsénico, entre otros) aportados posiblemente por el uso de insumos agrícolas y por insumos químicos usados en las industrias.
- ? Diversos productos químicos industriales de origen natural como aceites, grasas, breas y tinturas, y productos químicos sintéticos como pinturas, detergentes, jabones, líquidos limpiadores, que a menudo están constituidos por mezclas de reactivos químicos en su mayoría no biodegradables.

2.4.3 Efectos producidos por la contaminación sobre los ecosistemas y la salud humana

La descomposición de la materia orgánica en el agua produce una disminución de la cantidad de oxígeno, que causa graves daños a la flora y fauna acuática, pero que

desaparece al término del proceso de putrefacción. La iniciación del proceso de auto-recuperación apenas empieza para el río Bogotá, sin embargo dada la gran acumulación de materia orgánica, los programas de saneamiento del río en su cuenca alta y la construcción de plantas de tratamiento no aminoran el problema y se proyecta una duración de varias décadas para que termine el proceso de depuración. Para el tratamiento de las aguas residuales de Bogotá se cuenta con un programa a 20 años, que incluye la construcción de tres plantas de tratamiento en la desembocadura de los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo. En la primera fase de este programa se adjudicó la construcción y operación de la Planta de Tratamiento de El Salitre con un consorcio francés, sin embargo el compromiso de este contrato se limita a la reducción de la carga orgánica y sólidos suspendidos, mientras que los demás contaminantes arriba mencionados no se han tomado en cuenta.

Entre los efectos nocivos para organismos, poblaciones y ecosistemas, causados por aguas contaminadas, bien sea producida por causas naturales o por las actividades del hombre, se destacan los siguientes:

- ? Perjuicios a la salud humana como intoxicaciones, enfermedades infecciosas (por ejemplo diarrea, afecciones pulmonares, erupciones en la piel), y enfermedades crónicas (por ejemplo, cáncer) que pueden llevar incluso a la muerte.
- ? Daños a la flora y fauna (eutroficación, enfermedad y muerte).
- ? Alteraciones de ecosistemas (erosión, eutroficación, acumulación de compuestos dañinos persistente, destrucción).
- ? Molestias organolépticas (malos olores, sabores y apariencia desagradable).
- ? Contaminación de los suelos, caracterizados por ser acumuladores y dispersores según cambios en las condiciones climáticas y fisicoquímicas de los suelos.
- ? Contaminación del aire, por evaporación de contaminantes del río durante períodos de verano.
- ? Un efecto indirecto sobre los ecosistemas de la Sabana ocurre por la utilización de pozos de agua subterránea para consumo humano y riego en muchas parcelas, lo cual ha causado un descenso del nivel de agua freática (sub-superficial) y el desecamiento de los suelos en los cerros y en la parte plana, con la consecuente desaparición de gran parte de los humedales, quebradas y manantiales, lo cual ha causado efectos ambientales nefastos para la biodiversidad, así como para la población que usaba este recurso para el consumo o para las actividades agrícolas (Carvajal, 2003).
- ? Aunque no existen lineamientos del estado tendientes a establecer el diagnóstico de los efectos adversos sobre la salud humana, por el uso directo o indirecto de las aguas del río Bogotá para actividades socio económicas, algunos estudios aislados (Quiroga y otros, 2000; Secretaría de Salud de Bogotá, 2000; Sarmiento y otros, 2002) han encontrado niveles altos de algunos elementos tóxicos en aguas, suelos y cultivos (hortalizas), en las áreas de influencia del río Bogotá y han tratado de correlacionar estos resultados con la incidencia en la salud de los seres humanos y animales, sin embargo la poca investigación en este campo en el país, no permite conocer aún los efectos reales que puede tener el uso de éstas aguas contaminadas con diferentes sustancias.
- ? A nivel mundial sin embargo, es bien conocida y existen múltiples referencias internacionales que documentan la incidencia del consumo de alimentos y agua con

altos contenidos de metales y de otros elementos sobre la salud humana. En la **Tabla 5** se incluyen algunos efectos ocasionados por la presencia de altas concentraciones de los elementos estudiados (potencialmente tóxicos) en la salud de los seres vivos.

Tabla 5. Fuentes y efectos por exposición a altas concentraciones de metales tóxicos en seres vivos (Reimman, et. al. 1998, Plumlee & Ziegler, 2003)

Elemento	Fuentes naturales/antrópicas	Características y efectos principales
As	<p>*Rocas enriquecidas en minerales de As - depósitos minerales (venas, sulfuros masivos, <i>shales</i>, esquistos y areniscas cuprosas, fosfatos)</p> <p>*Emisiones de refinerías, minería, combustión de carbón.</p> <p>*Residuos de agroquímicos, industria química, estiércol animal.</p>	<p>*Esencial para algunos organismos. Tóxico, teratogénico.</p> <p>*Envenenamiento agudo origina diferentes enfermedades (hipotensión, afección a sistemas sanguíneo y nervioso, daños al riñón, piel, cáncer), y colapso hasta la muerte.</p> <p>*Toxicidad crónica causa hipotensión, desordenes y cáncer de piel, problemas de sangre, anemia, riñón y neuropatía.</p>
Cd	<p>*Mineralizaciones de Zn-Cd, depósitos tipo Mississippi Valley, <i>shales</i> negros y fosfáticos y esquistos.</p> <p>*Combustión de carbón, refinerías (Zn, Cu), minería, fundiciones (Fe, acero), fertilizantes, tráfico (llantas y exhostos), lodos y aguas residuales, incineración de basuras.</p> <p>*Electroplateado, baterías Cd-Ni, pigmentos, estabilizadores de plásticos, aleaciones de bajo punto de fusión, tubos de TV</p>	<p>*Posiblemente esencial para algunos animales en concentraciones muy bajas (ratas). Tóxico y posiblemente cancerígeno.</p> <p>*Exposiciones agudas causan lesiones de tracto gastrointestinal, hígado y riñones, cardiopatías, acidosis, neumonitis.</p> <p>*Exposición crónica causa obstrucción y cáncer de pulmón, daños en hígado y afectación del sistema óseo (osteoporosis, enfermedad de itai-itai)</p>
Cr	<p>*Enriquecido en rocas ultramáficas, máficas y depósitos asociados. Insoluble como cromita y soluble en evaporitas.</p> <p>*Industria química, refinerías, minería (cemento), tratamiento de cuero electrometalurgia, combustión de gas, petróleo y carbón, incineración de basuras, fertilizantes fosfatados.</p>	<p>*Esencial para muchos organismos. Cr⁺³ se considera relativamente inofensivo y Cr⁺⁶ altamente tóxico, con algunos de sus compuestos carcinogénicos. Irritación y lesiones de piel, tracto respiratorio e intestinal.</p> <p>*Exposiciones prolongadas causan cáncer de pulmón.</p>
Cu	<p>*Rocas enriquecidas (máficas, <i>shales</i>, esquistos y ultramáficas, capas rojas sedimentarias de origen continental, basaltos), depósitos enriquecidos en Cu (pórfidos cupríferos, sulfuro masivo).</p> <p>*Emisiones de minería y subproductos, agricultura, industria plástica.</p>	<p>*Esencial. Tóxico en dosis altas.</p> <p>*Enfermedad de Wilson, inflamación del intestino e hígado, hemólisis, hiperglicemia.</p>
Mn	<p>*Común en muchos depósitos minerales y en rocas máficas y ultramáficas. Presente en calizas y otras rocas formadas por precipitación química.</p> <p>*Residuos agrícolas, tráfico (gasolina), minería y subproductos.</p>	<p>*Esencial. No es muy tóxico.</p> <p>*Se presentan mas problemas por deficiencia (deformaciones de huesos, disfunciones), que por toxicidad.</p> <p>*Exposiciones crónicas (neumonitis-Mn, manganismo, desordenes síquicos y neurológicos), cirrosis por ingestión.</p>
Mo	<p>*Depósitos enriquecidos en Mo (tipo porfirítico), <i>shales</i> negros, esquistos, granitos y granodioritas.</p> <p>*Emisiones oceánicas, fertilizantes, aguas residuales.</p>	<p>*Esencial, excepto para algunas bacterias. Tóxico para plantas y animales a altas concentraciones. No cancerígeno.</p> <p>*Ocasiona alto ácido úrico en suero y orina, pérdida de apetito, diarrea, anemia, molibdenosis, anemia.</p>

Elemento	Fuentes naturales/antrópicas	Características y efectos principales
Ni	*Enriquecido en rocas ultramáficas, máficas, y depósitos asociados, <i>shales</i> negros, <i>shales</i> fosfáticos. *Emisiones de minería, refinerías, plantas eléctricas, residuos industriales, tráfico.	*Esencial para algunos microorganismos. Compuestos de Ni ⁺² no son tóxicos. Otros compuestos son extremadamente tóxicos y/o cancerígenos y causan alergias, bronquitis, sinusitis. Ingestión afecta sangre, riñón, hígado, sistema nervioso y hasta la muerte (para cardíaco).
Pb	*Rocas enriquecidas en Pb (granitos, granodioritas y areniscas). *Tráfico (emisiones de gasolina con Pb), minería, refinerías, pinturas, industria química, del petróleo, fertilizantes, incineración de basuras.	*No esencial. Tóxico. *Envenenamiento agudo causa encefalopatía, falla renal y afección del sistema nervioso. *Envenenamiento crónico afecta sistema nervioso, enfermedades del hígado, hipertensión, anemia.
Zn	* <i>Shales</i> negros, esquistos y rocas máficas (basaltos, gabros) y depósitos enriquecidos en Zn (sulfuro masivo). *Emisiones de refinerías, minería y subproductos, tráfico automotor (llantas), aguas y lodos residuales.	*Esencial. Toxicidad baja, es más importante la deficiencia. *Posiblemente no carcinogénico pero alta ingestión influye en rata de aumento de los tumores. Su ingestión causa anemia hipercrónica y los vapores fiebre.

2.4.4 Usos del agua del río Bogotá

El uso de aguas con altos contenidos de elementos peligrosos, para riego en zonas agrícolas de la Sabana ha contribuido al deterioro de la calidad de los suelos.

El agua del río Bogotá se ha usado tradicionalmente para riego de cultivos de flores, hortalizas, pastos, entre otros. La práctica agrícola de riego con aguas contaminadas ha sido la causa principal de una cadena de efectos adversos sobre la salud humana y animal a corto, mediano y largo plazo, incluyendo efectos en la salud de los pobladores que consumen productos cultivados en suelos regados con dichas aguas y productos derivados de la actividad ganadera (carne, leche, queso, etc.) (CAR-BID, 1992).

Diferentes usos y actividades (industriales, agrícolas y domésticas), afectan desde su nacimiento la calidad de las aguas del río Bogotá. Entre los usos se destacan: uso doméstico directo, para potabilización y para riego de cultivos. Además de la planta de tratamiento de Tibitoc y del distrito de riego de La Ramada, muchas fincas a lo largo del río extraen las aguas con sistemas artesanales o tecnificados, y las utilizan para uso doméstico y para el riego de cultivos.

Las principales actividades que involucran las aguas del río Bogotá a lo largo de su curso son:

1. Curtiembres de Villapinzón: Doce kilómetros abajo del nacimiento del río se encuentran unas 200 empresas artesanales y semi-industriales de curtido de cuero, muchas de ellas ubicadas cerca de su cauce. Estas empresas para el procesamiento del cuero, utilizan materias primas que contienen compuestos de mercurio, plomo y cromo,

entre otros, cuyos excedentes son desechados en las aguas residuales que también contienen alta carga orgánica, sin ningún tratamiento al naciente río Bogotá.

2. Agua para Bogotá: Aproximadamente 50 km antes de entrar a Bogotá el río provee de agua a la planta de Tibitóc, donde es tratada para agua potable. Esta planta también es alimentada por los embalses del Sisga, Neusa y Tominé y provee el 25% del agua que llega a la población de Bogotá.
3. Aguas negras: El río recibe directamente o a través de pequeñas quebradas, aguas residuales de 18 municipios de la Sabana, algunas sin ningún tipo de tratamiento o depuración. Los municipios son: Villapinzón, Chocontá, Suesca, Guasca, Sesquile, Nemocón, Tocancipá, Gachancipá, Cogua, Zipaquirá, Cajicá, Chía, Cota, Tabio, Tenjo, Subachoque y Sopó.
4. Riego: Las aguas del río Bogotá son utilizadas para alimentar el distrito de riego de la Ramada que sirve a unas 1000 hectáreas localizadas en el área de Funza y Mosquera. Además, se extraen grandes cantidades directamente del río por medio de bombas, para el riego de cultivos o pastos establecidos en los terrenos aledaños a sus márgenes.
5. Inundaciones: urbanizaciones ilegales, se han establecido en zonas de pantanos y “chucuas” que han sido paulatinamente rellenas y exponen a barrios enteros a inundaciones periódicas. Miles de personas de las localidades de Kennedy y Bosa especialmente, estaban expuestas en invierno a las inundaciones de las aguas sépticas del río Bogotá, situación que se ha controlado en gran parte con obras realizadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).
6. Producción de energía: A partir del embalse del Muña o Alicachín, el río alimenta dos sistemas de generación de energía hidroeléctrica que producen más de 1000 Mw., esto se logra con agua del río y de las quebradas del Muña y Agua Clara, almacenada en el embalse. El Muña está situado en la proximidad de la población de Sibaté, vía a Fusagasuga, es manejada por la empresa de energía eléctrica Codensa, tiene un área de 7.300 hectáreas y una capacidad de almacenamiento de agua de 41 millones de metros cúbicos. Con la entrada de las aguas del río Bogotá, el embalse perdió su pureza y se transformó en una zona de almacenamiento de aguas negras de la cuenca del río Bogotá.
7. Estudios de evaluación ambiental han encontrado que el embalse del Muña está afectado por contaminación severa, producida por materia orgánica en descomposición y contaminación relativamente importante, por sustancias químicas de origen industrial y agrícola, principalmente metales pesados (Sarmiento y otros., 2002).

Esta situación lleva a considerar la posibilidad de que se presente un proceso de bioconcentración de los contaminantes en la cadena trófica. Los metales pesados presentes en el embalse pueden ser absorbidos por el buchón de agua o pastos y hortalizas que son sembrados en los alrededores del embalse, estos a su vez pueden acumular metales en sus tejidos. Algunos de estos vegetales son usados para alimento del ganado, el cual a la vez

aporta productos como la leche o sus derivados y la carne, para el consumo humano, los cuales se constituirían en portadores de los contaminantes presentes originalmente en las aguas del embalse.

2.5 GEOLOGÍA

El área de la Sabana de Bogotá, esta ubicada en la cordillera Oriental abarca la zona axial y el inicio de sus flancos oriental y occidental; las planchas publicadas por INGEOMINAS escala 1:100.000 que cubren esta zona son: 209 Zipaquirá (Montoya y Reyes, 2003), 208 Villeta (Acosta y Ulloa, 1996), 227 La Mesa (Acosta y Ulloa, 1997), 246 Fusagasugá (Acosta y Ulloa, 1998) y 245 Girardot (Acosta et al., 2000), en donde la secuencia sedimentaria abarca rocas de edad desde Cretáceo inferior hasta el Cuaternario (**Figura 2**).

2.5.1 Cretácico

Las rocas del Cretácico inferior (Formaciones Trinchera, Socota, Capotes, Hilo), afloran en el flanco occidental de la cordillera Oriental haciendo parte de la cuenca baja del río Bogotá y las rocas del Cretácico superior afloran tanto en los flancos oriental y occidental como también en la parte central y corresponden a las Formaciones Simijaca, La Frontera, Grupo Olini, Conejo y Grupo Guadalupe; sin embargo el Grupo Olini solo aflora en el sector más occidental (cuenca baja del río Bogotá) (**Figura 2**).

Formación Trincheras. Etayo (1979) define formalmente esta formación, esta constituida por calizas ricas en bivalvos y arcillolitas. Acosta y Ulloa (1997), la dividen en dos miembros, **el inferior**, compuesto por lodolitas negras intercaladas con calizas y arcillolitas que terminan en un paquete de areniscas y **el miembro superior** conformado por arcillolitas laminadas de color gris oscuro a café y que Etayo (1979) llamó unidad indenumerada.

Formación Socotá. Para Etayo (1979), esta unidad esta conformada por dos miembros, uno inferior Socotá y el superior Capotes; el primero esta constituido por areniscas, areniscas y limolitas calcáreas y el superior, son *shales* grises, arcillolitas con concreciones calcáreas y yeso. Acosta y Ulloa (1997), elevan a rango de formación al miembro Socotá de Etayo (1979), el cual esta constituido por lodolitas calcáreas negras con intercalaciones de capas delgadas de limolitas y areniscas, le siguen areniscas con lodolitas y finalmente lodolitas calcáreas.

Formación Capotes. Acosta y Ulloa (1997) definen como Formación Capotes al miembro Capotes de Etayo (1979), la cual esta representada por lodolitas calcáreas, de color negro, con arcillolitas, hacia la parte superior son *shales* negros no calcáreos, son comunes concreciones micríticas.

Formación Hiló. Según Etayo (1979), esta unidad esta constituida por una alternancia de lilitas con *shales* negros y grises. Para Acosta y Ulloa (1997), la unidad empieza con lilitas

y lodolitas silíceas calcáreas, le sigue intercalaciones de lodolitas calcáreas, *chert* y calizas y termina con lodolitas calcáreas y capas de caliza.

Formación Simijaca. Acosta y Ulloa (1997) llaman Formación Simijaca a lo que Etayo (1979) consideró unidad indenominaada en la región del Tequendama. Se caracteriza por ser una sucesión de lodolitas y limolitas grises oscuras con intercalaciones de areniscas.

Formación La Frontera. En la región de Apulo, Cáceres y Etayo-Serna (1969), llaman Formación La Frontera a la unidad que consiste en una alternancia de *shales* oscuros con concreciones calcáreas y limolitas silíceas; hacia el techo son intercalaciones de porcelanitas, *chert* y *shales* con concreciones calcáreas.

Grupo Olini. Esta unidad aflora en el flanco occidental de la cordillera Oriental, esta constituida de base a techo por la Lidita inferior, Nivel de lutitas y areniscas y la Lidita superior. **La Lidita inferior** es una alternancia de *chert* porcelaníticos y *chert* carbonosos con lutitas y *shales* negros; **el Nivel de lutitas**, en general son lutitas, esta compuesto por lutitas grises localmente arenosas con capas de *chert* en el medio, **La Lidita superior**, son capas de *chert* que alternan con lutitas y *shales* (De Porta 1965).

Formación Conejo. Definida en el norte de la Sabana de Bogotá, en la región de Villa de Leyva por Renzoni (1981) y Etayo (1968); Montoya y Reyes (2003), describen en la Sabana de Bogotá la siguiente sucesión: la parte inferior esta constituida por arcillolitas negras que parten en *shales* y un nivel calcáreo; la parte media esta representada por un intervalo de arcillolitas grises, seguida por un nivel silíceo y la parte superior es una alternancia de capas de areniscas y lodolitas que parten en *shales*.

Grupo Guadalupe. Fue definido por Pérez y Salazar (1978) y esta constituido por cuatro formaciones, Arenisca Dura, Formación Plaeners, Areniscas de Labor y Arenisca Tierna. **La Formación Arenisca Dura** es subdividida en ocho conjuntos constituidos por areniscas en su mayor parte y limolitas, arcillolitas y liditas en menor proporción.

Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del río Bogotá.

La Formación Plaeners esta constituida por arcillolitas, liditas, limolitas y en menor proporción areniscas de grano muy fino.

Formación Arenisca de Labor, se subdivide en tres segmentos: el inferior son capas muy gruesas de areniscas arcillosas separadas por capas delgadas de arcillolitas; el segmento medio esta representado por intercalaciones de bancos de areniscas, paquetes de lodolitas y arcillolitas y el superior por areniscas arcillosas separadas por capas delgadas de arcillolitas. **Formación Arenisca Tierna** se diferencia de la Labor por presentar capas muy gruesas de areniscas de tamaño más grueso (Pérez y Salazar, 1978)

Formación Guaduas. Para Sarmiento (1994), es una unidad de rocas blandas, constituida por arcillolitas, limolitas y areniscas, con mantos de carbón. **La parte inferior** esta conformado por conjuntos de arcillolitas, lodolitas y areniscas con mantos de carbón para terminar en un nivel arenítico, llamado Arenisca La Guía. **En la parte media** se observan sucesivamente varios mantos de carbón, estos están intercalados dentro de una secuencia de lodolitas, limolitas y esporádicas capas de areniscas; en la parte mas superior, las lodolitas son de color gris oscuro, grises azul, verdosa y rojizas, se intercalan con éstas, algunos niveles carbonosos o carbón arcilloso. **La parte superior** es un conjunto de areniscas intercaladas con lodolitas, limolitas y mantos de carbón; sobre este, se presentan lodolitas verdosas y rojizas en donde los niveles carbonosos están dispersos, para terminar en limolitas y arcillolitas de colores rojizos, verdosos y azulosos.

2.5.2 Paleógeno y Neógeno

En la cuenca baja del río Bogotá afloran las rocas de la Formación Barzaloza (paleógena) y el Grupo Honda (neógena) y en la cuenca alta afloran las formaciones Cacho, Bogotá, Regadera y Usme (paleógenas) y Tilatá (neógena) (**Figura 2**).

Formación Barzaloza. Esta formación aflora en la cuenca baja del río Bogotá, Acosta et al., (2000); la dividen en tres unidades, la inferior constituida por conglomerados, la del medio por arcillolitas y limolitas rojas con esporádicas capas de areniscas y el conjunto superior por arenitas medias a conglomeráticas con intercalaciones de lodolitas rojas.

Formación Cacho. Para Hoorn et. al., (1987), la parte inferior presenta intercalaciones de areniscas ferruginosas consolidadas de color amarillo café con arcillolitas multicoloreadas y la parte superior arcillolitas coloreadas con intercalaciones de areniscas. Hacia el norte del área de estudio es común observar areniscas conglomeráticas.

Formación Bogotá. Julivert (1963), define a esta formación y la caracteriza por ser una sucesión en donde se alternan en la parte inferior bancos de arcillolitas rojas, azules, violáceas con capas gruesas y bancos de areniscas y en la parte superior se presentan estas mismas intercalaciones pero en las areniscas es común la estratificación cruzada.

Formación Regadera. Julivert (1963) formaliza la Formación Regadera en el sinclinal de Usme. En el sinclinal de Sisga, Montoya y Reyes (2003), diferencian varios segmentos, el inferior, compuesto por capas de areniscas friables, blancas y naranjas, con estructuras

internas como estratificación cruzada y gradada y algunas capas de conglomerados. Le sigue un segmento blando y luego un segmento constituido por areniscas conglomeráticas y conglomerados. Por último el segmento superior está conformado por lodolitas arenosas de variados colores; areniscas rojizas y naranjas en ocasiones conglomeráticas y hacia el techo presenta intercalaciones de conglomerados.

Grupo Honda. Aflora en la cuenca baja del río Bogotá, De Porta (1965), la divide en la **Formación San Antonio**, constituida por bancos de gravas que alternan con bancos de arenas y lutitas rojas y una parte superior, **Formación Los Limones**, conformada por sedimentos más finos, lutitas y arenas de color rojo, las arenas son conspicuas en la base y hacia el techo las lutitas.

Formación Tilatá. Nombre utilizado por varios autores para los sedimentos de la Sabana de Bogotá, a continuación se hace una descripción de Montoya y Reyes (2003), quienes reportan un espesor de 83 m en la región de Chocontá y diferencian dos segmentos: **el inferior** constituido por arenas de grano medio y grueso intercaladas con capas esporádicas de gravas y en la parte superior por intercalaciones de arenas de grano fino, dispuestas en capas medias con estratificación cruzada y lentes de gravas. **El superior** está constituido por gravas, en donde se observa variaciones en tamaños de clastos, en la naturaleza de la matriz es común observar lentes de arcillas y en ocasiones se presentan intercalaciones de capas delgadas cuneiformes de arenas.

Formación Usme. Julivert (1963), distingue dos niveles, inferior y superior y Hoor et al., (1987), la subdividen en el miembro Usme inferior y Miembro Usme superior; el inferior consiste en arcillolitas cafés y grises y el Usme superior son areniscas amarillosas y arcillolitas limosas, multicoloreadas.

2.5.3 Depósitos cuaternarios

Comprenden todos aquellos depósitos recientes de origen fluvial y lacustre, que se fueron homogenizando y cubriendo unidades más antiguas; se destacan los de la Sabana de Bogotá y su composición de niveles de terrazas lacustres y los abanicos de piedemonte, coluviones y abanicos diluviales localizados en la Calera, Embalse del Neusa y sectores de Sesquilé, Chía, Cota, Facatativa, Funza, Mosquera, Madrid y Tenjo, entre otros (**Figura 2**).

2.5.4 Depósitos piroclásticos y cenizas

Se incluyen entre éstos, pequeños sectores cubiertos por las cenizas volcánicas en los niveles altos de las terrazas y depósitos lacustres de la Sabana de Bogotá y en los cerros de La Calera, embalse de Tominé, Bojacá, Villapinzón y Fómeque. Dichos depósitos provienen de las principales fases de la actividad de los volcanes del complejo Ruiz-Santa Isabel-Tolima, localizados sobre el eje de la Cordillera Central. Estos depósitos de ceniza constituyen el material parental a partir del cual se han originado los suelos de los páramos y algunas de las depresiones fluvio-lacustres localizadas sobre la cordillera Oriental, han sido datados por métodos de huellas de fisión en circón, fragmentos de vidrio y potasio-

argón. La última depositación de cenizas corresponde a la erupción del volcán Arenas del Nevado del Ruiz, ocurrida en noviembre de 1985.

2.6 SUELOS

La descripción de las clases taxonómicas de los suelos en la zona de estudio se hace con relación a los tipos de paisajes con el fin de enmarcarlos dentro de la posición geográfica. Esta descripción se basa en la información publicada en el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca IGAC, (2000).

2.6.1 Suelos del paisaje de montaña

Este paisaje abarca todos los pisos térmicos, desde el extremadamente frío hasta el cálido, en un relieve que varía de ligeramente ondulado a fuertemente escarpado y con materiales en su mayoría sedimentarios y metamórficos.

En este paisaje se presentan suelos de diferente grado de evolución dependiendo principalmente del clima (piso térmico y precipitación), materiales parentales (sedimentarios, metamórficos y cenizas volcánicas) y relieves (ligeros a fuertemente escarpados). Se pueden señalar entre los que predominan, los de baja evolución como entisoles “ents” e inceptisoles “epts”, los que tienen influencia volcánica en algunos lugares andisoles “ands”, y algunos de evolución moderada como los mollisoles “olls” y alfisoles “alfs”.

Los tipos de suelos que más se destacan en este paisaje son como se observa en la **Figura 3**.

La asociación de suelos (MGF, símbolo de la unidad cartográfica) *Humic Dystrudepts - Andic Dystrudepts - Humic Lithic Dystrudepts*, se presenta principalmente en los municipios de **Guasca, La Calera, Sibaté, Usme y Villapinzón**. Se caracterizan por ocupar el tipo de relieve denominado “crestones”, que es ligero a fuertemente escarpado, con pendientes de 25 a 75%, afectado en sectores por erosión hídrica laminar en grado ligero; suelos profundos a superficiales, bien a excesivamente drenados, con texturas finas a moderadamente gruesas, reacción extremada a muy fuertemente ácida, mediana saturación de aluminio y fertilidad moderada a baja.

El complejo (MLC) de *Humic Dystrudepts - Typic Argiudolls - Typic Hapludands - Thaptic Hapludands*, se ubica principalmente en **Chocontá, Cogua, Guasca, La Calera, Sesquilé, Villapinzón y Anolaima - La Florida**. Estos suelos ocupan la posición de lomas en paisaje de montaña, en relieve ligera a fuertemente quebrado, con pendientes 7-12, 12-25 y 25-50%, afectados en sectores por erosión hídrica laminar ligera; suelos profundos a superficiales, bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, reacción extremada a fuertemente ácida, saturación de aluminio media a alta y fertilidad moderada.

La asociación (MMC) *Humic Dystrudepts - Typic Hapludalfs*, en la zona de estudio se encuentra en los municipios **Bojacá, Chocontá, Guatavita, La Calera, Suesca y Sesquilé**. Estos suelos se localizan en lomas de relieve ligera a fuertemente quebrado, con pendientes entre 7-12, 12-25 y 25-50%, afectados en sectores por erosión hídrica ligera y moderada; suelos profundos a moderadamente profundos, bien a moderadamente bien drenados, con texturas medias a finas, reacción extremada a fuertemente ácida, media a alta saturación de aluminio y fertilidad baja.

La consociación (MWB) de suelos *Humic Dystrustepts - Typic Calciustolls*, se puede encontrar en los puntos muestreados en los municipios **Agua de Dios, Anapoima, Cachipay, La Mesa, Mesitas del Colegio, Ricaurte, Viotá y Tocaima**. Estos suelos se desarrollaron a partir de rocas clásticas limoarcillosas y químicas carbonatadas, se localizan en lomas de relieve ligera a fuertemente quebrado, con pendientes 7-12, 12-25 y 25-50%, afectados en sectores por erosión hídrica laminar ligera y frecuente pedregosidad superficial; suelos profundos a muy superficiales, bien a moderadamente bien drenados, con texturas moderadamente finas a finas, reacción muy fuertemente ácida a medianamente alcalina y fertilidad moderada a alta.

El complejo (MQK) de suelos *Humic Eutrudepts - Typic Eutrudepts - Typic Udipsamments*, se localiza en los alrededores de los municipios **Anolaima, La Mesa, Mesitas del Colegio, San Antonio de Tequendama, Tena y Viotá**. Estos suelos ocupan la posición de glacis coluvial, en relieve ligera a moderadamente quebrado, con pendientes 7-12% y 12- 25%, afectados por erosión hídrica laminar ligera y frecuente pedregosidad superficial; suelos profundos a moderadamente profundos, bien a excesivamente drenados, de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas.

La asociación (MLV) de suelos *Humic Lithic Eutrudepts - Typic Placudands - Dystric Eutrudepts*, se ubica extensamente en los municipios **Bojacá, Chocontá, Facatativa, La Calera, San Antonio de Tena, Subachoque, Zipacón y Zipaquirá**. Estos suelos han evolucionado a partir de rocas clásticas limo-arcillosas, químicas carbonatadas y depósitos de cenizas volcánicas, se ubican en crestones de relieve moderadamente quebrado a moderadamente escarpado, con pendientes de 12 a 75%, afectados en sectores por erosión hídrica ligera y moderada; suelos profundos a superficiales, bien a moderadamente bien drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas, reacción fuerte a medianamente ácida, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada a alta.

La asociación (MWC) de suelos *Lithic Ustorthents - Entic Haplustolls*, se presenta en la zona de estudio en los municipios de **Apulo, Agua de Dios, Girardot y Tocaima**. Esta unidad de suelos se ha desarrollado a partir de rocas clásticas arenosas y químicas carbonatadas, ocupa la posición de lomas en paisaje montañoso, con relieve ligeramente quebrado a ligeramente escarpado, pendientes 7-12, 12-25 y 25-50%, afectada en sectores por erosión hídrica laminar ligera; suelos moderadamente profundos a muy superficiales, bien drenados, de texturas finas a gruesas, reacción ligeramente ácida, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada.

La asociación (MWJ) *Typic Calciustolls - Entic Haplustolls*, se presenta en suelos de los municipios de **Agua de Dios, Girardot y Ricaurte**. Comúnmente los suelos de esta unidad resultan de la evolución de depósitos hidrogravigénicos, se distribuyen en abanicos de carácter aluvial, en relieve ligera a moderadamente inclinado, con pendientes 3-12%, afectados por erosión hídrica laminar ligera y frecuente pedregosidad superficial; suelos moderadamente profundos a superficiales, bien drenados, de texturas finas a moderadamente finas, reacción neutra a medianamente alcalina y fertilidad alta.

Figura 3. Mapa de suelos de la cuenca del río Bogotá.

La asociación (MWV) *Typic Dystrustepts - Lithic Ustorthents*, se localiza en los municipios de **Anapoima, Apulo, La Mesa y Viotá**. Son suelos desarrollados a partir de rocas clásticas limo-arcillosas, en relieve moderadamente quebrado a moderadamente escarpado, con pendientes de 12 a 75%, afectados en sectores por erosión hídrica ligera y moderada; son suelos profundos a muy superficiales, bien drenados, con texturas medias a finas, reacción muy fuertemente ácida a neutra, saturación de aluminio mediana a alta y fertilidad moderada a baja.

La asociación (MMV) *Typic Haplustepts - Lithic Usthortents*, se encuentra en algunas zonas de los municipios de **Bojacá, Chocontá, Guasca, La Calera, Tocancipá, Zipaquirá**. Estos suelos tienen como material parental rocas clásticas limo-arcillosas y depósitos de cenizas volcánicas, y ocupan la posición geomorfológica de crestones, en relieve fuertemente quebrado a moderadamente escarpado, con pendientes de 25 a 75%, afectados en sectores por erosión hídrica moderada y severa; son suelos moderadamente profundos a superficiales, bien a excesivamente drenados, de texturas finas y reacción fuerte a ligeramente ácida.

La asociación (MQC) de suelos *Typic Udorthent - Typic Melanudands*, se ubica en los siguientes municipios dentro de la zona de estudio: **Cachipay, La Mesa, Mesitas del Colegio y Viotá**. Estos suelos se han desarrollado a partir de rocas clásticas limoarcillosas y mantos de cenizas volcánicas, se presentan en la posición de lomas en relieve ligera a moderadamente quebrado, con pendientes 7-12, 12-25 y 25-50%, afectados en sectores por frecuente pedregosidad superficial; son suelos profundos a muy superficiales, bien a moderadamente bien drenados, de texturas medias a finas, reacción muy fuertemente ácida a neutra, saturación de aluminio baja y fertilidad, en general, moderada.

La asociación (MLJ) de suelos *Typic Melanudands - Pachic Melanudands*, se encuentra en la jurisdicción de los municipios de **San Antonio del Tequendama, Guasca y Guatavita**. Estos suelos presentan evolución baja a moderada a partir de cenizas volcánicas y depósitos clásticos hidrogravigénicos, ocupan la posición de abanicos de carácter aluvial, en relieve ligera a fuertemente inclinado, con pendientes 3-12% y 12-25%, afectados por erosión hídrica laminar ligera; son suelos profundos a moderadamente profundos, bien a moderadamente bien drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas, reacción medianamente ácida, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada.

La asociación (MQV) *Typic Udorthents - Lithic Hapludolls - Humic Eutrudepts*, se localiza en los suelos de los municipios **Anolaima y La Mesa**. Estos suelos se han desarrollado a partir de rocas clásticas limoarcillosas y químicas carbonatadas, sobre crestones con relieve ligero a moderadamente escarpado, con pendientes de 25 a 75%, afectado en sectores por erosión hídrica laminar en grado ligero, presencia sectorizada de afloramientos rocosos; son suelos superficiales a profundos, bien drenados, con texturas finas a medias, reacción extremadamente ácida a medianamente alcalina, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada a alta.

2.6.2 Suelos del paisaje de planicie

Este paisaje se localiza en la planicie fluvio-lacustre originada en gran parte por la dinámica del río Bogotá y sus afluentes. Se encuentra en altitudes entre 2.000 y 3.000 m, en clima ambiental frío húmedo y seco, con temperaturas que varían entre 12 y 18 ° C.

La planicie está conformada por planos de inundación y terrazas, influenciados por depósitos de espesor variable de ceniza volcánica de diferente evolución y depósitos de sedimentos en su mayoría finos y medios, que han servido de material basal a partir del cual se han originado los suelos.

En los planos de inundación predominan los suelos de menor evolución (Entisoles “ents” e Inceptisoles “epts”), influenciados en algunos lugares por cenizas volcánicas. En las terrazas se observa un mayor desarrollo de los suelos (Inceptisoles “epts”, Andisoles “ands” y Alfisoles “alfs”), allí, el material de origen de los suelos (ceniza volcánica y depósitos clásticos hidrogénicos de origen lacustre y aluvial) y el clima, han dominado la génesis de los suelos. El relieve dominante es ligeramente plano a ligeramente ondulado, con pendientes que oscilan entre 1 y 7%.

Entre las unidades de suelos más importantes del paisaje de planicie, en la zona de estudio se encuentran (**Figura 3**):

Los suelos de la asociación (RMO, símbolo de la unidad cartográfica) *Aeric Epiaquepts - Fluvaquentic Endoaquepts*, se encuentran ubicados en la zona de estudio en algunos sectores de **Bogotá D.C. (Bosa)** y en los municipios de **Guasca, Sopó, Mosquera, Madrid, Soacha y Tocancipá**. Los suelos de esta unidad cartográfica ocupan la posición de los planos de inundación del río Bogotá o algunos de sus afluentes y se presentan en relieve ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes 1 a 5 %; son suelos muy superficiales, pobre a muy pobremente drenados, de texturas finas, reacción fuerte a medianamente ácida, saturación de aluminio media a baja y fertilidad moderada.

La asociación (RLO) *Typic Endoaquepts - Aeric Endoaquepts - Thaptic Hapludands*, incluye suelos en áreas de **Bogotá (Bosa, La Florida y Suba)** y en los municipios de **Cajicá, Cota, Chía, Facatativa, Funza, Mosquera, Sopó, Subachoque Tenjo y Zipaquirá**. Estos suelos ocupan la posición de planos de inundación dentro de la planicie fluvio lacustre, el relieve es ligeramente plano, con pendientes 1-3%; profundos a superficiales, bien a pobremente drenados, de texturas finas a medias, reacción extremada a medianamente ácida, saturación de aluminio media a baja y fertilidad moderada a baja.

El complejo (RMR) *Humic Dystrustepts - Typic Haplustalfs - Fluvaquentic Endoaquepts*, se localiza en las áreas de los municipios **Bojacá, Chocontá, Gachancipá, Nemocón, Sesquilé, Suesca Sopó y Tocancipá**. Esta unidad de suelos forma parte de las terrazas de la planicie fluvio-lacustre del río Bogotá, el relieve es ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes 1-7%; suelos profundos a superficiales, pobre a moderadamente bien drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas, reacción extremadamente ácida a neutra, saturación de aluminio media a baja y fertilidad moderada.

El complejo (RMQ) de los suelos *Pachic Haplustands - Humic Haplustands - Fluventic Dystrustepts*, se encuentra en los municipios de **Bojacá, Facatativa, Madrid, Mosquera, Soacha y Sopó**. Estos suelos se han desarrollado en su mayoría a partir de cenizas volcánicas y ocupan la posición de terrazas del río Bogotá o de sus afluentes, el relieve es ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes 1-7%; son suelos profundos a muy profundos, bien a moderadamente bien drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas, reacción mediana a ligeramente ácida y fertilidad moderada a alta.

El complejo (RLQ) *Pachic Melanudands - Andic Dystrudepts - Aeric Endoaquepts - Aquic Hapludands*, es una clase de suelos que se encuentran en los municipios **Cajicá, Cota, El Rosal, Facatativá, Madrid, Funza, Subachoque, Tabio, Tenjo y Zipaquirá**. Estos suelos ocupan la posición de terrazas del río Bogotá o sus afluentes, el relieve es ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes 1 a 7%; suelos profundos a moderadamente profundos, bien a imperfectamente drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas, reacción extremada a medianamente ácida, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada.

2.6.3 Suelos de paisaje de valle

Esta posición geomorfológica corresponde a la superficie fluvio-depositacional encajonada dentro de paisajes de relieves más altos, en forma de una faja alargada, angosta y paralela al cauce del río Magdalena al occidente del departamento. El clima ambiental es cálido húmedo y seco, con precipitación promedio anual entre 2.000 y 4.000 mm (cálido húmedo) y 1.000 a 2.000 mm (cálido seco) y temperaturas que superan los 24 °C.

Este paisaje presenta un material basal constituido por depósitos clásticos de carácter aluvial, que han dado origen a suelos baja a moderadamente evolucionados (Entisoles “ents”, Inceptisoles “epts”, Vertisoles “erts” y Molisoles “olls”), distribuidos en relieve ligeramente plano a ligeramente ondulado (pendientes 0-7%).

La asociación (VWO) de suelos *Typic Ustipsamments - Typic Calciusterts*, se encuentra principalmente en los municipios de **Agua de Dios, Girardot y Tocaima**. Estos suelos ocupan la posición de planos de inundación del río Bogotá o Magdalena, en relieve ligeramente plano, con pendientes 1-3%; son suelos superficiales a moderadamente profundos, bien a pobremente drenados, de texturas finas a gruesas, reacción neutra a medianamente alcalina y fertilidad moderada a alta.

2.7 CLIMA Y VEGETACIÓN

La zona que cubre la cuenca del río Bogotá presenta diversidad climática determinada por condiciones altitudinales, pluviometría y temperatura predominantes (CAR, 2000). La región que presenta los registros más bajos de precipitación en el departamento de Cundinamarca, se encuentra en el altiplano Cundinamarqués desde Villapinzón hasta las proximidades a Usme, con precipitaciones menores de 1.000 mm/año. La zona más seca se

localiza en el municipio de Madrid, en donde se reportan precipitaciones promedio de 600 mm/año.

El piso térmico predominante es el *frío y seco* con temperaturas entre 12 y 18° C y precipitación promedio entre 500 y 1.000 mm/año, se extiende desde los 2.000 hasta los 3.000 msnm y se localiza en el altiplano de Bogotá y en las partes altas de los flancos cordilleranos. Los municipios que presentan este clima son Bogotá, Bojacá, Cajicá, Cogua, Cota, Chía, Chocontá, Facatativá, Funza, Guatavita, La Calera, Madrid, Mosquera, Nemocón, Sesquilé, Sibaté, Soacha, Sopó, Subachoque, Suesca, Tabio, Villapinzón.

El piso térmico *frío y húmedo* se presenta con temperaturas promedio entre 12 y 18° C, lluvias entre 1.000 y 2.000 mm/año y altitudes comprendidas entre 2.000 y 3.000 msnm. Se presenta en los municipios de Gachancipá, Tenjo y Zipaquirá.

El piso térmico *medio y húmedo* se caracteriza por presentar temperaturas entre 18 y 24° C, lluvias entre 1.000 y 2.000 mm/año y altitudes comprendidas entre 1.000 y 2.000 msnm. Esta zona climática se presenta en los municipios de Anolaima, Cachipay, La Mesa, La Peña, San Antonio de Tequendama y Tena.

El piso térmico *cálido y seco* se encuentra en altitudes menores de 1.000 msnm, tiene temperaturas promedio mayores de 24° C y precipitaciones entre 1.000 y 2.000 mm/año. Se encuentra en los municipios Agua de Dios, Anapoima, Apulo, El Colegio, Girardot, Tocaima y Viotá.

El piso térmico *muy frío y húmedo*, esta en la franja climática con temperaturas entre 8 y 12 ° C, con precipitaciones anuales entre 500 y 1.000 mm y altitudes entre 3.000 y 3.500 msnm. Este clima se presenta en las zonas montañosas de los municipios Guatavita y Sesquilé y en los lomeríos de la Sabana de Bogotá.

El piso térmico *muy frío y muy húmedo*, ubicado entre las cotas 3.000 y 3.500 m, con temperaturas entre 8 a 12° C y precipitaciones entre 1.000 y 2.000 mm anuales. Se encuentra en algunos sectores de Guasca.

La variabilidad climática permite la generación de diferentes clases de especies florísticas; sin embargo, la expansión agrícola ha alterado los ecosistemas y causado pérdida de la biodiversidad natural.

Las formaciones vegetales de acuerdo con el sistema de Holdridge adaptado a condiciones climáticas de Colombia (IGAC, 2000), se describen a continuación:

Bosque seco montano bajo (bs-MB): Esta formación vegetal se encuentra ubicada en la altiplanicie de la Sabana de Bogotá, desde Soacha hasta Gachancipá, en una extensa área entre los municipios Bogotá, Bojacá, Cajicá, Cogua, Cota, Chía, Facatativá, Funza, Guatavita, La Calera, Madrid, Mosquera, Nemocón, Sesquilé, Sibaté, Soacha, Sopó, Subachoque y Tabio. Esta formación se caracteriza climáticamente por presentar biotemperaturas medias entre 12 y 18° C y lluvias inferiores a 1.000 mm/año. Una segunda

área se encuentra localizada en parte de los municipios de Villapinzón, Chocontá y Suesca, ocupa una franja altitudinal que va desde los 2.000 hasta los 3.000 msnm. La evapotranspiración promedio anual en esta zona oscila entre 650 y 690 mm.

Los bosques de esta formación han desaparecido casi en su totalidad y han sido reemplazados por cultivos agrícolas y ganadería semi-intensiva especialmente en las sabanas antes mencionadas. Solamente se encuentran especies pertenecientes al bosque secundario y algunas especies introducidas de coníferas y eucaliptos diseminadas en la zona.

Bosque húmedo premontano (bh-PM): Formación vegetal que se encuentra condicionada a una biotemperatura media entre 18 y 24° C, con un promedio anual de lluvias de 1.000 a 2.000 mm, una altitud de 900 hasta 2.100 msnm y una evapo-transpiración potencial promedio de 865 mm/año.

Esta formación se presenta en las áreas que corresponden a los municipios de Anolaima, Cachipay, La Mesa, La Peña, San Antonio de Tequendama y Tena. Sobre esta formación se desarrolla un bosque secundario fuertemente intervenido, que ha sido reemplazado por la agricultura, especialmente por cultivos de frutales y café.

Bosque húmedo montano bajo (bh-MB): En esta formación se presenta un clima caracterizado por una biotemperatura media de 12 a 18° C, una precipitación entre 1.000 y 2.000 mm/año y altitudes entre 1800 y 2800 msnm. Geográficamente se localiza en los alrededores del embalse del Muña, desde Sibaté en una franja estrecha que bordea los cerros, hasta Facatativá en dirección a Subachoque, Zipaquirá y parte de Gachancipá.

Bosque húmedo montano (bh-M): Se caracteriza por precipitaciones de 500 a 1.000 mm/año y biotemperatura media entre 6 y 12°C, se distribuye en la Sabana de Bogotá haciendo parte de los cerros Pan de Azúcar y Covadonga en Villapinzón, la serranía de La Cuchilla, en Lenguaque el cerro La Senda, en Monserrate y en Guadalupe, además en un amplio sector que circunda el embalse del Neusa. Esta zona presenta una cobertura vegetal conformada por árboles de poca talla, acompañada de vegetación arbustiva y graminoide. Algunas áreas están dedicadas a cultivos de cebada, papa, arveja, maíz y haba.

Bosque seco tropical (bs-T): Esta formación vegetal presenta biotemperatura media superior a 24° C, promedio anual de lluvias entre 1000 y 2000 mm y altitud hasta de 1100 m. La evapotranspiración potencial promedio es de 920 mm, considerada alta. Abarca la zona extrema de la cuenca baja del río Bogotá, entre los municipios de Tocaima, Agua de Dios, Ricaurte y Girardot. Los bosques considerados como de los más ricos en maderas finas, han desaparecido casi en su totalidad, por la tala, puesto que estos suelos se consideran con buenas condiciones para la agricultura y la ganadería.

3. METODOLOGIA

Las metodologías utilizadas en el estudio de procesos geoquímicos ambientales en suelos de la cuenca del río Bogotá están basadas en las recomendaciones para muestreo geoquímico del Programa Internacional de Correlación Geológica (IGCP) proyecto 259/360 y en protocolos publicados por diversos servicios geológicos del mundo (Darnley y otros, 1995; Salminen y otros, 1998) los cuáles han sido adaptados y estandarizados por INGEOMINAS para muestreo de suelos.

3.1 METODOLOGIA DE MUESTREO

En éste aparte se presentan las consideraciones generales sobre diseño, tipo de muestras, procedimientos y precauciones que se tomaron durante el muestreo. Los protocolos y estándares para la recolección de muestras y la toma de información en campo se encuentran detallados en la norma INGEOMINAS para Muestreo de Suelos para Estudio de Procesos Geoquímicos (Prieto y otros, 2003).

3.1.1 Principios y definiciones

El suelo es un medio poroso, estructurado y biológicamente activo que cubre la superficie continental de la tierra, el cuál ha sido generado y modificado por procesos de meteorización de sus materiales parentales y por actividades antrópicas.

En el proceso de génesis de suelo ocurre la diferenciación de horizontes, cada uno de los cuáles forma una capa aproximadamente paralela a la superficie, que difiere de las capas adyacentes genéticamente relacionadas, por su color, textura y estructura, entre otras propiedades. La secuencia de horizontes desde la superficie hasta el horizonte más profundo, se denomina con las letras A, B y C y constituye el perfil del suelo. La roca o material parental se denomina generalmente horizonte R.

3.1.2 Diseño de muestreo

El diseño de muestreo se realizó con base en una red bidimensional, para lo cual se tomó como referencia la base cartográfica del IGAC, se seleccionó el área correspondiente a la cuenca del río Bogotá y se dividió esta región en celdas de 5 x 5 km. La densidad de muestreo resultante corresponde a una muestra por cada 25 km². En cada subcelda de 5 x 5 km se localizó un punto de muestreo y adicionalmente se ubicó un punto por cada 10 x 10 km para tomar duplicados de celda (**Figura 4**).

Los puntos de muestreo se localizaron aleatoriamente sobre la red bidimensional, pero fueron considerados aspectos como usos del suelo e influencia del río Bogotá o de sus tributarios. Todos los puntos de muestreo se georeferenciaron haciendo uso de planchas cartográficas (escala 1:25.000) y aparatos GPS (*Global positioning system*).

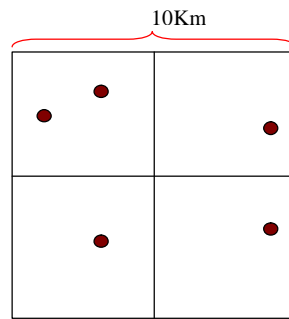


Figura 4. Diseño de Muestreo

3.1.3 Tipo de muestras

En cada punto de muestreo se colectaron los siguientes tipos de muestras de suelo:

- ? Una muestra de suelo superficial – horizonte A.
- ? Una muestra de suelo profundo – horizonte C.
- ? Opcionalmente, en donde fue posible, se colectó una muestra de suelo del horizonte B.
- ? Por cada 10 x 10 km, se tomó una muestra como duplicado de celda.
- ? En el 3% de los sitios de muestreo se colectaron duplicados de muestra.

3.1.4 Identificación de las muestras

Cada muestra se identificó con un código que tiene en cuenta escala de trabajo, plancha cartográfica, celdas de muestreo y tipo de muestra. Los detalles de la codificación aparecen en la “Norma para Muestreo de Suelos para Estudio de Procesos Geoquímicos” (INGEOMINAS, 2003).

3.1.5 Precauciones generales durante el muestreo

Para garantizar integridad y no contaminación de las muestras colectadas, durante el muestreo se observaron medidas de precaución, tales como:

- ? Ubicación de los sitios de muestreo lejos de fuentes evidentes de contaminación por actividades antrópicas y a mínimo 50 m de carreteras.
- ? Uso de equipos y herramientas de muestreo de plástico, madera (sin pintura) o acero inoxidable de alta calidad.

- ? Uso de guantes plásticos para manipular las muestras y no uso de joyas durante el muestreo.
- ? Abstenerse de fumar durante la colecta de la muestra y no ubicar vehículos en funcionamiento cerca al sitio de muestreo.
- ? Limpieza cuidadosa de los equipos de muestreo una vez terminada la recolección de cada muestra.

3.1.6 Recolección de muestras y mediciones de campo

- ? La recolección de muestras estuvo acompañada de levantamiento de información observada y medida en campo, la cuál se registró en el formato suministrado para “Captura de Información en Campo para Estudio de Procesos Geoquímicos en Suelos” (Prieto y otros, 2003). La información de campo relacionada con el sitio de muestreo, incluyó condiciones climáticas, paisaje, uso de suelo, vegetación y actividades antrópicas, entre otras.
- ? En campo y siguiendo protocolos estándar (IGAC, 1990) se determinaron en las muestras colectadas, propiedades fisicoquímicas tales como pH, color, textura, estructura, prueba de minerales amorfos con NaF y reacción al HCl - carbonatos.

3.1.7 Control de muestreo

- ? Como control de muestreo se tomaron muestras duplicados (duplicado de muestra) en el 3% del total de los sitios en que se recolectaron muestras de suelo.
- ? Tomando como referencia la red de celdas de 5 x 5 km, se seleccionó, cada 10 x 10 km, un sitio adicional para recolectar muestras que representan duplicados de celda.

3.1.8 Documentación fotográfica

En cada sitio de muestreo se tomaron, por lo menos dos fotografías, la primera para mostrar el paisaje o las condiciones existentes en las cercanías del sitio de muestreo y la segunda para visualizar algunas características físicas (estructura, textura, color, límites, etc.) de los horizontes del suelo. En el caso de las muestras extraídas con barreno tipo *auger* se tomaron fotografías del perfil “reconstruido” sobre el material plástico.

Se registró la numeración de cada foto en el formato de captura de Información en campo para estudios de procesos geoquímicos en suelos.

En algunos sitios, en donde se consideró necesario, por existir rasgos geomorfológicos, geológicos o texturales de interés, se tomaron fotografías adicionales.

3.1.9 Preservación y envío de las muestras

Las muestras de suelos debidamente rotuladas y empacadas, es decir con su identificación y dentro de doble envoltura plástica, colocadas en cajas de plástico o madera

convenientemente identificadas se remitieron a la mayor brevedad posible a los laboratorios del INGEOMINAS para su preparación y análisis.

3.2 METODOLOGIA ANALITICA

Las muestras de suelo recolectadas fueron recibidas en los laboratorios de INGEOMINAS, en donde fueron preparadas siguiendo el procedimiento establecido para preparación de muestras de suelos para estudio de procesos geoquímicos (Prieto y otros, 2003) y posteriormente fueron transferidas para análisis químico en los laboratorios de INGEOMINAS y en *Activation Laboratories* de Canadá.

3.2.1 Preparación de las muestras

El proceso de preparación incluyó verificación de la identificación, organización y extracción de las muestras, secado a $T < 40^{\circ} \text{C}$, desintegración manual en caso de aglomeración, tamizado por tamiz de nylon de malla # 10, homogenización manual, cuarteo y pesada de 100g de muestra que finalmente se sometió en su totalidad a pulverización en mortero de ágata (150 μ - malla # 100, serie *Tyler* – ASTM-11-70).

La muestra pulverizada se empacó y envió a los laboratorios de INGEOMINAS y a *Activation Laboratories* de Canadá, en donde se efectuaron los análisis requeridos.

Para preservar las muestras y evitar su contaminación, se guardaron precauciones similares a las observadas en la etapa de muestreo.

En INGEOMINAS se archivaron testigos de muestreo (muestras sin preparar) y testigos de preparación (muestras ya preparadas).

3.2.2 Análisis químico

Para el análisis químico de las muestras se seleccionaron metodologías que permitieron cuantificar los elementos de interés con bajos límites de detección, de tal modo que se obtuvieron valores en un buen porcentaje de muestras analizadas, mayor a un 80%, en la mayoría de los casos, excepto para Cd (50%) y Mo (77%).

En los laboratorios de INGEOMINAS se determinaron los contenidos seudo-totales de los elementos Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu y Ni, mediante digestión ácida (agua regia y multiácido: HF, HNO₃, HCl y HClO₄ según el elemento) en digestor de microondas y cuantificación por espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma acoplado ICP-AES (Tabla 6).

En los laboratorios *Activation Laboratories Ltd* de Canadá se determinaron contenidos totales de 48 elementos utilizando según el elemento, análisis por activación neutrónica (INAA) o digestión ácida (multiácido) y cuantificación por espectrometría de emisión atómica con fuente acoplada de plasma (ICP-AES) (Tabla 7).

Tabla 6. Elementos analizados en laboratorios de Ingeominas y límites de detección

Elementos analizados por ICP-AES					
Elemento	LD	Elemento	LD	Elemento	LD
As	0,5 ppm	Cu	1 ppm	Ni	1 ppm
Cd	0,3 ppm	Mn	1 ppm	Zn	1 ppm
Co	1 ppm	Mo	1 ppm	Pb	3 ppm
Cr	5 ppm				

*LD: Límite de detección

Tabla 7. Elementos analizados en *Activation Laboratories* y límites de detección

Elementos analizados por INAA					
Elemento	LD	Elemento	LD	Elemento	LD
Au	2 ppb	Hf	1 ppm	Se	3 ppm
As	0,5 ppm	Hg	1 ppm	Sm	0,1 ppm
Ba	50 ppm	Ir	5 ppb	Sn	0,01%
Br	0,5 ppm	La	0,5 ppm	Ta	0,5 ppm
Ce	3 ppm	Lu	0,05 ppm	Th	0,2 ppm
Co	1 ppm	Na	0,01%	Tb	0,5 ppm
Cr	5 ppm	Nd	5 ppm	U	0,5 ppm
Cs	1 ppm	Rb	5 ppm	W	1 ppm
Eu	0,2 ppm	Sb	0,1 ppm	Yb	0,2 ppm
Fe	0,01%	Sc	0,1 ppm		
Elementos analizados por ICP-AES					
Ag	0,5 ppm	K	0,01 %	Pb	3 ppm
Al	0,01 %	Mg	0,01 %	Sr	1 ppm
Be	2 ppm	Mn	1 ppm	Ti	0,01 %
Bi	5 ppm	Mo	1 ppm	V	2 ppm
Ca	0,01 %	Ni	1 ppm	Y	2 ppm
Cd	0,3 ppm	P	0,001 %	Zn	1 ppm
Cu	1 ppm				

3.2.3 Control de calidad analítica

La calidad analítica se controló mediante uso de patrones primarios y secundarios (exactitud) y por análisis duplicados (precisión), como parte de programas de control de calidad establecidos por los dos laboratorios que realizaron los análisis requeridos.

3.3 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos obtenidos en los suelos analizados fueron organizados en Excel para su posterior ingreso a la base de datos de geoquímica.

Con el fin de obtener un mayor cubrimiento geográfico y para aprovechar información existente, se incorporaron al análisis algunos datos obtenidos con la misma metodología en proyectos y muestreos adelantados con anterioridad en localidades de la Sabana de Bogotá (González y Vargas, 1998).

Con fines comparativos y como complemento de la información obtenida en suelos se revisaron algunos datos de metales en aguas de la Sabana, los cuáles habían sido obtenidos en cartografía geoquímica de baja densidad adelantada en las planchas 5-09 y 209 (Vargas y Otros, 2001; INGEOMINAS, 2004)

3.3.1 Tratamiento estadístico

Todos los datos fueron procesados y analizados usando el software estadístico SPSS, tomando como referencia la metodología establecida para tratamiento de datos geoquímicos por el proyecto Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica del Territorio, (González y García, 2001), la cuál se puede resumir en las siguientes etapas:

- ? *Transformación de datos:* Los datos que se presentaron con valores de concentración menores al límite de detección (por ejemplo, molibdeno menor que 1 mg/kg y representado como -1) fueron reemplazados por valores iguales a la mitad del límite de detección, tal y como se ha recomendado y aplicado en diferentes estudios geoquímicos (Reimann y otros, 1998). Lo anterior es necesario dado que si no se incluyen estos datos en el tratamiento estadístico, se produce sobre-estimación de parámetros como la media y la mediana. El mismo procedimiento se usa para la producción de mapas de distribución espacial y para apreciar la distribución de los datos en las curvas de frecuencia acumulativa.
- ? *Análisis descriptivo y exploratorio.* Con el fin de conocer la distribución de los datos de concentración de los elementos analizados, se realizó análisis descriptivo y exploratorio. Se calcularon estadísticas para identificar la tendencia central de los datos, medida de dispersión y medidas de distribución.
- ? *Cálculo de correlaciones bivariadas, análisis de factores y conglomerados jerárquicos.* Con los datos transformados a logaritmo, se efectuaron cálculos de correlación entre los elementos, se calcularon correlaciones bivariadas y se ejecutó análisis de factores y conglomerados jerárquicos. Las correlaciones se evaluaron con el método de Pearson. El análisis de factores se desarrolló usando componentes principales y rotación Varimax. El análisis de conglomerados se usó como otro camino para encontrar relaciones entre elementos; se utilizó el método de conglomerados jerárquicos intergrupos usando coeficientes de correlación para agrupar las variables (elementos) en grupos y para la interpretación de éste análisis se usó diagramas de ténpanos vertical y dendogramas.

3.3.2 Elaboración de mapas

La producción de mapas se adelantó siguiendo estándares desarrollados por el proyecto “Compilación y Levantamiento de Información Geoquímica del Territorio” (González y García, 2001; Vargas y otros, 2001), y tomando en cuenta las recomendaciones de los servicios geológicos participantes en el programa de mapeo geoquímico global (Reimman y otros, 1998).

3.3.2.1 Mapas de distribución puntual

Los mapas de puntos representan una clasificación de los valores de concentración encontradas en las muestras en la zona de estudio. La clasificación se realizó con base en los percentiles, los cuales son rangos de concentración que dividen el grupo de datos de acuerdo al porcentaje de casos en los que se presentan.

En general, se usaron los siguientes rangos: primero (valor mínimo a percentil 25%); segundo (percentil 25 a 50%); tercero: (percentil 50 a 75%); cuarto: (percentil 75 a 90%); quinto: (percentil 90% a valor máximo).

El valor se representa gráficamente en el mapa con un círculo que va aumentando de tamaño a medida que aumenta el rango de concentración en el cual se encuentra. En cada mapa se muestra la distribución de los datos por medio del histograma y se registran los datos de media, mediana y desviación estándar.

Para la elaboración de estos mapas se utilizó software ARC-INFO, ARC-GIS, y AUTOCAD; y las bases cartográficas del DANE, IGAC e INGEOMINAS.

3.3.2.2 Mapas de distribución espacial

Los mapas de distribución espacial muestran áreas de concentración de los diferentes elementos, a partir de cálculos de interpolación geoestadística de los datos.

El proceso geoestadístico es un procedimiento que se desarrolló en dos etapas principales: En la primera etapa se calculó el variograma experimental, que describe la relación espacial entre las muestras y se ajustó a un modelo matemático (por ejemplo, esférico, exponencial, *gaussiano*, anidado entre otros). La segunda etapa consistió en la estimación de valores de concentración de los elementos en celdas de 2 x 2 km a partir de datos obtenidos en los suelos muestreados dentro de las celdas de 5 x 5 km, usando el método de interpolación denominado krigeaje, en el cual se tiene en cuenta la interdependencia de los datos de concentración expresada en el variograma y la estimación de cada punto estimado se basa en todos los “pesos” del valor de concentración alrededor de él.

Los variogramas experimentales fueron estimados, ajustados y validados usando el programa Isatis. La interpolación de los datos se realizó en SURFER, usando los

parámetros del modelo ajustado del variograma y a partir de éstos se definieron las áreas, limitadas por isolíneas, de los valores interpolados.

La elaboración gráfica del mapa se realizó en ARC-GIS usando una imagen *raster* obtenida a partir de la información generada en SURFER. La leyenda geoquímica corresponde a una gama de colores entre el azul (valores más bajos) y el rojo (valores más altos), que indican la distribución espacial del elemento dentro del área de estudio. En cada mapa se incluyó el variograma ajustado y el mapa del error relativo del kriging.

4. RESULTADOS

En éste capítulo se presenta la información obtenida siguiendo la metodología detallada en el capítulo 3 de éste informe, esta contempla condiciones del sitio de muestreo y su entorno, mediciones obtenidas en campo y mediciones efectuadas en laboratorio en las muestras de suelos.

4.1 INFORMACIÓN DE CAMPO

Para el análisis de información se incluyeron los datos de campo obtenidos en las campañas de muestreo adelantadas durante el año 2003 y adicionalmente se complementó con datos obtenidos en campañas de muestreo realizadas por INGEOMINAS en proyectos de estudio de procesos geoquímicos en suelos de la Sabana de Bogotá entre 1995 y 1997, (González y otros, 1998).

La información, revisada, estandarizada y complementada para cada sitio de muestreo se incluyó en la base de datos geoquímicos y la síntesis de las características principales de los sitios de muestreo y de las muestras colectadas, se presenta en el **Anexo 1**.

Cada sitio de muestreo fue ubicado sobre los mapas de clasificación de suelos, a escala 1:100.000 (IGAC, 2000) y la localización de tales sitios se presenta en la **Figura 5**.

4.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS QUIMICOS EN LABORATORIO

Los resultados del análisis químico para los elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn en las muestras de suelos, horizonte A, que serán discutidos en este informe, se incluyen en el **Anexo 2**.

4.3 ANALISIS ESTADISTICO E INTERPRETACIÓN

En la **Tabla 8** se presentan las medidas de tendencia central de los datos: media y mediana, medida de dispersión (desviación típica) y medidas de distribución (asimetría y curtosis).

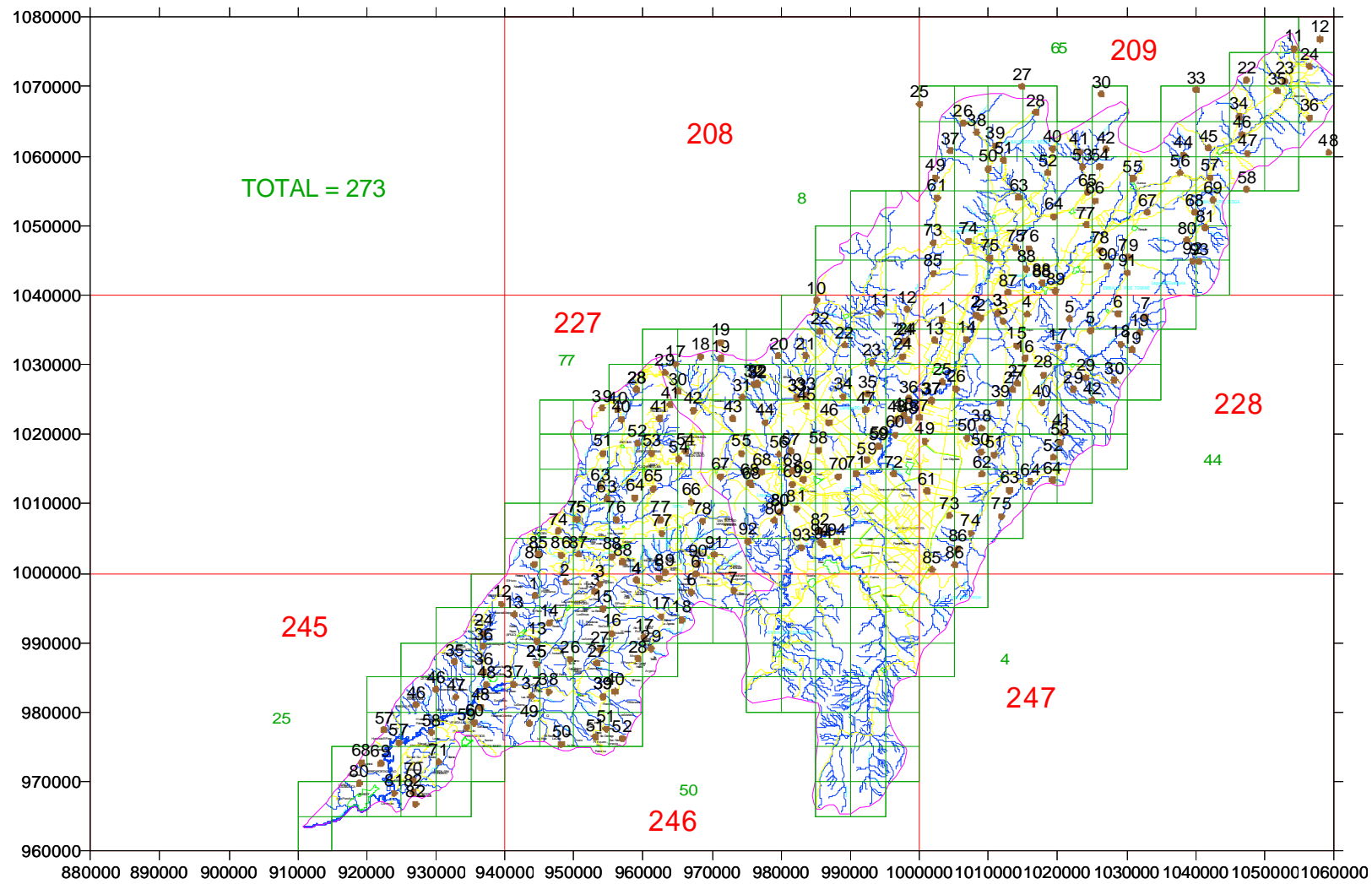


Figura 5. Mapa de ubicación de sitios de muestreo.

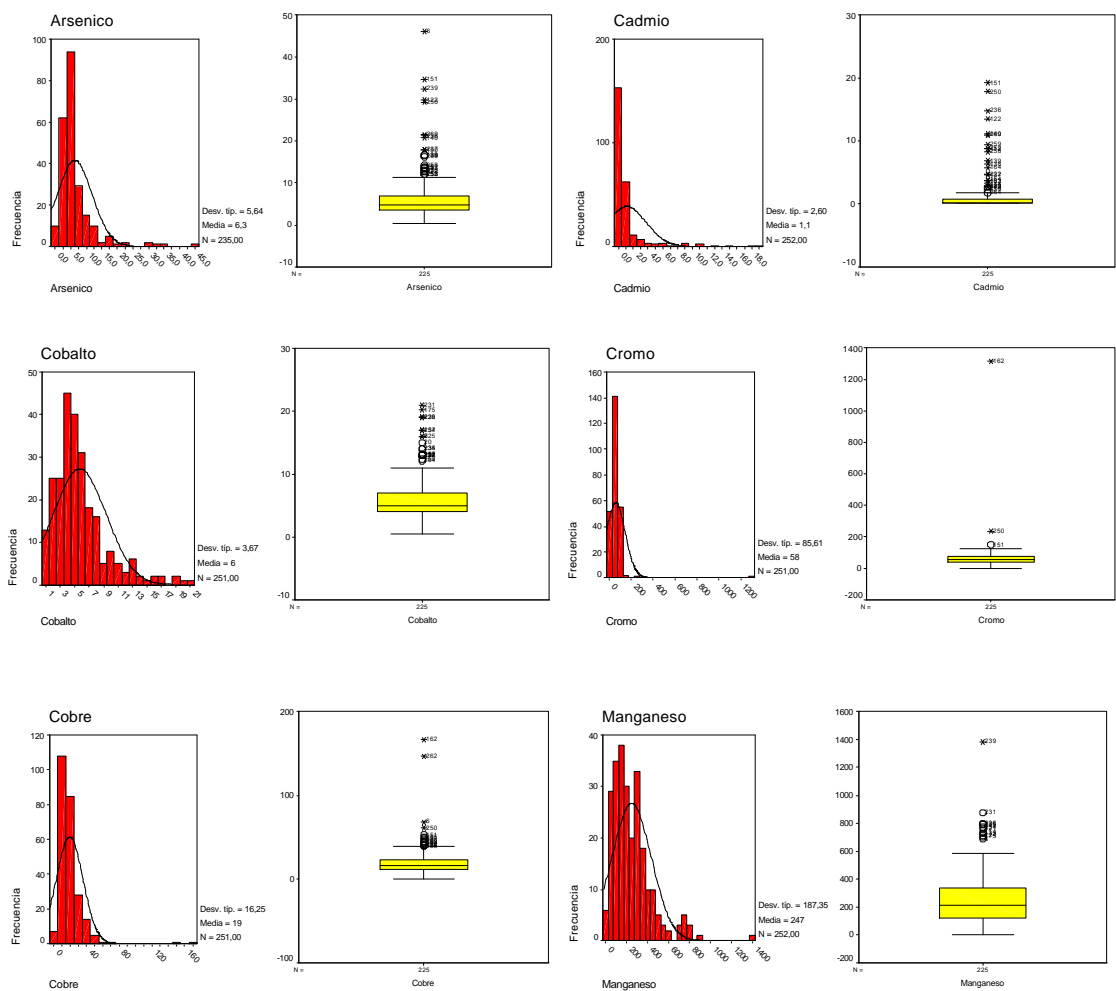
Tabla 8. Resumen de parámetros estadísticos de los elementos analizados

		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
N	Válidos	228	245	244	244	244	245	231	244	245	244
	Perdidos	38	21	22	22	22	21	35	22	21	22
Media		6,2	1,2	6	58	19	247	5	22	23	103
Error típico de la media		0,3	0,2	0	6	1	12	1	2	1	8
Mediana		4,8	0,3	5	51	16	198	2	15	21	65
Moda *		3,5	0,2	4	61	1	1	1	1	2	100
Desviación típica.		5,1	2,6	4	87	16	187	10	26	15	124
Varianza		25,6	7,0	13	7523	261	34879	100	660	240	15335
Asimetría		2,8	4,3	2	13	5	2	6	4	4	3
Error típico de asimetría		0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0
Curtosis		10,6	21,0	3	182	43	6	43	17	33	12
Error típico de curtosis		0,3	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0
Rango		34,3	19,1	21	1310	166	1383	97	188	167	750
Mínimo		0,3	0,2	1	3	1	1	1	1	1	3
Máximo		34,6	19,2	21	1313	166	1383	97	189	168	753
Suma		1412,8	286,6	1402	14231	4726	60596	1080	5367	5609	25072
Percentiles	25	3,5	0,2	4	33	11	114	1	10	15	46
	50	4,8	0,3	5	51	16	198	2	15	21	65
	75	6,8	0,8	7	73	22	323	4	23	28	106
	90	12,0	2,7	10	99	33	463	6	38	37	177
	95	16,5	6,3	13	111	41	666	19	67	45	374
	98	24,7	11,3	17	125	50	789	35	131	62	666

* Existen varias modas. Se muestra el menor de los valores.

Las estimaciones de media y mediana difieren entre sí, para todos los elementos con excepción de Co y Pb, lo que indica que la distribución de los datos para la mayoría de los elementos es asimétrica. La medida de asimetría muestra valores altos para As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn, que tienen una distribución con una larga cola hacia la derecha, propia de distribuciones asimétricas y con valores de concentración alejados y muy altos. Los valores de asimetría, junto con valores de media más altos que los de la mediana, aumentan la estimación de la desviación típica, a tal grado que ésta ya no es útil como una medida de dispersión de los datos. Los valores altos de curtosis para los elementos As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn muestran que la distribución es más puntiaguda que la de una distribución normal.

Los histogramas y los diagramas de caja de la **Figura 6** permiten visualizar estos mismos estadísticos en forma resumida:



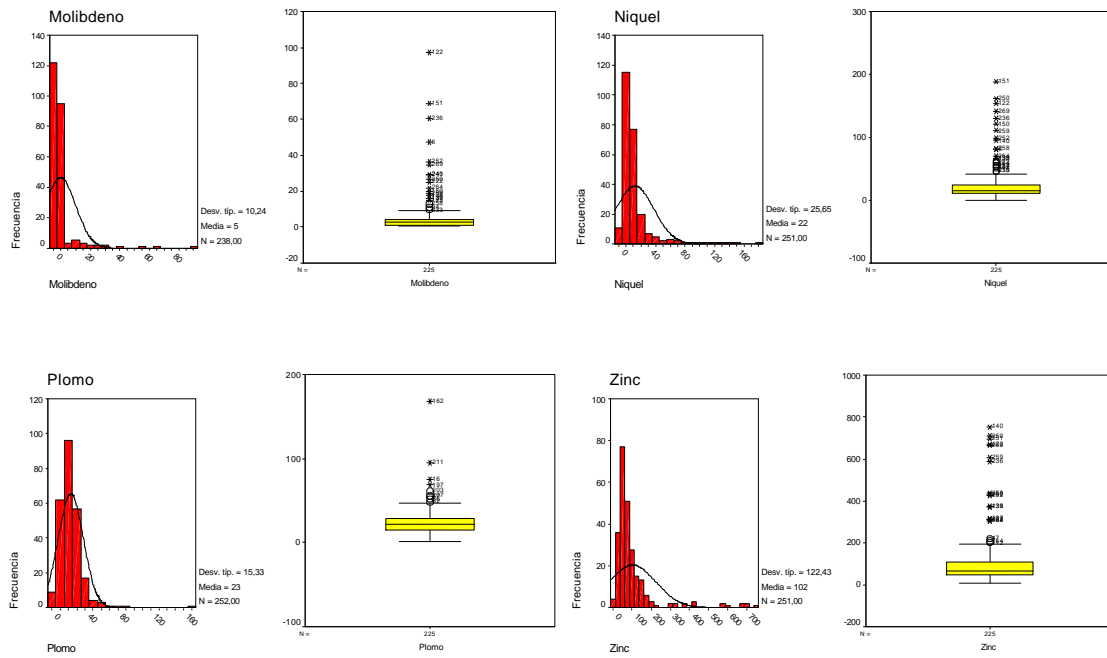


Figura 6. Histogramas y diagramas de caja de los elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn.

La descripción estadística indica que en los suelos muestreados a lo largo de la cuenca del río Bogotá, existe alta variabilidad espacial en la concentración de los elementos, con algunos valores alejados de la distribución general de los datos.

Los gráficos de dispersión a lo largo de los ejes de coordenadas norte y este de la **Figura 7**, muestran la alta dispersión de las concentraciones de Cr, Mn y Zn, algunas de las cuáles están alejadas del conjunto de datos. Al sur occidente de la zona de estudio, se presenta un valor muy alto de Cr, así como las más altas concentraciones de Zn. No existe una tendencia general en ninguna de las dos direcciones (occidente-oriente o norte-sur).

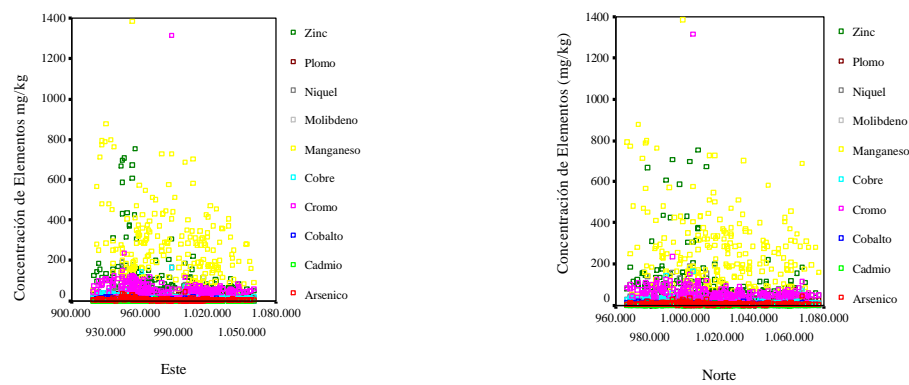


Figura 7. Gráficos de dispersión a lo largo de las coordenadas este y norte.

La **Tabla 8**, muestra los percentiles de los datos de los elementos, es decir los valores de concentración de los elementos que dividen los datos en grupos, de forma que un porcentaje de los casos se encuentra por debajo del percentil dado. Con los rangos proporcionados por estos percentiles se elaboraron los mapas de distribución de concentración puntual de los elementos.

Se buscaron relaciones entre los elementos por medio de correlaciones bi-variadas, análisis de factores y análisis de conglomerados jerárquicos.

Las correlaciones, entre pares de elementos o bivariadas encontradas indican la existencia de relaciones positivas y muy significativas entre las variables As-Cd, As-Cr, As-Mo, As-Ni, As-Zn, Cd-Mo, Cd-Ni, Cd-Zn, Co-Mn, Mo-Ni, Mo-Zn, Ni-Zn (**Tabla 9**). Las correlaciones significativas se indican en la tabla con los colores azul y verde, las más altas corresponden al color azul. Por ejemplo, la correlación Ni-Zn, que es altamente significativa, indica que al aumentar la concentración de níquel también aumenta la concentración de cinc y viceversa.

Se usó el análisis de factores como otro mecanismo para examinar relaciones entre las variables a través de un modelo teórico. Se utilizó análisis de componentes principales como método para extracción de factores y se realizó rotación *Varimax* para hacer más fácil la interpretación de la matriz de componentes.

En el primer paso de análisis de factores se realizó la extracción de las comunalidades por componentes principales (**Tabla 10**), las cuales son estimativas de la varianza.

En la **Tabla 11** se muestran los componentes encontrados y la varianza explicada, en este caso se encuentra que los primeros tres componentes explican el 79% de la variabilidad de las 10 variables estudiadas.

Tabla 9. Correlaciones bivariadas entre los elementos

		Arsénico	Cadmio	Cobalto	Cromo	Cobre	Manganeso	Molibdeno	Níquel	Plomo	Zinc
Arsénico	Correlación de Pearson	1	,665(**)	,336(**)	,681(**)	,300(**)	,061	,704(**)	,794(**)	,041	,786(**)
	Sig. (bilateral)	.	,000	,000	,000	,000	,361	,000	,000	,542	,000
	N	228	227	227	226	226	227	220	226	227	226
Cadmio	Correlación de Pearson	,665(**)	1	,133(*)	,426(**)	,311(**)	-,046	,756(**)	,859(**)	-,040	,887(**)
	Sig. (bilateral)	,000	.	,039	,000	,000	,472	,000	,000	,532	,000
	N	227	245	243	242	244	245	231	244	245	244
Cobalto	Correlación de Pearson	,336(**)	,133(*)	1	,385(**)	,279(**)	,707(**)	,061	,309(**)	,047	,287(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,039	.	,000	,000	,000	,355	,000	,470	,000
	N	227	243	244	242	242	243	229	242	243	242
Cromo	Correlación de Pearson	,681(**)	,426(**)	,385(**)	1	,383(**)	,060	,509(**)	,671(**)	,176(**)	,593(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	.	,000	,354	,000	,000	,006	,000
	N	226	242	242	243	242	242	228	242	242	242
Cobre	Correlación de Pearson	,300(**)	,311(**)	,279(**)	,383(**)	1	,239(**)	,223(**)	,416(**)	,396(**)	,413(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	.	,000	,001	,000	,000	,000
	N	226	244	242	242	244	244	230	244	244	244
Manganeso	Correlación de Pearson	,061	-,046	,707(**)	,060	,239(**)	1	-,156(*)	,007	,029	,032
	Sig. (bilateral)	,361	,472	,000	,354	,000	.	,017	,914	,649	,618
	N	227	245	243	242	244	245	231	244	245	244

Tabla 9. Correlaciones bi-variadas entre los elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn (continuación)

		Arsénico	Cadmio	Cobalto	Cromo	Cobre	Manganeso	Molibdeno	Níquel	Plomo	Zinc
Molibdeno	Correlación de Pearson	,704(**)	,756(**)	,061	,509(**)	,223(**)	-,156(*)	1	,812(**)	-,009	,746(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,355	,000	,001	,017	.	,000	,895	,000
	N	220	231	229	228	230	231	231	230	231	230
Níquel	Correlación de Pearson	,794(**)	,859(**)	,309(**)	,671(**)	,416(**)	,007	,812(**)	1	-,005	,908(**)
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	,914	,000	.	,939	,000
	N	226	244	242	242	244	244	230	244	244	244
Plomo	Correlación de Pearson	,041	-,040	,047	,176(**)	,396(**)	,029	-,009	-,005	1	,087
	Sig. (bilateral)	,542	,532	,470	,006	,000	,649	,895	,939	.	,174
	N	227	245	243	242	244	245	231	244	245	244
Zinc	Correlación de Pearson	,786(**)	,887(**)	,287(**)	,593(**)	,413(**)	,032	,746(**)	,908(**)	,087	1
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	,618	,000	,000	,174	.
	N	226	244	242	242	244	244	230	244	244	244

Tabla 10. Extracción de comunalidades por componentes principales

	Inicial	Extracción
Arsénico	1,000	,802
Cadmio	1,000	,844
Cobalto	1,000	,848
Cromo	1,000	,631
Cobre	1,000	,429
Manganeso	1,000	,845
Molibdeno	1,000	,784
Níquel	1,000	,952
Plomo	1,000	,918
Zinc	1,000	,908

Tabla 11. Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	5,030	50,302	50,302	5,030	50,302	50,302	4,894	48,936	48,936
2	1,833	18,330	68,631	1,833	18,330	68,631	1,967	19,672	68,608
3	1,099	10,987	79,618	1,099	10,987	79,618	1,101	11,010	79,618
4	,666	6,665	86,283						
5	,547	5,473	91,756						
6	,281	2,815	94,570						
7	,225	2,252	96,822						
8	,203	2,033	98,854						
9	,074	,740	99,594						
10	,041	,406	100,000						

Para lograr una buena solución del análisis de factores, se recurrió al gráfico de sedimentación **Figura 8**. Para decidir el número de factores adecuado, se trazaron dos líneas pendientes de la curva y el punto de intersección indica que los factores que reúnen en su mayoría las variables estudiadas son los dos primeros y probablemente el tercero; los demás contribuyen relativamente poco a la solución y no se toman en cuenta.

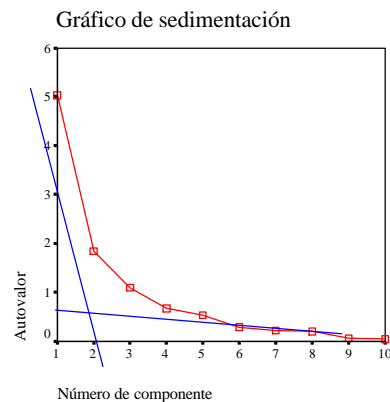


Figura 8. Gráfico de sedimentación

Definido el número de los factores en tres (3), la interpretación de la matriz de componentes se realizó con la matriz rotada (**Tabla 12**). La matriz rotada facilita la interpretación del análisis de factores, debido a que la varianza se separa más uniformemente entre los factores, manteniendo el mismo porcentaje acumulativo de varianza explicada.

Tabla 12. Matriz de componentes rotados

Elemento	Componente		
	1	2	3
Arsénico	,858	,199	,161
Cadmio	,899	-,027	-,188
Cobalto	,178	,902	,047
Cromo	,708	,215	,289
Cobre	,452	,460	,115
Manganeso	-,140	,899	-,132
Molibdeno	,875	-,137	-,026
Níquel	,965	,117	-,082
Plomo	-,032	-,046	,957
Zinc	,946	,109	-,028

Con base en lo anterior, se identifican tres asociaciones estadísticas principales correspondientes al **componente o factor 1**: As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni y Zn; **componente o factor 2**: Co y Mn; **componente o factor 3**: Pb.

Otra vía para examinar las relaciones existentes entre las variables y que ayuda a corroborarlas, es por medio del análisis de conglomerados jerárquicos, la cual es una metodología más apropiada en este caso que el método anterior. En los métodos de análisis

de conglomerados jerárquicos se realiza un proceso de agrupación de las observaciones en el que en cada paso se agrupan dos conglomerados para formar un conjunto.

El proceso comienza considerando tantos conglomerados como observaciones y acaba con la formación de un único conglomerado que las contenga todas (**Tabla 13**).

Tabla 13. Matriz de distancias

Caso	Archivo matricial de entrada									
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Plo	Zn
Arsénico	1,000	,677	,328	,680	,426	,049	,704	,805	,084	,802
Cadmio	,677	1,000	,123	,464	,345	-,068	,763	,876	-,122	,899
Cobalto	,328	,123	1,000	,351	,345	,705	,046	,292	-,004	,271
Cromo	,680	,464	,351	1,000	,366	-,015	,507	,680	,109	,628
Cobre	,426	,345	,345	,366	1,000	,236	,292	,457	,028	,430
Manganeso	,049	-,068	,705	-,015	,236	1,000	-,174	-,024	-,094	-,012
Molibdeno	,704	,763	,046	,507	,292	-,174	1,000	,816	-,012	,753
Níquel	,805	,876	,292	,680	,457	-,024	,816	1,000	-,103	,939
Plomo	,084	-,122	-,004	,109	,028	-,094	-,012	-,103	1,000	-,022
Zinc	,802	,899	,271	,628	,430	-,012	,753	,939	-,022	1,000

El historial de conglomeración que se muestra en la **Tabla 14**, es un resumen numérico de la solución, en donde en la etapa 1 por ejemplo, se encuentran relacionadas dos variables la 8 (Ni) y la 10 (Zn) que presentan un coeficiente de 0.831. Luego se van uniendo las variables que tengan coeficientes similares en las siguientes etapas, debido a la homogeneidad entre ellos. Sin embargo, cuando existe un mayor salto en los coeficientes indica que existe un nuevo conglomerado con características diferentes, es así como se tiene en cuenta el salto en los coeficientes de correlación para encontrar el número de conglomerados o de grupos; en la **Tabla 14** se destaca el salto entre las etapas 6 y 7, esto indica que el número de conglomerados o grupos que quedan son cuatro (4), pudiendo ser esta la solución para el análisis.

Tabla 14. Historial de conglomeración

Etapa	Conglomerado que se combina		Coeficientes	Etapa en la que el conglomerado aparece por primera vez		Próxima etapa
	Conglomerado 1	Conglomerado 2		Conglomerado 1	Conglomerado 2	
1	8	10	,841	0	0	3
2	3	6	,716	0	0	7
3	5	8	,672	0	1	6
4	1	7	,641	0	0	5
5	1	4	,579	4	0	6
6	1	5	,546	5	3	7
7	1	3	,365	6	2	8
8	1	2	,300	7	0	9
9	1	9	,150	8	0	0

Para encontrar las variables (elementos químicos) que se relacionan en cada grupo es mejor utilizar el diagrama de témpanos vertical y el dendograma, los cuales resumen los grupos y las variables relacionadas. Con el número de conglomerados definidos se buscan las variables relacionadas como se muestra resaltado en las **Figuras 9 y 10**.

Con base en el diagrama de témpanos vertical y en el dendograma, se encontraron tres grupos, en el **primer grupo** se encuentra la variable plomo; el **segundo grupo** relaciona las variables manganeso y cobalto, en el **tercero y cuarto** se encuentra el cobre, cromo, molibdeno, zinc, níquel, cadmio y arsénico.

Los resultados de los diferentes análisis utilizados para encontrar relaciones entre las variables coinciden entre si y muestran claramente la existencia de dos grupos de elementos relacionados y en un tercer grupo aparece el Pb que se mantiene independiente y no presenta correlación con ningún otro elemento.

- ? Grupo 1. As, Cd, Cu, Cr, Mo, Ni y Zn
- ? Grupo 2. Co y Mn
- ? Grupo 3. Pb (comportamiento independiente de los demás elementos).

Las agrupaciones obtenidas son útiles para generar mapas de distribución espacial de factores, los cuales resumen el comportamiento de varias variables.

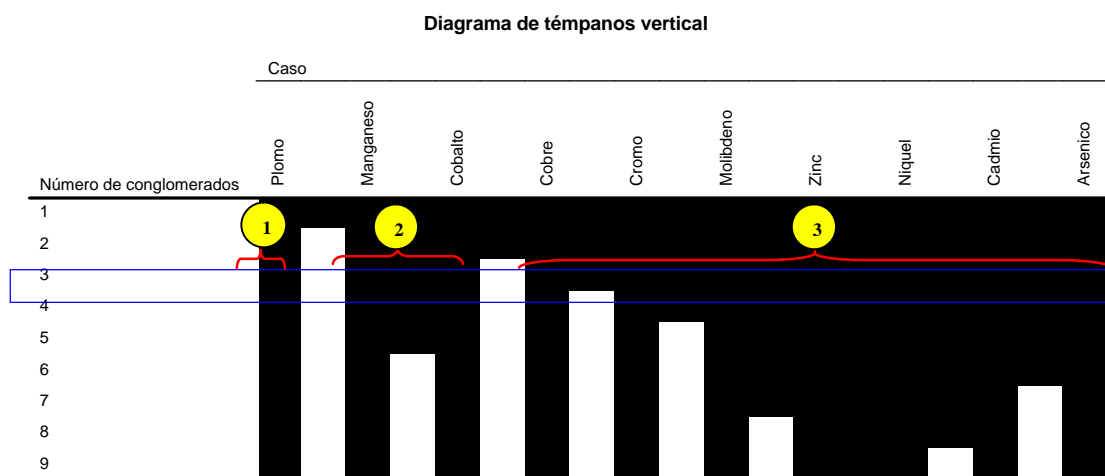


Figura 9. Diagrama de témpanos vertical

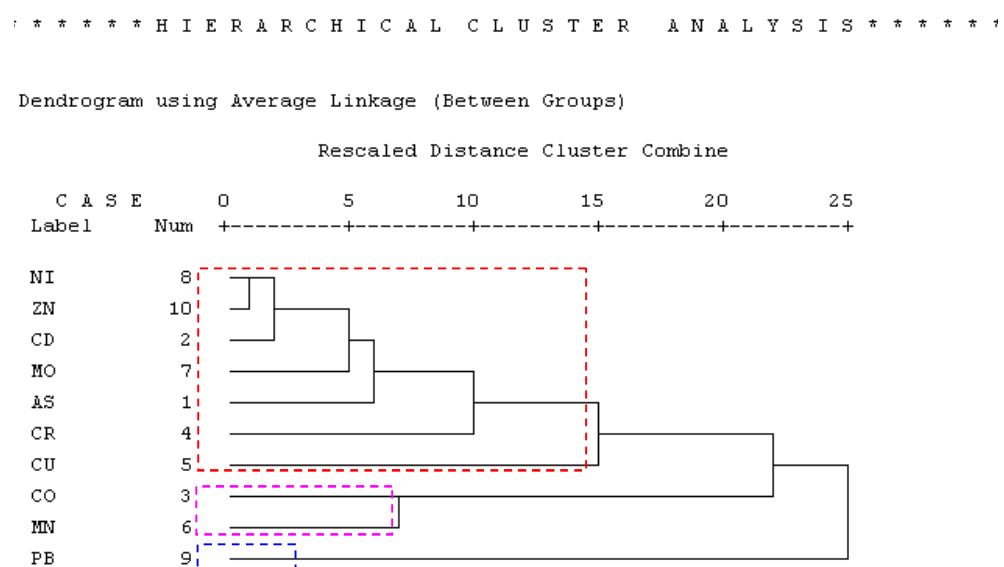


Figura 10. Dendrograma

4.4 MAPAS DE CONCENTRACIÓN PUNTUAL Y DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Las dos clases de mapas elaborados de acuerdo con las metodologías expuestas en el capítulo anterior son básicos para efectuar las interpretaciones del comportamiento geoquímico de los elementos en la zona estudiada, se incluyen en el **Anexo 3**.

Los primeros muestran la concentración de los elementos en suelos en cada punto de muestreo, mientras los segundos permiten tener una visión de la distribución espacial, el análisis de la información que suministran estos mapas se encuentra en el siguiente capítulo de análisis de resultados.

4.5 CONTROL DE CALIDAD ANALÍTICO

Como ya se mencionó, para controlar la calidad de los resultados, conjuntamente con los análisis químicos de las muestras, se analizaron materiales estándares de referencia para verificar la exactitud y se hicieron replicados para establecer la precisión, con estos datos se efectuó un análisis estadístico como se indica a continuación.

4.5.1 Estimación de precisión

La evaluación de la precisión se efectuó utilizando dos métodos de estimación:

4.5.1.1 Método 1

La precisión se evalúa usando los duplicados de análisis según el método de Thompson y Howarth (1973). Este método usa la desviación estándar como indicativo de precisión $S = \sqrt{(\sum d^2 / 2n)}$, en donde “d” es la diferencia entre duplicados y “n” es el número de pares de las determinaciones.

Este método, sin embargo, no tiene en cuenta la variación de la precisión con la concentración, por tal razón es recomendable realizar el análisis con el porcentaje de covarianza.

Se calculó la diferencia relativa promedio o promedio de las diferencias relativas parciales, con base en la siguiente función:

$$DR = \frac{|x-y|}{(x+y)/2} \%$$
$$DR \text{ Prom.} = (DR_1 + DR_2 + \dots + DR_n)/n$$

Los resultados para esta estimación se presentan en el Anexo 4, Tabla 1. Los elementos Cu, Mn y Zn fueron determinados con alta precisión, mientras que los elementos restantes aunque presentan mayor variabilidad se determinaron con precisión aceptable.

4.5.1.2 Método 2

Un método alternativo utilizado por González y García (1986), determina la precisión en función de los valores de concentración, en cuyo caso los datos se prueban utilizando un estándar de precisión empírico expresado como:

$$S_c = S_0 + KC$$

Donde S_c = Estimación de Precisión

S_0 = Desviación estándar a concentración cero

K = Constante
C = Concentración

A partir de los datos obtenidos, se elabora un gráfico que es usado como carta de control para evaluar la precisión. El procedimiento contempla las siguientes etapas:

1. Especificar la precisión requerida

En este caso se selecciona una precisión del 10%, por tanto,

$$S_c = 0.05C$$

2. Construir dos nuevas ecuaciones, calculando los valores de d90 y d99 con los valores de concentración promedio de los duplicados:

$$d_{90} = 2.326 (S_0 + K_c)$$

$$d_{99} = 3.643 (S_0 + K_c)$$

3. Graficar d99 vs concentración promedio, y d90 vs concentración promedio, en función logaritmo.
4. Obtener las medias de los pares de duplicados X y Y; $(x+y/2)$ y las diferencias absolutas $|x-y|$. Graficar diferencia absoluta vs concentración promedio.

Las líneas d90 y d99 son los percentiles 90 y 99, asumiendo una distribución normal del error. Si los resultados analíticos duplicados cumplen con la especificación, un promedio de 90% de los puntos quedará bajo la línea de d90 y un 99% bajo la línea d99. Si la precisión es mejor que la especificada, una proporción mayor de los puntos quedará por debajo de estas líneas, lo contrario sucederá si la precisión es menor.

Los resultados de la aplicación de este método se pueden observar con los gráficos respectivos, en el **Anexo 4, Tabla 2**.

Los resultados indican que elementos como el Mn, Cu y el Zn cumplen con los criterios establecidos para una precisión del 10%. Para el Ni puede considerarse aceptable porque son pocos los valores que se ubican por encima de los límites de referencia de la carta de control.

4.5.2 Estimación de exactitud

La exactitud se puede evaluar con base en criterios establecidos, dependiendo de la disponibilidad de datos.

Un primer criterio consiste en la estimación del porcentaje de error aceptable para la aplicación que se dará a la información, de acuerdo con del nivel de error introducido en las diferentes etapas desde el muestreo hasta el análisis.

Otro criterio es el uso del logaritmo de la desviación, $\log C$ (C: concentración), de los valores obtenidos, con respecto a valores recomendados para estándares primarios y secundarios. Este criterio ha sido recomendado por el proyecto de Mapeo Geoquímico Nacional de China (Darnley et al, 1995), para monitorear resultados entre grupos de muestras, métodos, mapas o laboratorios. Si los datos obtenidos, en alguna etapa del trabajo, sobrepasan los límites de tolerancia establecidos, se deben repetir las determinaciones. Los límites de tolerancia recomendados para materiales de referencia primarios, de acuerdo con el rango de concentración de cada elemento, son los siguientes:

Para rango de concentración < 3 LD, error permitido ($\log C$)	< ± 0.3
> 3 LD	< ± 0.2
1% - 5%	< ± 0.2
> 5%	< ± 0.1

donde LD: Límite de Detección. Darnley et al., (1995)

La estimación de la exactitud bajo estos criterios se realizó con los valores reportados para los materiales de referencia por *Activation Laboratories*.

Los resultados de estimación de exactitud para los elementos As, Co y Cr, determinados por activación neutrónica se presentan en la Tabla 3 del Anexo.

Teniendo en cuenta que para los elementos trazas se puede aceptar hasta un error del 20% en la determinación y de acuerdo con el análisis efectuado, se puede concluir que los elementos As, Co y Cr fueron determinados con buena exactitud.

De acuerdo con el valor de $\log C$, propuesto por el proyecto IGCP 259 para mapeo geoquímico, se llega a la conclusión de que los elementos mencionados fueron determinados dentro de los límites de tolerancia establecidos.

En la estimación de exactitud para los elementos Cu, Mn y Zn, determinados por ICP-OES, se aplicó una metodología diferente, debido a que se dispuso de solo una lectura para ocho materiales estándar de referencia (SRM).

En éste caso, para estimar la exactitud se realizó un gráfico de dispersión de concentración certificada vs. concentración experimental, utilizando los datos de los ocho estándares de referencia para cada elemento. El criterio de evaluación se fundamenta en que de acuerdo con el rango de concentración el valor experimental debe estar muy cerca al valor certificado, de tal manera que el gráfico de dispersión debe acercarse a una línea recta con pendiente cercana a uno. Los resultados obtenidos se presentan en el **Anexo 4, Tabla 4**.

Los elementos Cu, Ni, Pb y Zn, muestran poca diferencia entre concentración certificada y estimada, los gráficos no muestran dispersión y son constantes en el intervalo de concentración en que se efectuó cada determinación, lo que permite deducir que los elementos se analizaron con buena exactitud. El manganeso por otro lado, fue determinado con menor exactitud que los anteriores, sin embargo las determinaciones se consideran dentro de un rango de exactitud aceptable.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los datos obtenidos para los elementos Cd, Pb, Zn, Mo, Mn, As, Cr, Co, Cu y Ni, en suelos de la cuenca del río Bogotá, tomando como base las estadísticas básicas, el análisis geoestadístico, los mapas de concentración puntual y espacial, y la información colectada en campo.

Como se explicó ampliamente en el numeral 2.4.3, **Tabla 5**, la importancia de estos elementos radica en su potencial de toxicidad para los diferentes eslabones de la cadena trófica.

5.1 NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS EN SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ

Los parámetros estadísticos de los datos de concentración de elementos en suelos de la cuenca del río Bogotá, se resumen en la **Tabla 15**. Dada la asimetría de las distribuciones de la concentración de los elementos, se ha tomado a la mediana como el mejor indicativo de tendencia central, como se explicó en la sección de estadística de éste informe (numeral 4.3).

Tabla 15. Concentración de metales traza en suelos de la cuenca del río Bogotá

Elemento	Mediana(mg/kg)	Mínimo(mg/kg)	Máximo(mg/kg)	CV%
As	4,8	0,3	34,6	82
Cd	0,3	0,2	19,2	217
Co	5	1	21	67
Cr	51	3	1313	150
Cu	16	1	166	84
Mn	198	1	1383	76
Mo	2	1	97	200
Ni	15	1	189	118
Pb	21	1	168	65
Zn	65	3	753	120

CV%: coeficiente de variación (desviación típica/media %)

La mayoría de los elementos presentan valores extremos en algunos puntos específicos de la zona de estudio (**Figura 6**). Para Cd, Zn, Ni, Mo y Mn se encuentran varios puntos con valores superiores al percentil 90; en el caso del Cr aparece un punto con una concentración muy alta, mientras que el Pb y el Cu, son los elementos que presentan datos extremos con valores de concentración menos altos.

La ocurrencia de valores extremos para Cr, Mn y Zn se visualiza claramente en los gráficos de dispersión (**Figura 7**), en una región de la cuenca baja, ubicada al sur occidente de la zona de estudio.

Al comparar los resultados obtenidos con los promedios mundiales para suelos reportados por Kabata Pendias (1991) que aparecen en la **Tabla 16**, se encuentra que algunos suelos de la cuenca del río Bogotá presentan contenidos de metales que superan tales concentraciones. El origen de estos elementos puede ser natural o puede estar relacionado con las actividades propias de las prácticas agropecuarias e industriales que se desarrollan en la zona.

Tabla 16. Concentración media y rangos de metales traza en suelos

Elemento	Suelos limosos (promedio mundial) Concentración total (mg/kg) (1)	Suelos Continentales USA Mediana (mg/kg) (2)
Cd	0,06	
Co	10	
Cr	68	40
Cu	22	18,2
Mn	525	398
Ni	22	15
Pb	30	16,5
Zn	66	51,7

(1) Kabata-Pendias, 1991, 2000

(2) US Geological Survey, 2001

5.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y RELACIONES ENTRE ELEMENTOS

La distribución espacial de los contenidos de metales en suelos de la cuenca del río Bogotá (**Anexo 3**), permitió diferenciar claramente dos zonas: una en donde se presentan concentraciones relativamente más bajas de la mayoría de los elementos, correspondiente a la cuenca alta del río y que comprende la Sabana de Bogotá desde el nacimiento del río, en el municipio de Villapinzón, hasta el embalse del Muña en Sibaté; y otra zona en donde se presentan los contenidos más altos y que corresponde a la cuenca baja del río Bogotá.

A pesar de lo anterior, en algunas localidades de la cuenca alta, se presentan altos contenidos de Cd, especialmente en Bojacá, Madrid, Funza y Mosquera; altas concentraciones de Cu cerca de Fontibón, Facatativá, El Rosal, Tenjo y Cota ; y concentraciones importantes de Mn en la mayoría de puntos muestreados, especialmente en la zona central de la Sabana de Bogotá. Adicionalmente, se presentan altos contenidos de Pb en Bojacá y en los alrededores de Bogotá, hacia los cerros orientales y en algunos sitios ubicados en los municipios de Soacha y al occidente de Anolaima y Facatativá, cerca al Cerro de Manjui.

La presencia de concentraciones altas de Cd, Cu, Pb y Mn, en localidades de la cuenca alta, caracterizada por alta densidad de población, concentración industrial y red vial primaria y

secundaria densa y bien desarrollada, puede relacionarse con aportes de fuentes antropogénicas, tales como emisiones de transporte automotor, especialmente en el caso de Pb y Mn (gasolina adicionada con Pb antes de los años 80s y con Mn en la actualidad); así como con aportes de residuos de agroquímicos y de actividades pecuarias e industriales para el caso de Cd, Cu y Mn. La presencia de estos elementos, sin embargo, también puede estar relacionada con aportes del material geológico, que es particularmente apreciable para el Mn, que como es bien conocido, tiene su fuente principal en procesos de meteorización de materiales naturales.

Los mapas de puntos y de distribución espacial (**Anexo 3**) permiten visualizar claramente altas concentraciones para los elementos As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni y Zn en la cuenca baja del río Bogotá, específicamente en la zona comprendida entre los municipios de La Mesa, Anapoima, Apulo, Tocaima y Viotá. El manganeso, al igual que el Co, presentan las concentraciones más altas en una zona localizada entre Tocaima, Agua de Dios y Girardot; y el Pb presenta mayores concentraciones en El Colegio, Anapoima, Apulo, Tocaima y Anolaima. Las altas concentraciones de los elementos mencionados, pueden tener origen, como en el caso de la cuenca alta, en aportes geogénicos, que en éste caso se incrementan por la contribución de lodolitas, limolitas, arcillolitas, lutitas negras, lodolitas calcáreas, así como de cenizas volcánicas (especialmente Ni), y en los residuos de las actividades antrópicas que se desarrollan en el área.

Los análisis estadísticos multivariados, análisis factorial y de conglomerados jerárquicos discutidos previamente (numeral 4.3), permitieron diferenciar los siguientes grupos de asociación de elementos:

- ? Grupo 1. As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni y Zn
- ? Grupo 2. Co y Mn
- ? Grupo 3. Pb (comportamiento independiente de los demás elementos).

Las agrupaciones anteriores corroboran los patrones de distribución espacial que presenta cada uno de los elementos, como se visualiza en los mapas de distribución puntual y espacial (**Anexo 3**).

Los grupos de asociación encontrados, corresponden en su mayoría, a asociaciones geoquímicas naturales, propias de diferentes tipos de rocas presentes en la zona estudiada; tales asociaciones de elementos también pueden presentarse en materiales residuales de actividades antrópicas industriales y agropecuarias. En la cuenca baja del río, del municipio de La Mesa hacia el suroccidente, predominan rocas sedimentarias, tipo *shale* (lutitas), principalmente lodolitas, limolitas o arcillolitas negras, silíceas o calcáreas, las cuales acumulan metales durante su génesis y presentan asociaciones de elementos químicos similares a las encontradas en los suelos estudiados; aunque en los suelos, como es natural, se manifiestan con menores contenidos, por efecto de los procesos pedogenéticos que les dieron origen.

El comportamiento del Pb, que no presenta asociación estadística significativa con otros metales, puede estar evidenciando su origen principalmente antrópico a partir de los

residuos de la combustión de gasolinas, antiguamente adicionada con plomo y de las emisiones de las diversas actividades industriales, que se desarrollan en algunas zonas específicas del área de estudio.

En la parte más baja de la cuenca, municipios de Agua de Dios, Ricaurte y Girardot, se presentan rocas piroclásticas intercaladas con flujos de lodo o depósitos aluviales y areniscas intercaladas con arcillolitas, conglomerados y piroclastitas, en donde los suelos además de los elementos citados anteriormente, presentan mayores contenidos de Mn y Co. El origen principal del Mn debe ser natural, aunque puede existir aporte antropogénico importante por ejemplo de residuos de agroquímicos. La asociación Mn-Co es común en materiales naturales, especialmente en nódulos de Mn de fondo oceánico conjuntamente con Ni, Cu y Zn, y en lateritas junto con altos contenidos de Ni, Fe y Cr; sin embargo también es muy común encontrarla en residuos de fertilizantes y agroquímicos en general (Plumlee & Ziegler, 2003).

En la cuenca alta del río Bogotá se presentan localidades en donde se han acumulado metales y en donde existe amplia y variada actividad antrópica. En los municipios de Bojacá, Madrid, Funza y Mosquera, se presentan altos contenidos de cadmio, en una franja ubicada al sur-occidente de la Sabana de Bogotá. Esta zona se caracteriza por presentar topografía plana, con algunas elevaciones en el costado sur de Bojacá y Mosquera y lomas pequeñas cerca de Madrid; además el material parental de los suelos, en su mayoría Ándicos, (Pachic Melanudands, Andic Dystrudepts y Aquic Hapludands), (IGAC, 2000), está constituido por mantos de ceniza volcánica sobre depósitos hidrogravigénicos. El agua del río Bogotá, catalogada por diversos estudios como portadora de metales, ha sido utilizada ampliamente en ésta zona, para riego de cultivos y pastos.

Es posible que el agua del río Bogotá, sea, junto con otras actividades antrópicas (agricultura, ganadería, industria), una de las fuentes importantes de metales para los suelos de ésta área, especialmente para el caso del Cd. Los materiales parentales de los suelos de esta zona, cenizas volcánicas y depósitos hidrogravigénicos, muy seguramente provenientes de las rocas de la Formación Guadalupe, que aflora en los alrededores, también pueden contribuir en gran parte, a la presencia de metales como el cadmio, que se presentan en ésta región.

5.3. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS Y PROPIEDADES MEDIDAS EN CAMPO

En éste aparte se analizan algunas de las propiedades de los suelos, medidas en campo, tales como pH, textura y color y se relacionan con la presencia y comportamiento geoquímico de los elementos estudiados.

5.3.1 Potencial de hidrógeno (pH)

Los valores de pH medidos en suelos, permiten diferenciar dos zonas que coinciden, en rasgos generales con la cuenca alta y la cuenca baja del río Bogotá. En la cuenca baja

predomina pH con tendencia a básico y rango entre 6.6 y 9.0 y en la cuenca alta predomina pH con tendencia a ácido y rango entre 4.0 y 6.5 (**Figura 11**).

En la cuenca alta, aunque en general predominan suelos con pH ácido, también se presentan algunos sitios con suelos de pH básico, especialmente en los alrededores de los municipios de Guasca, Guatavita, Suesca, Nemocón y Zipaquirá, al nororiente de la Sabana de Bogotá. En la cuenca baja, los sitios con predominio de pH alcalino se localizan principalmente entre los municipios de La Mesa, Anapoima, Apulo, Tocaima, Agua de Dios y Girardot, en zonas caracterizadas por la presencia de rocas clásticas limoarcillosas con intercalaciones de calizas, las cuáles además de heredar características alcalinas a los suelos, aportan carbonatos, material arcilloso y metales que han acumulado en su génesis, tales como As, Cr, Cu, Mn, Mo y Zn.

Lo anterior es particularmente importante para explicar el origen y comportamiento geoquímico de los elementos en los suelos, porque además de que los materiales parentales aportan elementos traza, las condiciones de pH y de potencial redox existentes en el medio, determinan en gran extensión la movilidad y acumulación de los elementos aportados. En condiciones de pH básico, las especies predominantes del Cu, Ni, Zn y Co son inmóviles geoquímicamente, puesto que pueden coprecipitarse como carbonatos o ser adsorbidas por estos o por óxi-hidróxidos de Fe o arcillas y se concentran en los suelos, tal y como ocurre en la cuenca baja del río Bogotá. El As y el Cd son medianamente móviles en diferentes condiciones de pH, sin embargo la presencia de carbonatos, óxi-hidróxidos de Fe (favorecidos con el aumento de pH) o de arcillas, favorecen su fijación y acumulación en suelos alcalinos. El Mn y el Pb son muy poco móviles en diferentes condiciones de pH y permanecen acumulados cerca de la fuente que los origina. Adicionalmente a lo anterior, el Mn puede precipitar como hidróxido y permanecer adsorbido junto con óxi-hidróxidos de Fe y en el caso del Pb puede ser adsorbido y fijado en el material arcilloso de los suelos. La movilidad del Mo es alta y aumenta con el pH, sin embargo la presencia de arcillas y de iones carbonato favorece su adsorción y acumulación en los suelos de la cuenca baja.

El predominio de pH ácido en los suelos de la cuenca alta, principalmente en la parte plana de la Sabana de Bogotá, puede propiciar la existencia de fases móviles de Cu, Ni, Zn, Cd y Co, hecho que facilita su migración en fase acuosa y puede explicar en parte, la mas baja acumulación (menores concentraciones) de elementos en los suelos de la Cuenca alta del río, en comparación con la cuenca baja.

Para esta área en particular, por sus características topográficas, por el uso intensivo del suelo y de las aguas subterráneas y por las condiciones de pH de sus suelos, se recomienda estudiar en detalle todos los parámetros físicos y químicos que determinan vías, dispersión y acumulación de los elementos químicos, es decir estudiar su geoquímica específica como base para recomendar medidas que controlen la migración de elementos potencialmente peligrosos hacia cuerpos acuosos superficiales y profundos y hacia las plantas.

A pesar de las características generales descritas para la cuenca alta y para la cuenca baja del río Bogotá, la ruta de migración de cada elemento en cada sitio muestreado, debe ser estudiada en cada caso particular, porque además del pH, existen otras características fisicoquímicas tales como condiciones de oxidación-reducción, contenido de materia

orgánica, presencia de barreras naturales como arcillas, entre otras, que definen las vías de dispersión y acumulación final de los elementos químicos en el medio natural.

Figura 11. Acidez y alcalinidad de suelos de la cuenca del río Bogotá

5.3.2 Textura

Como es bien conocido, la textura de los suelos influye directamente en el comportamiento geoquímico de los elementos químicos debido a que al aumentar la cantidad de partículas finas, es decir de minerales arcillosos, se dispone de mayor área superficial y por tanto se aumenta la disponibilidad de sitios de adsorción o de intercambio, para los elementos presentes en el medio.

La textura predominante en los suelos, a lo largo de la cuenca del río Bogotá, se puede agrupar en las siguientes clases (ordenadas de acuerdo con el aumento proporcional de partículas finas): *franco arenosa*, *franca*, *franco limosa*, *franco arcillo arenosa*, *franco arcillo limosa*, *franco arcillosa*, *arcillo arenosa* y *arcillo limosa* (**Figura 12**).

En la cuenca alta, la diversidad de textura de los suelos, hace que el comportamiento geoquímico de los elementos evaluados (movilidad y disponibilidad) con respecto a sus características texturales, sea variado y muy típico de cada tipo de suelo muestreado, condición que no permite generalizar patrones de comportamiento.

En sitios específicos de la parte central de la cuenca alta del río Bogotá, se presentan cantidades apreciables de material arcilloso fino, el cuál puede actuar como barrera geoquímica que disminuye la movilidad de los elementos químicos. Lo anterior puede compensar en parte, la influencia del pH ácido predominante en ésta zona, el cuál como ya se ha mencionado propicia la existencia de formas móviles particularmente del Cu, Ni, Zn y Co. La sinergia de las dos características anteriores, hace posible que en suelos medianamente ácidos a neutros, con altos contenidos de material arcilloso, se acumulen cantidades importantes de elementos traza de origen geogénico y antrópico.

En la Cuenca Baja, que presenta mayor concentración de elementos traza, los suelos presentan textura franco arcillosa y predominio de pH alcalino que favorece la existencia de especies químicas poco móviles, especialmente de Cu, Ni, Zn y Co. La existencia de arcillas con puntos de adsorción disponibles, así sea en pequeña cantidad, unido a condiciones de pH alcalino, son condiciones que pueden actuar sinérgicamente y aumentar la precipitación y concentración de los elementos en forma de sales, hidróxidos u otros compuestos insolubles.

Para definir patrones de dispersión dependientes de la textura de los suelos y para relacionarlos con el peligro potencial que su acumulación representa para los seres vivos, será necesario adelantar estudios geoquímicos detallados e integrales.

Figura 12. Textura de suelos de la cuenca del río Bogotá

5.3.3 Color

El color de los suelos puede ser indicativo de presencia de materia orgánica, sin embargo este sólo se puede tomar como una evidencia aproximada, porque la materia orgánica no es la única fuente de color en los suelos.

Los colores que predominan en los suelos de la zona de estudio son: negro, marrón, marrón muy oscuro, marrón grisáceo oscuro y muy oscuro (**Figura 13**).

La presencia de colores negro y marrón grisáceo oscuro en algunos de los suelos de la cuenca baja, puede relacionarse con la presencia de materia orgánica o de materiales arcillosos (lodolitas y arcillolitas negras), que por su origen presentan alto contenido de material carbonoso que heredan a los suelos. El color oscuro de los suelos alcalinos (**Figura 13**) de ésta región, puede también haberse intensificado por la dispersión de materia orgánica que en estas condiciones de pH, se distribuye fácilmente y recubre los granos de suelo, formando películas finas, dando como resultado una apariencia de mayor presencia de materia orgánica.

Los colores oscuros de los suelos de la cuenca alta en los alrededores de Facatativa, Bojacá, Guatavita, Guasca y La Calera entre otros, pueden estar relacionados con la presencia de complejos órgano-minerales, formados por materiales húmicos y minerales de bajo ordenamiento cristalino, provenientes, estos últimos, de ceniza volcánica (material parental), presente en varios sectores de ésta zona (IGAC, 2000).

Lo anterior fue confirmado con la prueba de Fieldes y Perrot (1966) en IGAC (1990), que cuando es positiva, confirma presencia de materiales provenientes de cenizas volcánicas, en ausencia de carbonatos. La prueba fue positiva en suelos de la cuenca alta en los alrededores de Zipacón, Tenjo y La Calera. (**Figura 14**). En la cuenca baja no se consideró adecuado aplicar la prueba anterior dada la presencia de carbonatos en varios de los suelos muestreados.

Figura 13. Color de los suelos de la cuenca del río Bogotá

Figura 14. Suelos con influencia de ceniza volcánica en la cuenca del río Bogotá

5.4. INFLUENCIA DEL CLIMA EN EL COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO DE LOS ELEMENTOS

En la cuenca del río Bogotá, dependiendo de la altitud, se presentan diversos climas que se pueden agrupar en: cálido y seco, medio y húmedo, frío y húmedo, y frío y seco. En términos generales al aumentar la altura, el clima se hace más frío, de tal forma que los procesos de meteorización y de descomposición de la materia orgánica (agente de adsorción y retención de elementos) se hacen más lentos por la influencia de las bajas temperaturas.

En las zonas de clima cálido y seco, principalmente en la cuenca baja del río Bogotá, la meteorización de las rocas se acelera contribuyendo a la liberación de elementos químicos. Simultáneamente, en estas condiciones climáticas, los procesos de humificación de la materia orgánica se aceleran y contribuyen a la generación de complejos orgánicos que pueden retener los elementos liberados. Lo anterior, unido a otros factores tales como presencia y acumulación de carbonatos, presencia y tipo de arcillas y pH básico, limitan la disponibilidad y movilidad de algunos elementos químicos y produce como resultado final una mayor retención y acumulación de elementos químicos en esta zona. Este tipo de clima se presenta principalmente entre los municipios de Agua de Dios, Anapoima, Apulo, Girardot, Mesitas del Colegio, Tocaima y Viotá.

En clima frío y seco, la actividad de los microorganismos es menor lo que limita la descomposición de la materia orgánica, al mismo tiempo la meteorización del material parental se ve disminuida, propiciando suelos con menores contenidos de metales. Este tipo de clima tiene ocurrencia en municipios de la cuenca alta, en Bogotá, Bojacá, Cajicá, Cota, Facatativá, Funza, La Calera, Madrid, Mosquera, Sopó y Tabio.

En clima medio y húmedo ocurre descomposición de la materia orgánica en extensión limitada, aunque se puede presentar acumulación de material vegetal poco transformado y por la presencia de agua (humedad) se pueden presentar condiciones propicias para que ocurran procesos de meteorización y se liberen elementos químicos del material parental. Este clima se presenta en municipios de la cuenca baja, en Anolaima, Cachipay, La Mesa y San Antonio de Tena.

En clima frío y húmedo los procesos se disminuyen y aunque con el tiempo puede ocurrir la descomposición de la materia orgánica (presencia de agua), predomina la acumulación de material vegetal con baja descomposición. Clima frío y húmedo se presenta en la cuenca alta en Tenjo y Zipaquirá, principalmente.

Las condiciones climáticas explican y guardan correlación con la mayor acumulación de algunos elementos que se presenta en los suelos de la cuenca baja y el empobrecimiento o menor concentración de elementos en la cuenca alta del río Bogotá.

5.5 TIPO DE SUELO Y COMPORTAMIENTO GEOQUÍMICO DE LOS ELEMENTOS

En la cuenca alta, en la región que abarca los municipios de Bojacá, Cajicá, Chía, Chocontá, Cogua, Cota, Facatativa, Funza, Gachancipá, Guasca, Guatavita, La Calera, Madrid, Mosquera, Nemocón, Sesquilé, Sopó, Suesca, Tabio, Tausa, Tenjo y Zipaquirá, además de Bogotá D.C., se presentan suelos con diferente desarrollo pedogenético, desde los poco evolucionados como Entisoles e Inceptisoles, hasta los de moderada y alta evolución como los Andisoles, Molisoles y Alfisoles.

Las características físico-químicas de los suelos influyen en el comportamiento geoquímico de cada elemento y están reflejadas en la clasificación taxonómica a nivel de gran grupo. En suelos de muy baja evolución, como los Epiaquents en Bogotá, Guasca, Mosquera y Sopó, que presentan arcillas y condiciones reductoras (exceso de humedad por saturación con agua), se favorecen formas no móviles de los elementos (Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn) y la concentración de especies químicas reducidas, que pueden ser en algunos casos las más tóxicas para los seres vivos (por ejemplo Cr^{+3}).

Es común la presencia de Melanudands, grupo de mediano desarrollo evolutivo, en Bogotá, Bojacá, Cajicá, Chia, Cota, Facatativa, Funza, Guasca, Guatavita, La Calera, Madrid, Nemocón, Tabio, Tausa, Tenjo y Zipaquirá. Este grupo se caracteriza por presentar minerales amorfos y contener ácidos húmicos que adsorben o captan metales, por ejemplo cadmio, lo que puede explicar la presencia localizada de altos niveles éste elemento, en algunos suelos recolectados en éstos municipios.

En Chocontá, Facatativa, Guasca, La Calera, Sesquilé y Zipaquirá, se encuentran los Argiudolls, que se desarrollan en climas húmedos y presentan evolución moderada. Este grupo posee alta humificación (degradación de materia orgánica), presencia de arcillas, y desarrollo de horizonte argílico, condiciones que contribuyen a que sean retenedores de metales.

En los municipios de la cuenca baja como Agua de Dios, Anapoima, Apulo, Girardot, La Mesa, Tocaima y Viotá, se presentan suelos con diferente grado de evolución como Entisoles, Inceptisoles, Molisoles, Andisoles y Vertisoles. Algunos de estos suelos presentan carbonatos y diferentes tipos de arcillas, otros tienen influencia de los ríos circundantes ó presentan propiedades ándicas, mientras que otros reflejan principalmente la influencia del clima, condiciones que actúan sinérgicamente y les confieren a los suelos diferentes características como retenedores de metales.

La clasificación taxonómica de los suelos *Calciustolls*, presentes en Agua de Dios, La Mesa, Anapoima, Tocaima y Viotá, los ubica como suelos de evolución moderada (Molisoles), alta humificación, con presencia de arcillas 2:1, abundancia de minerales primarios, pH básicos, con un horizonte cálcico y que han sido desarrollados en climas

secos y cálidos (régimen climático ústico). Las características químicas y mineralógicas anteriores explican en parte, la alta retención de elementos como As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni y Zn, que se encontró en este tipo de suelos de la cuenca baja.

5.6 ELEMENTOS CUYA CONCENTRACIÓN SOBREPASA LOS VALORES DE REFERENCIA PARA SUELOS

En este numeral se analiza la distribución de los elementos en la zona de estudio y se comparan los niveles encontrados en cada sitio de muestreo con valores de referencia recomendados para evaluar la calidad de uso de los suelos (**Tabla 17**). En primer lugar se analiza la presencia de los elementos en los municipios de la cuenca alta y se compara con su concentración en los municipios de la cuenca baja y seguidamente se analiza la distribución de cada elemento químico a lo largo de toda la cuenca del río Bogotá.

Para definir calidad de uso de los suelos, se han utilizado ampliamente los valores de referencia reportados por Kabata-Pendías, (1992) y VROM, (1991 y 1994), en Reimann (1998), que se presentan en la **Tabla 17**.

Tabla 17. Valores de referencia de calidad de suelos
(Kabata-Pendias, 1992; VROM, 1991, 1994 en Reimann, 1998)

Elemento	Valor de Referencia (mg/kg)	Elemento	Valor de Referencia (mg/kg)
As	20-29	Co	50
Cr	100	Mo	5-10
Cd	0,8-1	Mn	674-1500
Cu	36-50		
Ni	35-50		
Pb	85-95		
Zn	140		

5.6.1 Acumulación de metales por municipio, relación con el material parental y con actividades antrópicas

En la cuenca alta del río Bogotá se localizan los municipios de Villapinzón, Chocontá, Suesca, Sesquilé, Nemocón, Cogua, Zipaquirá, Gachancipá, Tocancipá, Tausa, Subachoque, Tabio, Cajicá, Sopó, Guasca, Tenjo, Chia, Cota, Facatativa, Madrid, Zipacón, Funza, Mosquera, Soacha y Bojacá, además del Distrito Capital de Bogotá.

En términos generales, en los suelos de los municipios ubicados en la Cuenca alta del río, la mayoría de los elementos estudiados se presentan en niveles de concentración inferiores a los máximos (valores de referencia) a partir de los cuáles se considera que pueden afectarse las propiedades o la calidad de uso de los suelos (**Tabla 17**).

No obstante lo anterior, en algunos de los sitios de ésta zona se presentan altas concentraciones de elementos, que superan los valores de referencia (**Tabla 18**), cuyo

origen y procesos de acumulación se deben analizar de acuerdo con las condiciones geoquímicas específicas existentes en su entorno.

En los alrededores de **Zipaquirá**, cerca al río Negro (estación 209-74), la concentración de zinc (221 mg/kg), es mayor al valor de referencia, lo que se explica en parte, por la presencia de lodolitas carbonatadas que le aportan al suelo contenidos importantes de metales, generalmente en formas inmóviles. Adicionalmente, otra fuente posible de zinc para éstos suelos la constituyen los fertilizantes utilizados para las actividades agrícolas que se desarrollan en ésta zona (floricultura y silvicultura). Algunas propiedades de los suelos de este sitio, tales como la textura franco limosa y pH neutro, contribuyen a que el zinc se concentre y permanezca preferentemente en formas químicas no bio-disponibles para los cultivos.

En **Tausa**, en un sitio de uso agrícola y ganadero (estación 209-26) cuyo material parental son rocas clásticas limoarcillosas y arenosas, que le confieren al suelo una textura arcillo-arenosa, se encontraron concentraciones de zinc superiores a los niveles de referencia (154 mg/kg). El carácter ácido del suelo en éste municipio, proporciona condiciones favorables para la existencia de formas móviles de zinc, sin embargo, las arcillas heredadas del material parental, a pesar de la acidez, retienen los aportes genéticos así como los aportes que con seguridad recibe de las actividades agropecuarias, dando como resultado altas concentraciones de zinc en los suelos.

En los municipios de **Tabio, Cajicá, Sopó, Tenjo, Cota, Facatativa, Madrid, Funza, Mosquera, Bojacá y Bogotá**, el material parental lo conforman principalmente depósitos cuaternarios hidrogénicos con mantos de ceniza volcánica; materiales que mediante procesos pedogenéticos han ocasionado acumulación de materiales arcillosos, entremezclados con los productos de alteración de las cenizas volcánicas, como las alofanas, que pueden actuar como retenedores y concentradores de los elementos químicos heredados del material parental o producidos por las actividades antrópicas. Lo anterior explica los altos niveles de elementos que como el cadmio (**Tabla 18**), se encuentran acumulados en los suelos de ésta zona y que en general sobrepasan los niveles de referencia adoptados (**Tabla 17**).

Por otra parte el cadmio acumulado en los suelos de los municipios relacionados anteriormente, podría también tener origen antropogénico, si se toma en cuenta que las actividades antrópicas son variadas e intensas en éstas regiones. Las fuentes antropogénicas de cadmio pueden estar relacionadas con el uso de fertilizantes fosforados (Kabata-Pendías, 1992), así como con el riego de cultivos con aguas residuales y con el alto tráfico de vehículos (desgaste de llantas y emisiones de exhostos).

Las lutitas negras generalmente reportadas como ricas en elementos traza, como cadmio (Kabata-Pendías, 1992), se encuentran en las formaciones Guaduas y Guadalupe que afloran en varios sectores alrededor o dentro de la Sabana de Bogotá y pueden ser la fuente geogénica de cadmio en los suelos de los municipios mencionados; sin embargo en la mayoría de los suelos analizados procedentes de las zonas más cercanas a los afloramientos, no se encontraron concentraciones altas de cadmio, lo cual puede explicarse

con base en la acidez alta de estos suelos, lo cual facilita una mayor movilidad del cadmio y su salida de ellos. De otra parte, en los suelos de la Cuenca Alta, en los que se encuentran altos niveles de cadmio, en general no se presentó acumulación de otros elementos (Zn, Pb), naturalmente asociados al mismo, en lutitas y lodolitas, lo cual hace deducir que el origen principal del cadmio, en esta zona, es la actividad antrópica y que debido a la presencia de materiales finos (limos y arcillas) y materia orgánica, que lo retienen, el elemento se ha concentrado y permanece acumulado en los suelos.

Dado que el cadmio es el elemento que se presenta enriquecido en mayor número de localidades de la Cuenca Alta, a continuación se analizan en detalle algunos de los sitios en los cuales se encontró por encima de los valores de referencia:

En **Tabio y Cajicá**, cerca al río Frío (estación 227-12 y 228-1) los suelos presentan características ácidas, en cuyo caso el cadmio puede pasar a formas solubles y presentar una movilidad media a alta; sin embargo la presencia de arcillas (textura franco-arcillosa), contribuye a que el cadmio permanezca retenido (adsorbido) en los suelos.

En **Tenjo**, (estación 227-23) cerca a la quebrada Garay, se presentan altas concentraciones de Cd (6,1 mg/kg) y Zn (563 mg/kg), cuyo origen puede estar relacionado con el uso intensivo de fertilizantes. Estos suelos han sido tratados con agroquímicos para elevar el pH (naturalmente ácido) en una práctica conocida como “uso de enmiendas”, condición que contribuye a la retención de los aportes de los residuos de los fertilizantes y al enriquecimiento y concentración de dicho elemento en los suelos. La presencia de materia orgánica, evidenciada por el color marrón oscuro de los suelos, también contribuye a la adsorción y retención del Zn y del Cd en los suelos de ésta zona.

En **Facatativá** (estaciones 227-33DC, 227-33, 227-43 y 227-44, **Tabla 18**) cerca de los ríos Bojacá y Subachoque, se presentan suelos ácidos (pH 4,8 – 6,2) con altas concentraciones de cadmio. En condiciones ácidas el cadmio es medianamente móvil, sin embargo la presencia de arcillas y de materia orgánica (color negro y marrón oscuro del suelo) hace que, a pesar de la acidez, predominen los procesos de adsorción y de formación de complejos orgánicos que hacen que el cadmio permanezca acumulado en los suelos. Lo anterior coincide con hallazgos de numerosos estudios que han encontrado que aunque la adsorción del cadmio aumenta a medida que aumenta el pH, la composición orgánica y mineral del suelo regula y determina su adsorción real en éste medio (Alloway, 1995).

Situación similar a la descrita se presenta en **Madrid**, cerca al río Subachoque (estaciones 227-56, 227-69DC y 227-57- Cd hasta 3,2 mg/kg), **Funza** en cercanías al río Bogotá (estación 227-70 – Cd 3,7 mg/kg), **Mosquera** (estaciones 227-69 – Cd 1,7 mg/kg) cerca al río Subachoque y (estación 227-81 – Cd 2,3 mg/kg) cerca al río Balsillas; y en **Bojacá** (estaciones 227-55 - Cd 8,2 mg/kg, 227-68DC - Cd 2,8 mg/kg; y 227-67 – Cd 3,4 mg/kg). En los alrededores de Bogotá, cerca de los ríos Bogotá y Juan Amarillo se encontraron suelos con textura arcillosa y pH ácido a neutro como producto de la adición de cal (“enmienda”), los cuáles han concentrado altos niveles de cadmio (227-94DC- Cd 5,8 mg/kg, 227-94TC – 3,7 mg/kg y 227-94 - Cd 2,8 mg/kg).

Tabla 18. Elementos que exceden los valores de referencia.

Tabla 18. Elementos que exceden los valores de referencia (continuación)

El origen antrópico del cadmio en la cuenca alta puede estar relacionado con residuos de agroquímicos, riego con aguas residuales del río Bogotá y emisiones y residuos del intenso tráfico que existe en ésta zona. Otros elementos tales como Zn, Cr y Pb, también presentan altas concentraciones en algunos suelos de la cuenca alta, sin embargo a diferencia del Cd su distribución es muy local y se puede asociar a fuentes específicas en su zona de ocurrencia.

Los suelos de la cuenca baja, municipios de Anolaima, Cachipay, Tena, San Antonio de Tena, El Colegio, Anapoima, Mesitas del Colegio, Viotá, Apulo, Tocaima, Agua de Dios y Girardot, presentan en general, altos contenidos de elementos en niveles que sobrepasan los valores de referencia, a partir de los cuáles se pueden afectar las propiedades o calidad de uso de los suelos. La mayoría de los suelos de ésta zona se desarrollan sobre lodolitas calcáreas, que por su naturaleza pueden contener elementos traza y ser fuente de cantidades apreciables de elementos a los suelos (Holland & Turekian, 2003).

En **Anolaima** en una zona con afloramientos de lutitas, se presentan altas concentraciones de Cd cerca de la quebrada Agualauta (estación 227-28 – Cd 1,4 mg/kg) y de Mo cerca de la quebrada Reventones (estación 227-39 - Mo 11 mg/kg). Los suelos de ésta zona presentan texturas franco arcillosas y están dedicados a actividades agropecuarias, condiciones que a pesar de los valores de pH ácidos, contribuyen a la retención mediante adsorción por los materiales arcillosos de tales elementos.

En **Cachipay** se encuentran suelos desarrollados sobre lodolitas, que presentan pH ácido y altas concentraciones de Cd, Mo y Zn (Quebrada de la tienda Palestina), poniendo de manifiesto la ocurrencia de fenómenos de adsorción en las arcillas (textura franco arcillosa) que retienen y acumulan los elementos aportados por el material parental y por residuos de actividades antrópicas. En ésta misma zona se presentan suelos desarrollados sobre lodolitas calcáreas, los cuáles poseen concentraciones de As, Cd, Cr, Mo, Ni y Zn por encima de los niveles de referencia (Quebrada Doña Juana). En éste caso el material parental le confiere a los suelos propiedades básicas (pH 7,2), iones carbonato, arcillas y oxihidróxidos de hierro, que forman complejos con los metales traza o son adsorbidos y permanecen acumulados en los suelos.

En **San Antonio de Tena**, se encuentran suelos con textura franco arcillo arenosa, pH ácido y uso ganadero, que presentan en unos casos alta concentración de Cd y Zn (quebrada Torcoroma), y en otros alta concentración de Cr (quebrada La Chorrera). La alta concentración de éstos elementos puede provenir de los aportes del material parental (rocas clásticas limoarcillosas y cenizas volcánicas) y de residuos de las actividades ganaderas desarrolladas en éstas zonas.

En **La Mesa** se presentan suelos de uso agrícola y ganadero que poseen texturas franco arcillosa y franco arcillo arenosa, pH neutro a alcalino y presencia de carbonatos provenientes de las lodolitas calcáreas, los cuáles mantienen niveles de Cd, Cr, Mo, Ni y Zn por encima de los valores de referencia, (quebradas Quipilita, La Maria, La Cagatinta, y el río Bogotá). El color predominante en éstos suelos es negro (5Y2,5/1 y Gley1 2,5/N), gris muy oscuro (7,5YR3/1) y marrón grisáceo oscuro (10YR4/2), dando aspecto de altos

contenidos de materia orgánica, sin embargo como es bien conocido en suelos alcalinos, la materia orgánica se dispersa y recubre los granos de suelo aparentando mayores contenidos de materia orgánica. En estos suelos las formas más comunes de los elementos pueden estar adsorbidas en minerales arcillosos y acomplejadas o precipitadas como carbonatos (especialmente Cd y Zn), de tal modo que los elementos se presentan como especies químicas menos disponibles para las plantas. Situación similar se presentó en **Apulo** (quebradas La Colorada, La Yequera y el río Apulo) en suelos desarrollados sobre lodolitas calcáreas y dedicados a la conservación; en **Tocaima**, (quebradas Cachimbula, Palacio y río Bogotá), en suelos desarrollados sobre lodolitas calcáreas y depósitos cuaternarios con coloración marrón grisáceo oscuro (10YR4/2) y gris oscuro (10YR4/1), en cuyo caso el color se puede atribuir a la materia orgánica heredada de las lutitas negras. En **Anapoima**, (quebradas La Puerquera, La Tinta, La Esperanza, La Moya, El Recreo, Socotá y La Yequera) en zonas de conservación y de uso agropecuario, las características de los suelos (textura franco arcillosa, pH neutro a alcalino y presencia de carbonatos), permiten que los elementos As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni y Zn, sean retenidos y se concentren en niveles que sobrepasan los valores de referencia (**Tablas 17 y 18**).

En **Mesitas del Colegio**, en suelos desarrollados sobre depósitos cuaternarios con mantos de ceniza volcánica, pH ácido, alto contenido de materia orgánica, y que están destinados a uso agrícola y ganadero (quebradas Belice, La Cuncia, La Junca y el río Calandaima), predomina Cd como elemento que sobrepasa el valor de referencia, aunque puntualmente también se encontró alta concentración de Mo y Cr. Estos elementos además de ser heredados del material parental son aportados por las actividades agropecuarias y su presencia en los suelos se puede explicar por el alto contenido de materia orgánica y de materiales arcillosos (textura franco arcillosa), además de productos de la alteración de las cenizas volcánicas (alofanas), que ocasionan la formación de complejos órgano-minerales, los cuales retienen y concentran dichos elementos en los suelos, mediante procesos de adsorción principalmente.

En los alrededores del municipio de **Viotá** (quebradas Ruicito y La Mona), en suelos de pH ácido, textura franco arcillosa y de uso agrícola destinados al cultivo de café, se encontraron niveles de Zn y Cu por encima de los valores de referencia. Además del medio natural, la actividad agrícola (fertilizantes y plaguicidas) es fuente importante de Cu y Zn para los suelos. El pH ácido propicia formas móviles de éstos elementos, sin embargo la presencia de arcillas favorecen fenómenos de adsorción e intercambio y la materia orgánica, color marrón muy oscuro (10YR2/2) y marrón grisáceo muy oscuro (10YR3/2), y los materiales derivados de las cenizas volcánicas permiten la formación de complejos, todo lo cuál da como resultado la fijación y concentración de éstos elementos en los suelos.

En **Agua de Dios**, se presentan suelos con alta concentración de Cr, los cuáles se han desarrollado en rocas clásticas arenosas carbonatadas y depósitos cuaternarios, con pH neutro (quebradas La Palmara, La Salada y río Bogotá). El cromo además del origen geogénico, puede provenir de residuos de las actividades agrícolas e industriales, y por sus características geoquímicas (elemento inmóvil en la mayoría de las condiciones fisicoquímicas del suelo), permanece inmóvil y se concentra en los suelos. En suelos agrícolas y ganaderos de **Agua de Dios** (pH 6,3) y de **Girardot** (pH 7,8), comúnmente

regados con aguas del río Bogotá, se encontró Cd y Zn por encima de los límites de referencia. El Zn y el Cd pueden provenir, además de los residuos de las actividades agropecuarias, de las aguas del río Bogotá usadas para riego; las cuáles como se ha mencionado repetidamente, son portadoras de concentraciones apreciables de éstos y otros elementos traza. Las condiciones de pH (neutro a básico) y la presencia de arcillas (textura arcillo arenosa y arcillo limosa), hacen que el Zn y el Cd, permanezcan y se concentren en los suelos.

Los suelos de la cuenca baja están influenciados por la composición del material parental (principalmente lodolitas calcáreas) que les confieren elementos químicos y condiciones geoquímicas propicias para su acumulación en los suelos: pH neutro a básico que privilegia especies químicas inmóviles (Cu, Ni, Zn y Co, Mn, Pb especialmente); presencia de arcillas que favorecen fenómenos de adsorción e intercambio; presencia de carbonato de calcio que permite la coprecipitación o adsorción de algunos elementos como el Mo. Adicionalmente las actividades agrícola y ganadera, así como el riego con aguas del río Bogotá, contribuyen a enriquecer y concentrar los elementos químicos en los suelos de ésta región.

5.6.2 Distribución y acumulación de cada elemento en la cuenca del río Bogotá

La síntesis de la distribución y concentración geoquímica de cada elemento en los suelos de la cuenca del río Bogotá, se presenta a continuación.

Arsénico: De todos los suelos analizados a lo largo de la cuenca del río, solamente en cuatro estaciones (municipios de Anapoima y Cachipay) ubicadas en la cuenca baja (**Figura 15, Tabla 18**), se encontraron suelos cuyos niveles de arsénico (30 mg/kg) superan los valores de referencia (**Tabla 17**). La presencia de arsénico en estos suelos además del aporte geogénico, puede relacionarse con actividades agropecuarias que se desarrollan en éstas zonas (fertilizantes, insecticidas, fungicidas, residuos pecuarios). La presencia de materiales arcillosos privilegia fenómenos de adsorción que retiene el arsénico en los suelos. Estos suelos merecen estudios detallados y sistemáticos que determinen la amplitud de la presencia de arsénico, estudien su origen así como los procesos geoquímico-bióticos en los que interviene. Lo anterior permitirá evaluar los riesgos a que son sometidos los ecosistemas por la presencia de arsénico, posibilitará el control de fuentes y el establecimiento de las medidas que sean necesarias para evitar efectos nocivos en la salud de los seres vivos y para la protección de los ecosistemas.

Cromo: En varios suelos de la Cuenca baja (Agua de Dios, Anapoima, Apulo, Cachipay, La Mesa, Mesitas del Colegio, Ricaurte, San Antonio de Tena y Tocaima) (**Figura 16, Tabla 18**), se encontraron concentraciones de cromo entre 100 y 200 mg/kg, las cuáles superan el límite de referencia para éste elemento (**Tabla 17**). El cromo presente en los suelos además de geogénico, se puede estar originando por aportes de actividades antrópicas tales como residuos de industria química, lodos residuales, incineración de basuras y fertilizantes fosforados. Los aportes antrópicos además de provenir de fuentes localizadas en los municipios referenciados, se pueden estar aumentando por el riego de suelos con aguas del río Bogotá, cerca la cual se han encontrado botaderos de residuos de la industria del cuero,

entre otras. Las características de elemento poco móvil en la mayoría de ambientes geoquímicos, hacen que el cromo permanezca acumulado y se concentre en los suelos.

Molibdeno: Los suelos que presentan niveles de Mo por encima de los límites de referencia (**Tabla 17**), se ubican en la cuenca baja del río (**Figura 17, Tabla 18**) en los municipios de Anapoima (69 mg/kg), Anolaima, Apulo (61 mg/kg), Cachipay (97 mg/kg), La Mesa, Mesitas del Colegio (29 mg/kg) y Tocaima (35mg/kg). Las altas concentraciones de éste elemento en los suelos puede relacionarse con los aportes de lodolitas calcáreas presentes en gran parte de ésta zona. La presencia de arcillas y de iones carbonato heredados del material parental, brindan condiciones favorables para la acumulación y retención de Mo en los suelos.

Níquel: Los suelos más enriquecidos en Ni se ubican en la cuenca baja (**Figura 18, Tabla 18**), en Anapoima, (189 y 161mg/kg), Cachipay (154mg/kg), Tocaima (141 mg/kg) y La Mesa (95mg/kg). El origen de éste elemento puede relacionarse con los aportes de cenizas volcánicas como fuente natural y con residuos antropogénicos especialmente provenientes de fertilizantes, lodos residuales y emisiones de tráfico, entre otros. La presencia de arcillas en los suelos y las condiciones de pH predominantemente básico, actúan como barreras geoquímicas que retienen y concentran Ni en los suelos.

Zinc: Las mayores concentraciones de Zn se presentaron (**Figura 19, Tabla 18**) en suelos de la Cuenca Baja, en Anapoima (697, 709, 425 y 608mg/kg), Apulo (431, 586, 437mg/kg), y Cachipay (671mg/kg). En algunos puntos de la Cuenca alta se encontraron altas concentraciones de Zn en suelos de Tausa (154mg/kg), Bogotá (209 y 304 mg/kg), Tenjo (563 mg/kg), Bojacá (200 mg/kg) y Zipaquirá (221 mg/kg). El origen del zinc además de ser geogénico (proveniente de variados materiales naturales tales como arcillolitas y lodolitas, de las formaciones Guadalupe y Guaduas en la Cuenca alta y de lutitas principalmente en la Cuenca Baja), está relacionado con residuos de la actividad antrópica que se desarrolla en toda la cuenca. Las principales actividades antrópicas que pueden ser fuente de zinc se relacionan con emisiones de tráfico (desgaste de llantas), residuos de pesticidas, fungicidas y emisiones de diversas industrias. Las condiciones de pH casi neutro o básico que prevalece en los suelos que poseen altas concentraciones de cinc, tanto en la cuenca alta como en la cuenca baja, así como la presencia de arcillas en los suelos y de materia orgánica en algunos de ellos, brindan condiciones favorables para que éste elemento se acumule y permanezca en los suelos.

Cobre: Solamente en tres de los sitios de muestreo se encontraron suelos con contenidos de cobre que superan los valores de referencia (**Tabla 17**), cerca de Bogotá y en los municipios de Viotá y Anapoima ($Cu > 140$ mg/kg) (**Figura 20, Tabla 18**). El cobre provisto por fuentes naturales es enriquecido por aporte de actividades agropecuarias y de residuos industriales y domésticos. La presencia de arcillas que favorecen fenómenos de adsorción y el pH neutro a básico que presentan dos de los suelos que poseen altas concentraciones de cobre, actúan como barreras geoquímicas que fijan y concentran éste elemento en los suelos. Llamen la atención los suelos de Viotá (246-29), en donde las condiciones ácidas (pH 4.5) propiciarían la existencia de formas móviles de cobre, sin embargo los altos aportes que recibe de los residuos agrícolas (uso del suelo para cultivos

de café) y la existencia de arcillas, permiten acumular altas concentraciones de éste elemento.

Figura 15. Sitios con contenidos de arsénico en suelos mayores que el valor de referencia.

Figura 16. Sitios con contenidos de cromo en suelos mayores que el valor de referencia

Figura 17. Sitios con contenidos de molibdeno en suelos mayores que el valor de referencia

Figura 18. Sitios con contenidos de níquel en suelos mayores que el valor de referencia

Figura 19. Sitios con contenidos de cinc en suelos mayores que el valor de referencia

Figura 20. Sitios con contenidos de cobre en suelos mayores que el valor de referencia

Cadmio: Altas concentraciones de cadmio se encuentran en varios de los suelos recolectados en la cuenca del río Bogotá (**Figura 21, Tabla 18**). En la Cuenca alta (Sabana de Bogotá) se presentan suelos desarrollados sobre depósitos cuaternarios (mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos hidrogénicos) que poseen concentraciones de cadmio por encima del valor de referencia, en Bogotá (5,8; 3,7; y 2,8 mg/kg), Bojacá (8,7 mg/kg), Cajicá (1,4 mg/kg), Facatativa (2,7mg/kg), Funza (3,7mg/kg) y Madrid (3,2 mg/kg), entre otros. En las Cuencas Alta y Baja, se encontraron suelos desarrollados sobre arcillolitas, lodolitas calcáreas y lutitas, que presentan niveles de cadmio por encima del valor de referencia, en Anapoima (19,2; 17,8; 8,8 y 9,4 mg/kg); Apulo (14,8; 8,3 mg/kg); Cachipay (13,5 mg/kg); La Mesa (10,9; 6,8; 6,4) y (3,8 mg/kg); Tenjo (6,1 mg/kg) y Tocaima (11,1; 4,7 mg/kg).

Geoquímicamente el cadmio es un elemento de movilidad media y altamente dependiente del pH, así en suelos con pH ácido su movilidad aumenta, mientras que por encima de 7,5 prácticamente se inmoviliza. Además, en suelos con altos contenidos de materiales arcillosos, óxidos de hierro, alofanos e imogolitas, prevalecen los fenómenos de adsorción que hacen que el elemento sea retenido y concentrado. Adicionalmente la presencia de materia orgánica provee condiciones para la formación de quelatos que contribuyen a la retención y acumulación del elemento.

En la cuenca baja principalmente, el material parental (lutitas) puede estar aportando Cd a los suelos y las actividades antrópicas contribuyen a su enriquecimiento. Además de los aportes geogénicos, la alta concentración de Cd, puede estar relacionada principalmente con aporte antrópico de actividades agropecuarias por uso de aguas del río Bogotá para riego y por aplicación de agroquímicos. Otras fuentes antrópicas de cadmio son fertilizantes, agroquímicos, tráfico vehicular (llantas y exhostos) y lodos y aguas residuales.

Plomo: El plomo se encuentra ampliamente distribuido en los suelos de la cuenca del río Bogotá, sin embargo en la mayoría de los sitios muestreados, su concentración permanece dentro del rango reportado como normal para suelos arcillosos y limosos (**Tabla 16**). A pesar de lo anterior, el Pb se encontró en concentraciones que están por encima del límite de referencia (**Tabla 17**) en estaciones cercanas a Bogotá (Pb 168 mg/kg) y a La Calera (Pb 95 mg/kg) (**Figura 22, Tabla 18**), en suelos desarrollados sobre depósitos cuaternarios con mantos de ceniza volcánica. El plomo no presenta asociación evidente con los demás elementos analizados, dando indicios de origen por actividades antrópicas, más que por aportes geogénicos naturales. La gran actividad industrial de la ciudad de Bogotá y la densa red vial que existe en ésta zona (dispersión por vía eólica y aporte de residuos de gasolina con Pb), son actividades que aportan plomo a los suelos, situación que unida a la presencia de materiales arcillosos en los suelos, contribuyen a su retención y acumulación in situ.

Figura 21. Sitios con contenidos de cadmio en suelos mayor que el valor de referencia.

Figura 22. Sitios con contenido de plomo en suelos mayor que el valor de referencia

5.7 ELEMENTOS TRAZA EN AGUAS Y SU RELACION CON SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ

Con fines comparativos y como complemento de la información obtenida en suelos, se revisaron los datos existentes sobre contenido de metales en aguas de cuerpos acuosos superficiales, reservorios y tabla de agua ubicados en diferentes sitios de la cuenca del río Bogotá. Los datos colectados en estudios anteriores, están disponibles y sirven de soporte para analizar procesos, vías de dispersión y acumulación de los elementos químicos y estudiar la sinergia natural que existe entre los suelos y aguas de la zona estudiada.

Se consideraron datos de metales en aguas superficiales de cuerpos acuosos localizados en la cuenca del río Bogotá, los cuáles fueron obtenidos en el levantamiento de cartografía geoquímica de baja densidad en 16 sitios de la plancha 5-09 y en 54 sitios de la plancha 209 que se relacionan en la Tabla 19 (Vargas y Otros, 2001; INGEOMINAS, 2004). También se consideraron datos de contenidos de metales traza en 18 muestras de aguas superficiales de la cuenca alta del río Bogotá, obtenidos en un programa adelantado por la EAAB en convenio con JICA de Japón, Tabla 20 (JICA-EAAB, 2002), y de 55 muestras de agua tomadas por la EAAB en la Fase II del programa de aforo y muestreo (Tabla 21).

Finalmente, se tuvieron en cuenta datos de metales para veinte sitios de muestreo de aguas colectadas del nivel freático, canales y reservorios usados para riego de pastos y cultivos, los cuáles fueron obtenidos en un trabajo preliminar adelantado por INGEOMINAS en la cuenca alta del río Bogotá (González y Vargas, 1996) (Tabla 22).

Las muestras de agua superficial colectadas en los 16 puntos localizados a lo largo de la cuenca del río Bogotá (Plancha 5-09), muestran niveles de metales bajos en comparación con los valores máximos permisibles, establecidos para evaluar calidad de agua potable en Colombia (Decreto 475/98) y con los máximos valores establecidos por la WHO, (1996) para aguas de consumo humano (Tabla 19). Las muestras con las características anteriores corresponden principalmente a la quebrada La Turbia (Sesquilé); río Bahamón (Cachipay); quebrada La Carbonera (La Mesa); quebrada La Honda (Tena); quebrada Socha (La Calera) y río Tunjuelito (Usme).

En éstos municipios los valores de metales en suelos también se encuentran en concentraciones bajas, con excepción de Mo (5 ppm) en la cuenca de la Q. La Turbia (Sesquilé); Cd (2,7 mg/kg), Mo (22 mg/kg), Ni (54 mg/kg) y Zn (208 mg/kg) en la Q. la Honda (Tena), en donde se superan los máximos de referencia (Tabla 17). La concentración de éstos elementos en los suelos se explica por la presencia de materiales que los adsorben (arcillas) y fijan (materia orgánica, oxi-hidróxidos, iones carbonato) e impiden su movilidad hacia las corrientes acuosas, en las que como se explicó no se presentan altas concentraciones de éstos elementos.

Tabla 19 Contenido de metales en drenajes de la cuenca del río Bogotá (Planchas 5-09 y 209)

Tabla 19 continuación

Tabla 20 Concentración de metales en aguas superficiales de la cuenca alta del río Bogotá
(JICA-EAAB, 2002)

Tabla 21. Concentración de metales en aguas tomadas por la EAAB en la Fase II de su programa de aforo y muestreo

Tabla 22. Contenido de metales en aguas del nivel freático, canales y reservorios en algunos sitios de la Sabana de Bogotá

A diferencia de lo anterior, el plomo se encontró en concentraciones que superan los valores de referencia para aguas, en el río Cubillos (Cogua) en donde los suelos han concentrado Mo; en los ríos Tejar y Bogotá (Chocontá); río Subachoque en donde los suelos han concentrado Zn y Cd; en el río Susagua (Zipaquirá) en donde los suelos han concentrado Cd; en el río Curi - pH 8.1 (Anolaima) en donde los suelos han acumulado Zn, Mo y Cd; y en el río Bogotá - pH 7 (Soacha). La presencia de Pb en las aguas de estos ríos podría estar relacionada con aportes residuales de transporte vehicular (gasolina) o con residuos industriales, agrícolas (fertilizantes) y de hidrocarburos. La no correspondencia en acumulación de los mismos elementos en aguas y suelos, puede estar evidenciando que no existe un aporte permanente de elementos de suelos hacia las aguas y viceversa.

El Pb y el Ni se presentaron en niveles superiores a los valores de referencia en las aguas del río Chicú con pH 7.4, cerca de Cota, en donde los suelos presentan niveles altos de Cd. La presencia de Pb y Ni en las aguas de éste río puede relacionarse como en el caso anterior, además de posible fuente natural, con aporte antrópico.

Los elementos Cd y Mo se presentan en altas concentraciones en suelos de la cuenca de la quebrada Cachimbulo con pH 8.4 cerca de Viotá, sin embargo las condiciones básicas de las aguas en este sector y los contenidos de arcillas y iones carbonato presentes en los suelos, pueden contribuir a la retención de los elementos impidiendo su transferencia al medio acuoso, en donde se encuentran en concentraciones menores.

Aunque el Mo se presenta en altas concentraciones en suelos de la cuenca de las quebradas Suaza (Villapinzón) y La Viuda (Tausa) y el Zn en suelos de la quebrada Guandoque (Tausa) y río Negro (Zipaquirá), las aguas colectadas en éstas cuencas no presentaron altos contenidos de tales elementos.

Hacia las partes altas de la cuenca, en el norte de la Sabana de Bogotá, Plancha 209, (Tabla 20), en Tausa, Suesca, y Nemocón, varias corrientes transportan en sus aguas metales por encima de los niveles de referencia: Mn en Las Juntas, pH 6.7, (209-28); Ni y Mn en La Alberca, pH 7.1, (209-42); Cd, Co, Mn, Ni en El Chorrillo, pH 3.5, (209-52); Cd, Co, Mn, Ni y Zn en Charco de Nutria pH - 3,0 (209-54) y Co, Mn, Ni en Perico, pH 3.2, (209-65). Los elementos anteriores no se presentan en altas concentraciones en los suelos muestreados en dichas cuencas, lo que podría indicar que las aguas reciben elementos de origen geogénico en su nacimiento (arcillolitas laminadas grises, con capas de carbón, que se localizan en las partes mas altas al norte de Cogua, Nemocón y Suesca) y por las condiciones de pH ácido a neutro permanecen en forma soluble, son transportados y dispersados, junto con los aportes antropogénicos, aguas abajo de su fuente.

Si se comparan los niveles de metales encontrados en las aguas superficiales de la cuenca del río Bogotá (planchas 5-09 y 209), incluyendo aguas de éste río, con valores considerados como normales para aguas dulces no contaminadas, (US-EPA, 1999, **Tabla 19**), varios de los elementos analizados presentan concentraciones superiores a dichos niveles: Cd en las quebradas Charco de Nutria y El Chorrillo; Cu en los ríos Curí, Chicú y Bogotá; Ni en las quebradas El Chorrillo, Charco de Nutria, Perico y Chicú; Pb en las quebradas Charco de Nutria, La Honda, Socha y ríos Bogotá en Chocontá y en Soacha;

Cubillos, Tejar, Subachoque, Susagua, Curí, Chicú; y Zn en las quebradas Charco de Nutria, Perico y ríos Chicú y Bogotá en Soacha. El origen de las altas concentraciones de estos elementos en aguas superficiales puede estar relacionado con aporte geológico de materiales naturales presentes en sus cuencas de captación así como con aportes de actividades antrópicas. Para discriminar la fuente de dichos elementos, recomendar usos del agua y definir si cada uno de los cuerpos acuosos está impactado por actividades antrópicas o si las altas concentraciones tienen origen geogénico, es necesario adelantar estudios detallados que discriminen especies químicas y vías de dispersión y acumulación de los elementos.

Al comparar los niveles de metales en suelos, con las concentraciones en aguas, en los mismos puntos o en puntos cercanos (Tablas 23 y 24), se observa que no existe correspondencia en niveles de acumulación, de tal modo que los puntos en los que un elemento sobrepasa los límites en aguas son diferentes a los puntos en los que se acumula en altos niveles en los suelos. Lo anterior podría estar indicando que el origen de los metales acumulados en cada medio es diferente, o que por las propiedades geoquímicas intrínsecas de cada medio, algunos elementos permanecen preferencialmente solubles en aguas mientras que otros son fijados y retenidos en los suelos. Para conocer cuáles son los procesos que intervienen en la movilidad de los elementos, es necesario adelantar estudios detallados por cuencas, no solo para suelos y aguas, sino que se deben incluir sedimentos y rocas, a los cuales se les debe realizar análisis químicos especiales (especiación) y mineralógicos de caracterización, que permitan identificar origen, cargas, especies químicas, vías y formas de acumulación de los elementos.

Las muestras tomadas en el programa JICA-EAAB, (2002) en los ríos Teusacá, San Cristóbal, Checua, Neusa, Subachoque, Andes, Frío y en diferentes puntos del cauce del río Bogotá (Tabla 20), no presentaron metales traza en niveles superiores a los máximos admisibles por las normas de referencia (Decreto 475/98, Decreto 1594/84, WHO/96), lo que podría ser indicio de que las aguas del río Bogotá y de sus afluentes, aunque pueden aportar elementos durante su uso en riego de cultivos, no son la fuente principal de metales traza para los suelos de éstas localidades que han acumulado concentraciones importantes de estos metales.

Tabla 23. Comparación de contenidos de metales en aguas y suelos de la cuenca del río Bogotá

Tabla 23. Continuación

Tabla 24. Resumen de elementos que sobrepasan los límites de referencia para aguas y suelos en drenajes en los que existen datos para los dos componentes

Muestra	Cuerpo acuoso	Elementos en aguas	Elementos en suelos
209-23	Q. Sonsa		Mo
209-26	Q. Guandoque		Zn
209-38	Q. La Viuda		Mo
209-52	Q. Nutria	Cd, Co, Mn, Ni, Pb, Zn	
209-54	Q. El Chorrillo	Cd, Co, Mn, Ni	
209-65	Q. Perico	Co, Mn, Ni, Zn	
209-74	R. Negro		Zn
209-87	R. Bogotá (alto)	Pb	
5-09-105	R. Cubillos	Pb	Mo
5-09-107DC	R. Tejar	Pb	
5-09-107ND	R. Bogotá (alto)	Pb	
5-09-120	R. Subachoque	Pb	Cd, Zn
5-09-121	R. Susagua	Pb	Cd
5-09-122	Q. La Turbia		Mo
5-09-135	R. Curí	Pb	Cd. Mo. Zn
5-09-136	R. Chicú	Cu, Ni, Pb, Zn	Cd
5-09-151	Q. La Honda	Pb	Cd. Mo. Ni, Zn
5-09-153	Q. Socha	Pb	
5-09-166	Q. Cachimbulo		Cd. Mo
5-09-167	R. Bogotá (bajo)	Cu, Pb, Zn	

Q. Quebrada

R. Río

Además de lo anterior, existen otros estudios que reportan concentraciones altas de Hg, As y Pb en aguas del río Bogotá (Memorando Técnico No.188-7.5-004 de la EAAB, 1979), (**Tabla 2**); así como altos niveles de Cr, Pb, Hg, Ni y Cd en las aguas del mismo río (CAR, 1986) (**Tabla 3**); y niveles altos de Cd, Cr, Cu, Pb, Zn y Ni en aguas de sus afluentes, ríos Juan Amarillo, Tunjuelito y Fucha (**Tabla 4**).

Los niveles de As, Cd, Co, Mn, Ni y Pb, en muestras de la tabla de agua, canales y aguas de riego en los municipios de Bojacá y Facatativa (**Tabla 22**), sobrepasan los límites máximos de referencia para aguas, aunque en concentraciones mucho menores que las encontradas en los respectivos suelos con los cuáles se encuentran íntimamente en contacto. En estos suelos los niveles de metales, aunque superiores a los encontrados en las respectivas aguas, están en general por debajo de los niveles de referencia (**Tabla 17**), excepto en dos puntos ubicados en Bojacá y Facatativá, en donde se ha acumulado As y Cd, cuyo origen además de geogénico, puede relacionarse con actividades agropecuarias desarrolladas intensamente en éstas zonas. La dispersión de elementos de los suelos a las aguas sub-superficiales es natural y evidente y por las condiciones en general reductoras existentes en la tabla de agua, las formas solubles son inestables y los elementos se precipitan o permanecen en los suelos.

Con los datos disponibles, no es posible descartar que una de las fuentes de metales para algunos suelos, sean las aguas del río Bogotá que son empleadas para riego, las cuáles reciben aportes de diversas actividades antrópicas a lo largo de su curso; sin embargo se requieren estudios más detallados para establecer vías y etapas de dispersión y acumulación de éstos elementos, cuya presencia es producto de procesos evolutivos que mantienen el equilibrio suelo-agua en las condiciones climáticas y edáficas actuales de la cuenca.

6. CONCLUSIONES

Para tener una visión de los diferentes aspectos analizados en el estudio, se presentan algunas conclusiones de acuerdo con las temáticas tratadas en el informe.

Distribución espacial de elementos trazas

- ? Las metodologías establecidas y aplicadas en éste trabajo (diseño de muestreo, colecta de muestras, análisis químico y procesamiento de datos), demostraron su utilidad y efectividad para estudiar el comportamiento geoquímico de elementos químicos en suelos de la cuenca del río Bogotá y para delimitar zonas de acumulación que merecen estudios detallados de los procesos geoquímicos en que interviene cada elemento.
- ? La concentración actual, movilidad y acumulación de elementos en suelos de la cuenca del río Bogotá, como es natural, han sido determinadas por las condiciones fisicoquímicas del material parental y de los productos de meteorización resultantes (pH, potencial redox, mineralogía, presencia de arcillas, entre otras), por condiciones climáticas y por la calidad y propiedades de los aportes antropogénicos recibidos.
- ? La distribución de elementos en suelos de la Cuenca del río Bogotá diferencia dos zonas: una zona en la que se presentan las más altas concentraciones para la mayoría de los elementos y que corresponde a la **Cuenca Baja** del río y una zona que va desde el nacimiento del río, en Villapinzón, hasta el embalse del Muña en Sibaté, caracterizada por presentar concentraciones mas bajas para casi todos los elementos y que corresponde a la **Cuenca Alta**.
- ? No obstante lo anterior, en algunas localidades de la Cuenca Alta se encontraron concentraciones importantes de Cd, Cu, Pb y Mn, cuya presencia además de ser de origen geogénico, puede relacionarse con emisiones del transporte automotor especialmente en el caso de Pb y Mn; así como con aportes de residuos de agroquímicos y de actividades pecuarias e industriales para el caso de Cd, Cu y Mn.
- ? Los análisis estadísticos multivariados, análisis factorial y de conglomerados jerárquicos permitieron diferenciar tres grupos de asociación de elementos, los cuáles corresponden a asociaciones naturales propias de los tipos de rocas presentes en la zona estudiada y a la vez son comunes en muchos residuos de actividades antrópicas industriales y agropecuarias: **Grupo 1.** As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni y Zn; **Grupo 2.** Co y Mn y **Grupo 3.** Pb cuyo comportamiento es independiente de los demás elementos.

- ? El comportamiento independiente del Pb, puede indicar origen principalmente antrópico, como producto de emisiones de gasolina antiguamente adicionada con plomo y de actividades industriales desarrolladas en la zona.
- ? Es posible que el agua del río Bogotá, sea, junto con otras actividades antrópicas (agricultura, ganadería, industria), fuente de metales para los suelos de la Cuenca del río Bogotá.
- ? Los aportes naturales del material parental (lodolitas, lutitas, cenizas volcánicas, entre otros), contribuyen a la concentración de los metales en los suelos de la zona de estudio, con especial importancia en localidades de la Cuenca Baja.

Influencia de parámetros fisicoquímicos en el comportamiento de los metales trazas

- ? Los valores de pH permiten diferenciar dos zonas que coinciden, en rasgos generales con la cuenca alta y la cuenca baja del río Bogotá. En la cuenca baja, en donde se acumulan mayores niveles de metales predomina pH con tendencia básica (6.6 - 9.0); mientras que en la cuenca alta en la cuál los metales se encuentran en menores concentraciones predomina pH con tendencia ácida (4.0 - 6.5).
- ? En la cuenca baja los suelos alcalinos predominan en zonas caracterizadas por la presencia de rocas clásticas limoarcillosas con intercalaciones de calizas, las cuáles además de heredar características alcalinas a los suelos, aportan carbonatos, material arcilloso y metales tales como As, Cr, Cu, Mn, Mo y Zn.
- ? El predominio de suelos con pH ácido y neutro en la cuenca alta, favorece la existencia de fases móviles de Cu, Ni, Zn, Co, Mo, As y Cd, mientras en la cuenca baja del río, el pH más alto puede causar su precipitación y acumulación en los suelos.
- ? Para la cuenca alta en particular, por sus características topográficas, por el uso intensivo del suelo y de las aguas subterráneas y por las condiciones de pH de sus suelos, se recomienda estudiar en detalle todos los parámetros físicos y químicos que determinan vías, dispersión y acumulación de los elementos químicos, es decir estudiar su geoquímica específica como base para recomendar medidas que eviten la migración de elementos potencialmente peligrosos hacia cuerpos acuosos superficiales y profundos.
- ? En sitios específicos de la parte central de la cuenca alta del río Bogotá, se presenta material arcilloso fino, que actúa como barrera geoquímica para la migración de los elementos químicos en profundidad. La presencia de material arcilloso y materia orgánica actúan sinérgicamente, a pesar de las condiciones de acidez, dando como resultado acumulación de cantidades importantes de elementos de origen geogénico y antrópico en algunos suelos de la cuenca alta.

- ? En la cuenca baja, la existencia de material arcilloso y las condiciones de pH alcalino, se complementan para aumentar la precipitación y concentración de los elementos en forma de sales, hidróxidos u otros compuestos insolubles.
- ? La presencia de colores negro y marrón grisáceo oscuro en algunos de los suelos de la cuenca baja, puede relacionarse con la presencia de arcillas, (lutitas, limolitas y arcillolitas negras), que por su origen presentan alto contenido de material carbonoso. También los colores oscuros de los suelos de la cuenca alta pueden relacionarse con la presencia de complejos órgano-minerales, materiales húmicos y minerales de bajo ordenamiento cristalino, provenientes de ceniza volcánica (material parental), presentes en varios sectores de ésta zona.
- ? La presencia de materiales provenientes de cenizas volcánicas fue confirmada con la prueba de Fieldes y Perrot, en suelos de la cuenca alta (alrededores de Zipacón, Tenjo y La Calera).
- ? El clima, es uno de los factores determinantes en la ocurrencia de procesos en los suelos, y sus condiciones diferentes en cada zona estudiada, sirven para explicar la mayor acumulación de elementos que se presenta en los suelos de la cuenca baja y el empobrecimiento o menor concentración de elementos en la cuenca alta del río Bogotá.

Acumulación de elementos traza

- ? En los suelos de la cuenca alta del río, los elementos traza se presentan en general, en concentración inferior a los máximos a partir de los cuáles, se considera que pueden afectarse las propiedades o la calidad de uso de los suelos.
- ? El cadmio es el elemento que se presenta enriquecido en mayor número de localidades de la cuenca alta. Su origen además de aporte natural, se relaciona con residuos de agroquímicos, riego con aguas residuales del río Bogotá, emisiones y residuos industriales que existen en ésta zona.
- ? Elementos como Zn, Cr y Pb, presentan altas concentraciones en algunos suelos de la cuenca alta, sin embargo a diferencia del Cd su distribución es muy local y se puede asociar a fuentes específicas en su zona de ocurrencia.
- ? En la cuenca baja del río Bogotá, el Cd, Cr, Ni, Zn y Mo, son los elementos que con mayor frecuencia se encuentran por encima de los límites que definen calidad de uso del suelo. El origen de éstos elementos se puede relacionar con los aportes de sus materiales parentales (principalmente lodolitas con intercalaciones de calizas, arcillolitas lodosas no calcáreas, lodolitas calcáreas); con los aportes de actividades antropogénicas, especialmente uso de agroquímicos; con residuos de actividades industriales y de transporte, y con el uso de agua del río Bogotá para riego de cultivos.
- ? Los suelos de la cuenca baja están influenciados por la composición del material parental (principalmente lodolitas calcáreas) que les confieren elementos químicos y

condiciones geoquímicas propicias para su acumulación en los suelos: pH neutro a básico que privilegia especies químicas inmóviles (Cu, Cd, Ni, Zn, Co, Mn y Pb), presencia de materiales arcillosos que favorecen fenómenos de adsorción e intercambio y presencia de iones carbonato que permiten la formación de coprecipitados (en especial de Cd, Cu y Zn). Adicionalmente las actividades agrícola y ganadera, así como el riego con aguas del río Bogotá, contribuyen a enriquecer y concentrar los elementos químicos en los suelos de ésta región.

Relación suelo - agua

- ? Al comparar los niveles de metales en suelos, con las concentraciones en aguas, en los mismos puntos o en puntos cercanos en la misma cuenca, se observa que no existe correspondencia en niveles de acumulación. Los sitios en los cuales un elemento sobrepasa los límites en aguas son diferentes a los puntos en los que se acumula en altos niveles en los suelos, indicando que el origen de los metales que se han acumulado en cada medio puede ser diferente, o que por las propiedades geoquímicas intrínsecas de cada medio, algunos elementos permanecen preferencialmente solubles en aguas mientras que otros son fijados y retenidos en los suelos.
- ? Los datos presentados en los informes de los programas JICA-EAAB, (2002) y EAAB Fase II (año) en los ríos Teusacá, San Cristobal, Checua, Neusa, Subachoque, Andes, Frío y en diferentes puntos del cauce del río Bogotá, no presentaron metales traza en niveles superiores a los máximos admisibles por normas de referencia nacionales e internacionales, indicando que las aguas del río Bogotá y de sus afluentes, aunque pueden aportar elementos debido a su uso en riego de cultivos, no son la fuente principal de metales traza para los suelos de éstas localidades.
- ? Otros estudios reportan concentraciones altas de Hg, As y Pb en aguas del río Bogotá (EAAB, 1979), así como altos niveles de Cr, Pb, Hg, Ni y Cd en las aguas del mismo río (CAR, 1986) y Cd, Cr, Cu, Pb, Zn y Ni en aguas de sus afluentes, ríos Juan Amarillo, Tunjuelito y Fucha.
- ? En muestras de la tabla de agua, canales y aguas de riego en los municipios de Bojacá y Facatativa, se encontraron niveles de elementos traza, que sobrepasan los límites máximos de referencia. En suelos los niveles de metales encontrados en algunos puntos de esta zona, pueden tener origen, en las actividades agropecuarias desarrolladas en éstas zonas, además de geogénico.
- ? Con los datos disponibles, no es posible descartar que una de las fuentes de metales para algunos suelos, sean las aguas del río Bogotá que son empleadas para riego, las cuáles reciben aportes de diversas actividades antrópicas a lo largo de su curso; sin embargo no es posible establecer vías y etapas de dispersión y acumulación de éstos elementos, cuya presencia es producto de procesos evolutivos que mantienen el equilibrio suelo-agua en las condiciones climáticas y edáficas actuales de la cuenca.

7. REFERENCIAS

- ACOSTA, J.; ULLOA, C. 1996. Memoria explicativa de la geología de la Plancha 208 Villeta. INGEOMINAS. Bogotá
- ACOSTA, J.; ULLOA, C. 1997. Memoria explicativa de la geología de la Plancha 227 Bogotá Nor-occidente. INGEOMINAS, Informe 2302. Santa Fe de Bogotá.
- ACOSTA, J.; ULLOA, C. 1998. Geología de la plancha 246 Fusagasuga. INGEOMINAS, Informe 2374. Santa Fe de Bogotá.
- ACOSTA, J., ULLOA, C., 1999. Mapa geológico del Departamento de Cundinamarca, INGEOMINAS, Bogotá.
- ACOSTA, J.; GUATAME, R.; CAICEDO, J.; CARDENAS, J. 2000. Geología de la Plancha 245 Girardot. INGEOMINAS, Informe 2474. Santa Fe de Bogotá.
- CÁCERES, C.; ETAYO-SERNA, F. 1969. Bosquejo geológico de la región del Tequendama. Guía de la excursión pre-congreso. Primer Congreso. Col. Geol. Colombia. 5-22 p. Bogotá.
- CAR, 1995. Diagnóstico físicoquímico y biológico del embalse del Muña. Bogotá
- CAR, 2000A. Manejo integral de cuencas, cuenca hidrográfica del río Bogotá. Un CD. Bogotá.
- CAR, 2000B. Plan de ordenamiento territorial de la cuenca alta del río Bogotá. Bogotá.
- CAR, 2001. Programa de monitoreo de la calidad del agua del río Bogotá desde el municipio de Villapinzón hasta la planta de tratamiento de TIBITOC. Regional Sabana norte y Almeidas, 60 p. Bogotá.
- CAR-BID, 1992. Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Bogotá, Ubaté y Suárez. Programa de saneamiento ambiental de la cuenca alta del Río Bogotá. Proyecto CAR-BID. Informe Inicial. 25p.
- CAR-HASKONING, 1986. Plan maestro de calidad de aguas superficiales. Informe CAR, Bogotá.

- CARVAJAL, 2003. Presente y futuro ambiental de la región. En: Contraloría de Bogotá. 2003. La huella ecológica de Bogotá D.C.: Cálculo y evaluación de su utilidad, 28 p. Bogotá.
- DE PORTA, J. 1965. Estratigrafía del Cretácico Superior y Terciario en el extremo sur del Valle Medio del Magdalena. UIS: Bol. Geol., 19: 5-50. Bucaramanga.
- DARNLEY, A.G.; Björklund, A.; Bølviken, B.; Gustavsson, N.; Koval, P.V.; Plant, J.A.; Steenfelt, A.; Tauchid, M.; Xie, Xuejing; Garrett, R.G. & Hall, G.E.M. 1995. *A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management: Recommendations for International Geochemical Mapping. Final report of IGCP Project 259. 2nd revised edition. Paris: UNESCO, 122p.*
- DUCHAUFOR, P. 1987. Manual de Edafología. Editorial Mason.
- E.A.A.B., 1979. Memorando Técnico No. 188-7.5-004. Calidad del agua del río Bogotá, Empresa de Acueducto y Alcantarillado. Bogotá.
- ETAYO-SERNA, F. 1968. El Sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas. U. Nacional., Geol. Col., 5: 5-74. Bogotá
- ETAYO-SERNA, F. 1979. *Zonation of the Cretaceous of central Colombia by ammonites.* INGEOMINAS, Pub. Geol. Esp., 2:1-186. Bogotá.
- GAVIRIA, S. 1999. Caracterización de los procesos de alteración geoquímica de formaciones superficiales en la cuenca del río Bogotá. INGEOMINAS. Informe interno. Bogotá.
- GONZÁLEZ, L. M. 1997. Estudio de la contaminación por metales traza en suelos de la Sabana de Bogotá. Trabajo de Tesis. Magíster en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil. Santa Fe de Bogotá.
- GONZÁLEZ, L. M.; GARCÍA F. 1986. Guía para el tratamiento estadístico de datos geoquímicos. INGEOMINAS. Informe interno. Bogotá.
- GONZÁLEZ, L.M; GARCÍA, G. 2001. Manual para el procesamiento de datos en geoquímica. Versión 1.5. INGEOMINAS. Informe Interno. Bogotá,
- GONZÁLES, S.; MEJIA, L. 1995. Contaminación por cadmio en suelos y hortalizas de un sector de la cuenca del río Bogotá. Revista Suelos Ecuatoriales. Bogotá.
- GONZÁLEZ, L. M.; VARGAS, O. 1997. Estudio de la movilización de contaminantes en suelos de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS. Informe Interno. Bogotá.

- GONZÁLEZ, L.M.; VARGAS, O. 1998. Estudio de parámetros reguladores de la retención de metales pesados en suelos de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS. Bogotá D.C.
- HOLLAND, H.D. and TUREKIAN, K.K. 2003. *Treatise on Geochemistry, Vol 9, Environmental Geochemistry. Vol Ed. Barbara Sherwood Lollar.*
- HOORN, C. 1998. *Quebrada del Mochuelo, type locality of the Bogota formation: a sedimentológicas, petrographical and palynological study. Hugo de Vries Laboratory, University of Amsterdam. 21 p. Amsterdam.*
- HOORN, C.; KAANDORP, P.; ROELE, J. 1987. *Tertiary sediments of the Usme Valley, Colombia: A palynological and stratigraphical approach. Hugo de Vries Laboratory, University of Amsterdam. 21 p. Amsterdam.*
- IGAC, 1990. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. V ed., Bogotá D.C.
- IGAC, 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Cundinamarca. Bogotá.
- INGEOMINAS, 2004. Levantamiento geoquímico en la plancha 209 (en elaboración). Bogotá.
- JULIVERT, M. 1963. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de estructuras. UIS. Bol. Geol.,13-14:5-102. Bucaramanga.
- MATAMOROS A., 1998. Especiación química y movilidad de los elementos Pb, Ni, Cr, Cd, Co, V en tres suelos agrícolas de la Sabana de Bogotá. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Bogotá.
- MEJÍA, L., 1995. Calidad de las aguas de riego. Generalidades sobre las características y composición de las aguas del río Bogotá utilizadas para riego. Memorias primer seminario de impacto ambiental en proyectos agrícolas y energéticos. Bogotá.
- MEJÍA, L., 1998. Degradación de suelos y cultivos por contaminación con elementos traza y pesados derivados de diversas fuentes en Colombia. En: Encuentro nacional de labranza y conservación, p 97-143. Memorias. Corpoica. Villavicencio.
- MONTOYA, D.; REYES, G. 2003. Geología de la plancha 209 Zipaquirá. INGEOMINAS, Informe inédito. Bogotá.
- MORALES, P. G., 1998. Distribución de metales pesados y compuestos poliaromáticos en sedimentos de fondo de los ríos Magdalena y Bogotá. Tesis de maestría UFPA, Brasil. Belem Brasil.
- PÉREZ, G.; SALAZAR A. 1978. Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. U. Nal. Geol. Col., 10:7-113. Bogotá.

- PRIETO, G.; GONZÁLEZ, L. M.; VARGAS, O.; ESPINOSA, A. 2000. Manual de campo para el Atlas Geoquímico de Colombia. INGEOMINAS, Bogotá.
- PRIETO G; MATAMOROS A; GONZALEZ L.M.; VARGAS O., 2003. Norma. Muestreo de suelos para estudio de procesos geoquímicos. INGEOMINAS, Bogotá.
- PLUMLEE & ZIEGLER, 2003. *The Medical Geochemistry of Dusts, soils and other Herat materials in: Treatise on Geochemistry, V.9, Environmental Geochemistry. Holland H.D. & Turekian K.K. Eds. Elsevier Publisher.*
- QUIROGA, B.C. y otros, 2000. Diagnóstico de niveles de contaminación por plaguicidas y metales pesados en los cultivos de hortalizas en la localidad de Bosa. Informe final. Secretaria Distrital de Salud de Bogotá. Bogotá.
- REIMMAN, C.; et. al. 1998. *Environmental Geochemical Atlas of the Central Barents Region. Geological Survey of Norway. Trondheim.*
- RENZONI, G. 1981. Geología del cuadrángulo J-12 Tunja. Instituto Nacional de Investigaciones Geológicas Mineras. Informe 1546. Bol. Geol. 24(2): 33-48. Bogotá.
- REYES M., 1999. Evaluación de la capacidad de protección ambiental de la materia orgánica de suelos de la Sabana de Bogotá y su relación con el contenido de los metales pesados. Tesis de pregrado en Química. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- SALMINEN, R., Tarvainen T., Demetriades A., Duris M., Fordyce F., 1998. *FOREGS Geochemical Mapping Field Manual. Geological Survey of Finland, Guide 47, ESPOO. 45p.*
- SARMIENTO, G. 1994. Estratigrafía y Medios del depósito de la Formación Guaduas. INGEOMINAS, Pub. Geol. Esp., 20. 1-44. Bogotá
- SARMIENTO, M. I. y otros. 2002. Evaluación del impacto de la contaminación del embalse del Muña sobre la salud humana. En: Revista Medicina, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- SECRETARÍA DE SALUD DE BOGOTÁ, 2000. Diagnóstico de niveles de contaminación por plaguicidas y metales pesados en los cultivos de hortalizas. localidad de Bosa-Bogotá.
- THOMPSON Y HOWARD, 1973. A new approach to the estimation of analytical precision. Journal of geochemical exploration, 9, p. 23-30

- VAN DER HAMMEN, T. 1998. Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá: análisis y orientaciones para el ordenamiento territorial. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. CAR. Bogotá.
- VARGAS, O. 1995. Evaluación del grado de contaminación por mercurio y plomo en suelos de un sector de la cuenca alta del Río Bogotá y su incidencia en el cultivo de hortalizas. Santafé de Bogotá. Trabajo de tesis. Magíster en Suelos. Universidad Nacional de Colombia.
- VARGAS, O.; MEJÍA, L. 1998. Evaluación de la contaminación por Hg y Pb en suelos hortícolas de la Sabana de Bogotá y del efecto del Hg y Pb del agua de riego y de los suelos en varias hortalizas. Suelos Ecuatoriales, Vol. 28. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá.
- VARGAS, O.; GONZALEZ, L.M.; PRIETO, G.; ESPINOSA, A.; MATAMOROS A.; SÁNCHEZ, L.H.; PERILLA, C.E.; GARZÓN, T.; GARCÍA, G.I. 2001. Levantamiento geoquímico en la Plancha 5-09 – Informe Técnico. INGEOMINAS, Bogotá.

ANEXO 2.
Resultados del análisis químico de suelos

ANEXO 4

CONTROL DE CALIDAD ANALITICA

ESTIMACIÓN DE PRECISIÓN

Tabla 1. Estimación de precisión en la determinación de elementos Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Mo, en suelos de la Cuenca del río Bogotá por el *Método 1*

Cd							
Muestras	x	y	d	d2	Abs[x-y]	(x+y)/2	DR
1	1,9	1,4	0,50	0,25	0,50	1,65	0,30
2	0,4	0,8	-0,40	0,16	0,40	0,60	0,67
3	1,6	2,0	-0,40	0,16	0,40	1,80	0,22
4	2,3	2,5	-0,20	0,04	0,20	2,40	0,08
5	1,4	1,2	0,20	0,04	0,20	1,30	0,15
6	1,4	0,4	1,00	1,00	1,00	0,90	1,11
7	1,0	1,7	-0,70	0,49	0,70	1,35	0,52
8	0,3	0,5	-0,20	0,04	0,20	0,40	0,50
9	1,0	0,8	0,20	0,04	0,20	0,90	0,22
10	1,0	0,5	0,50	0,25	0,50	0,75	0,67
11	0,5	0,7	-0,20	0,04	0,20	0,60	0,33
Sumatoria d2	2,51						
2n	22						
S	0,34						
Promedio d	1,15						
CV	29						
DR Prom.	0,43						

Cu							
Muestras	x	y	d	d2	Abs[x-y]	(x+y)/2	DR
1	18	18	0,00	0,00	0,00	18,00	0,00
2	49	48	1,00	1,00	1,00	48,50	0,02
3	38	39	-1,00	1,00	1,00	38,50	0,03
4	25	25	0,00	0,00	0,00	25,00	0,00
5	28	27	1,00	1,00	1,00	27,50	0,04
6	16	21	-5,00	25,00	5,00	18,50	0,27
7	31	34	-3,00	9,00	3,00	32,50	0,09
8	26	31	-5,00	25,00	5,00	28,50	0,18
9	16	15	1,00	1,00	1,00	15,50	0,06
10	22	22	0,00	0,00	0,00	22,00	0,00
11	28	31	-3,00	9,00	3,00	29,50	0,10
12	20	19	1,00	1,00	1,00	19,50	0,05
13	13	13	0,00	0,00	0,00	13,00	0,00
14	19	15	4,00	16,00	4,00	17,00	0,24
15	21	21	0,00	0,00	0,00	21,00	0,00
16	16	22	-6,00	36,00	6,00	19,00	0,32
Sumatoria d2	125						
2n	32						
S	1,98						
Promedio d	24,97						
CV	8						
DR Prom.	0,07						

Mn							
Muestras	x	y	d	d2	Abs[x-y]	(x+y)/2	DR
1	597	556	41	1681	41	577	0,07
2	132	141	-9	81	9	137	0,07
3	293	279	14	196	14	286	0,05
4	162	177	-15	225	15	170	0,09
5	478	513	-35	1225	35	496	0,07
6	653	701	-48	2304	48	677	0,07
7	65	60	5	25	5	63	0,08
8	134	136	-2	4	2	135	0,01
9	75	76	-1	1	1	76	0,01
10	38	40	-2	4	2	39	0,05
11	711	696	15	225	15	704	0,02
12	332	339	-7	49	7	336	0,02
13	91	101	-10	100	10	96	0,10
14	49	47	2	4	2	48	0,04
15	252	254	-2	4	2	253	0,01
16	146	163	-17	289	17	155	0,11

Sumatoria	
d2	6417,00
2n	32
S	14,16
Promedio d	272,60
CV	5
DR Prom.	0,05

Ni							
Muestras	x	y	d	d2	Abs[x-y]	(x+y)/2	DR
1	36	33	3,0	9,0	3,0	35	0,09
2	25	25	0,0	0,0	0,0	25	0,00
3	14	14	0,0	0,0	0,0	14	0,00
4	11	13	-2,0	4,0	2,0	12	0,17
5	18	19	-1,0	1,0	1,0	19	0,05
6	10	10	0,0	0,0	0,0	10	0,00
7	14	12	2,0	4,0	2,0	13	0,15
8	5	6	-1,0	1,0	1,0	6	0,18
9	41	44	-3,0	9,0	3,0	43	0,07
10	23	17	6,0	36,0	6,0	20	0,30
11	14	17	-3,0	9,0	3,0	16	0,19
12	12	15	-3,0	9,0	3,0	14	0,22
13	15	15	0,0	0,0	0,0	15	0,00
14	9	13	-4,0	16,0	4,0	11	0,36
15	28	34	-6,0	36,0	6,0	31	0,19
16	17	21	-4,0	16,0	4,0	19	0,21

Sumatoria	
d2	150
2n	32
S	2,17
Promedio d	18,73
CV	12
DR Prom.	0,13

Pb							
Muestras	x	y	d	d2	Abs[x-y]	(x+y)/2	DR
1	13	13	0,0	0,0	0,0	13	0,00
2	33	33	0,0	0,0	0,0	33	0,00
3	21	22	-1,0	1,0	1,0	22	0,05
4	17	18	-1,0	1,0	1,0	18	0,06
5	41	36	5,0	25,0	5,0	39	0,13
6	9	13	-4,0	16,0	4,0	11	0,36
7	10	9	1,0	1,0	1,0	10	0,11
8	32	20	12,0	144,0	12,0	26	0,46
9	23	25	-2,0	4,0	2,0	24	0,08
10	11	13	-2,0	4,0	2,0	12	0,17
11	9	10	-1,0	1,0	1,0	10	0,11
12	21	16	5,0	25,0	5,0	19	0,27
13	26	29	-3,0	9,0	3,0	28	0,11
14	18	27	-9,0	81,0	9,0	23	0,40
15	33	24	9,0	81,0	9,0	29	0,32
16	31	30	1,0	1,0	1,0	31	0,03

Sumatoria d2	394
2n	32
S	3,51
Promedio d	20,83
CV	17
DR Prom.	0,17

Zn							
Muestras	x	y	d	d2	Abs[x-y]	(x+y)/2	DR
1	21	20	1,0	1,0	1,0	21	0,05
2	148	147	1,0	1,0	1,0	148	0,01
3	117	120	-3,0	9,0	3,0	119	0,03
4	63	61	2,0	4,0	2,0	62	0,03
5	96	97	-1,0	1,0	1,0	97	0,01
6	40	42	-2,0	4,0	2,0	41	0,05
7	129	136	-7,0	49,0	7,0	133	0,05
8	175	175	0,0	0,0	0,0	175	0,00
9	45	47	-2,0	4,0	2,0	46	0,04
10	35	31	4,0	16,0	4,0	33	0,12
11	57	65	-8,0	64,0	8,0	61	0,13
12	44	42	2,0	4,0	2,0	43	0,05
13	28	28	0,0	0,0	0,0	28	0,00
14	32	32	0,0	0,0	0,0	32	0,00
15	17	18	-1,0	1,0	1,0	18	0,06
16	154	154	0,0	0,0	0,0	154	0,00

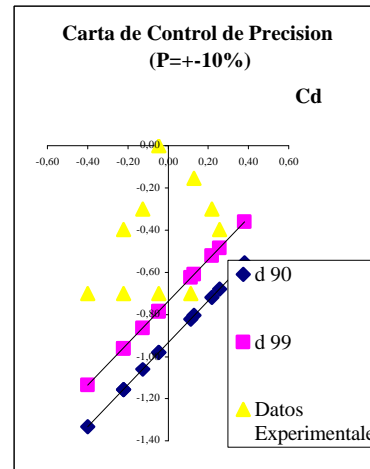
Sumatoria d2	158
2n	32
S	2,22
Promedio d	70,27
CV	3
DR Prom.	0,04

Mo							
Muestras	x	y	d	d2	Abs[x-y]	(x+y)/2	DR
1	4	6	-2,00	4,00	2,00	5	0,40
2	3	3	0,00	0,00	0,00	3	0,00
3	3	3	0,00	0,00	0,00	3	0,00
4	4	2	2,00	4,00	2,00	3	0,67
5	4	6	-2,00	4,00	2,00	5	0,40
6	3	1	2,00	4,00	2,00	2	1,00
7	5	4	1,00	1,00	1,00	5	0,22
8	4	2	2,00	4,00	2,00	3	0,67
9	15	18	-3,00	9,00	3,00	17	0,18
10	2	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00
11	5	3	2,00	4,00	2,00	4	0,50
12	29	31	-2,00	4,00	2,00	30	0,07
13	1	2	-1,00	1,00	1,00	2	0,67
14	4	2	2,00	4,00	2,00	3	0,67
15	2	2	0,00	0,00	0,00	2	0,00

Sumatoria d2	43
2n	30
S	1,20
Promedio d	5,83
CV	21
DR Prom.	0,36

Tabla 2. Estimación de precisión en la determinación de elementos Cd, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Mo, en suelos de la Cuenca del río Bogotá, por el **Método 2**

Cd									
x	y	(x+y)/2	Abs[x-y]	d90	d99	log(x+y)/2	log d90	Log d99	Log Abs[x-y]
1,9	1,4	1,65	0,5	0,19	0,30	0,22	-	-	-0,30
0,4	0,8	0,60	0,4	0,07	0,11	-0,22	-	-	-0,40
1,6	2,0	1,80	0,4	0,21	0,33	0,26	-	-	-0,40
2,3	2,5	2,40	0,2	0,28	0,44	0,38	-	-	-0,70
1,4	1,2	1,30	0,2	0,15	0,24	0,11	-	-	-0,70
1,4	0,4	0,90	1,0	0,10	0,16	-0,05	-	-	0,00
1,0	1,7	1,35	0,7	0,16	0,25	0,13	-	-	-0,15
0,3	0,5	0,40	0,2	0,05	0,07	-0,40	-	-	-0,70
1,0	0,8	0,90	0,2	0,10	0,16	-0,05	-	-	-0,70
1,0	0,5	0,75	0,5	0,09	0,14	-0,12	-	-	-0,30
0,5	0,7	0,60	0,2	0,07	0,11	-0,22	-	-	-0,70

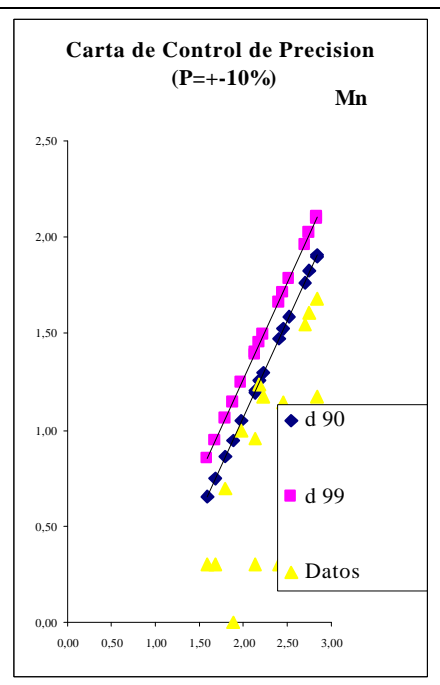


Cu									
x	y	(x+y)/2	Abs[x-y]	d90	d99	log(x+y)/2	log d90	Log d99	Log Abs[x-y]
49,0	48,0	48,50	1,0	5,64	8,83	1,69	0,75	0,95	0,00
38,0	39,0	38,50	1,0	4,48	7,01	1,59	0,65	0,85	0,00
28,0	27,0	27,50	1,0	3,20	5,01	1,44	0,50	0,70	0,00
16,0	21,0	18,50	5,0	2,15	3,37	1,27	0,33	0,53	0,70
31,0	34,0	32,50	3,0	3,78	5,92	1,51	0,58	0,77	0,48
26,0	31,0	28,50	5,0	3,31	5,19	1,45	0,52	0,72	0,70
16,0	15,0	15,50	1,0	1,80	2,82	1,19	0,26	0,45	0,00
28,0	31,0	29,50	3,0	3,43	5,37	1,47	0,54	0,73	0,48
20,0	19,0	19,50	1,0	2,27	3,55	1,29	0,36	0,55	0,00
19,0	15,0	17,00	4,0	1,98	3,10	1,23	0,30	0,49	0,60
16,0	22,0	19,00	6,0	2,21	3,46	1,28	0,34	0,54	0,78

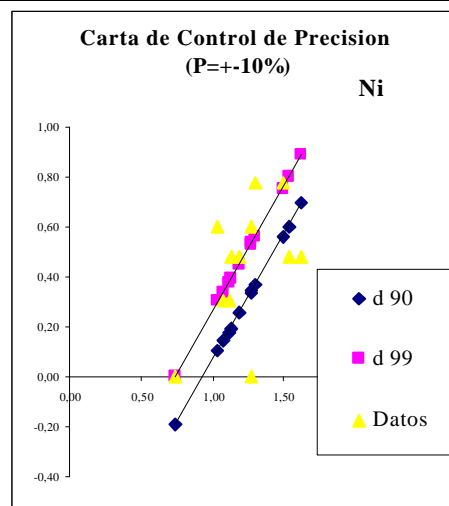
Carta de Control de Precision (P=±10%) Cu

Mn									
x	y	(x+y)/2	Abs[x-y]	d90	d99	log(x+y)/2	log d90	Log d99	Log Abs[x-y]
597	556	577	41,0	67,05	105,01	2,76	1,83	2,02	1,61
132	141	137	9,0	15,87	24,86	2,14	1,20	1,40	0,95
293	279	286	14,0	33,26	52,09	2,46	1,52	1,72	1,15
162	177	170	15,0	19,71	30,87	2,23	1,29	1,49	1,18
478	513	496	35,0	57,63	90,26	2,70	1,76	1,96	1,54
653	701	677	48,0	78,74	123,32	2,83	1,90	2,09	1,68
65	60	63	5,0	7,27	11,38	1,80	0,86	1,06	0,70
134	136	135	2,0	15,70	24,59	2,13	1,20	1,39	0,30

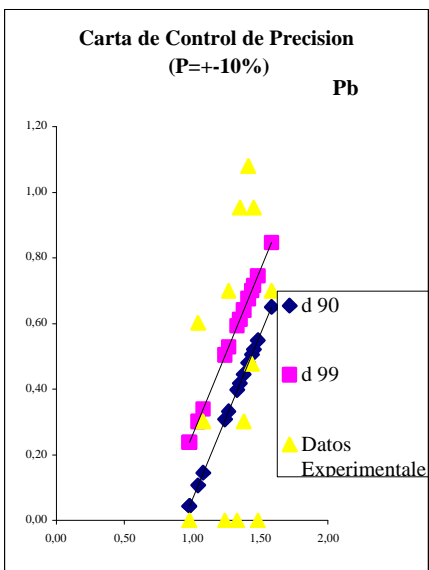
75	76	76	1,0	8,78	13,7 5	1,88	0,94	1,14	0,00
38	40	39	2,0	4,54	7,10	1,59	0,66	0,85	0,30
71 1	69 6	704	15,0	81,8 2	128, 14	2,85	1,91	2,11	1,18
33 2	33 9	336	7,0	39,0 2	61,1 1	2,53	1,59	1,79	0,85
91	10 1	96	10,0	11,1 6	17,4 9	1,98	1,05	1,24	1,00
49	47	48	2,0	5,58	8,74	1,68	0,75	0,94	0,30
25 2	25 4	253	2,0	29,4 2	46,0 8	2,40	1,47	1,66	0,30
14 6	16 3	155	17,0	17,9 7	28,1 4	2,19	1,25	1,45	1,23



Ni									
x	y	(x+y) /2	Abs[x -y]	d9 0	d9 9	log (x+y) /2	log d90	Log d99	Log Abs[x -y]
36, 0	33, 0	34,5 0	3,0	4,0 1	6,2 8	1,54	0,60	0,80	0,48
11, 0	13, 0	12,0 0	2,0	1,4 0	2,1 9	1,08	0,14	0,34	0,30
18, 0	19, 0	18,5 0	1,0	2,1 5	3,3 7	1,27	0,33	0,53	0,00
14, 0	12, 0	13,0 0	2,0	1,5 1	2,3 7	1,11	0,18	0,37	0,30
5,0	6,0	5,50	1,0	0,6 4	1,0 0	0,74	- 0,19	0,00	0,00
41	44	42,5 0	3,0	4,9 4	7,7 4	1,63	0,69	0,89	0,48
23, 0	17, 0	20,0 0	6,0	2,3 3	3,6 4	1,30	0,37	0,56	0,78
14, 0	17, 0	15,5 0	3,0	1,8 0	2,8 2	1,19	0,26	0,45	0,48
12, 0	15, 0	13,5 0	3,0	1,5 7	2,4 6	1,13	0,20	0,39	0,48
9,0	13, 0	11,0 0	4,0	1,2 8	2,0 0	1,04	0,11	0,30	0,60
28, 0	34, 0	31,0 0	6,0	3,6 1	5,6 5	1,49	0,56	0,75	0,78
17, 0	21, 0	19,0 0	4,0	2,2 1	3,4 6	1,28	0,34	0,54	0,60

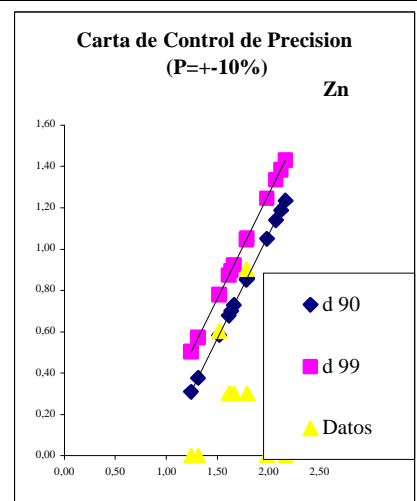


Pb									
x	y	(x+y)/2	Abs[x-y]	d90	d99	log(x+y)/2	log d90	Log d99	Log Abs[x-y]
21,0	22,0	21,5	1,0	2,5	3,9	1,33	0,40	0,59	0,00
17,0	18,0	17,5	1,0	2,0	3,1	1,24	0,31	0,50	0,00
41,0	36,0	38,5	5,0	4,4	7,0	1,59	0,65	0,85	0,70
9,0	13,0	11,0	4,0	1,2	2,0	1,04	0,11	0,30	0,60
10,0	9,0	9,50	1,0	1,1	1,7	0,98	0,04	0,24	0,00
32,0	20,0	26,0	12,0	3,0	4,7	1,41	0,48	0,68	1,08
23,0	25,0	24,0	2,0	2,7	4,3	1,38	0,45	0,64	0,30
11,0	13,0	12,0	2,0	1,4	2,1	1,08	0,14	0,34	0,30
9,0	10,0	9,50	1,0	1,1	1,7	0,98	0,04	0,24	0,00
21,0	16,0	18,5	5,0	2,1	3,3	1,27	0,33	0,53	0,70
26,0	29,0	27,5	3,0	3,2	5,0	1,44	0,50	0,70	0,48
18,0	27,0	22,5	9,0	2,6	4,1	1,35	0,42	0,61	0,95
33,0	24,0	28,5	9,0	3,3	5,1	1,45	0,52	0,72	0,95
31,0	30,0	30,5	1,0	3,5	5,5	1,48	0,55	0,74	0,00

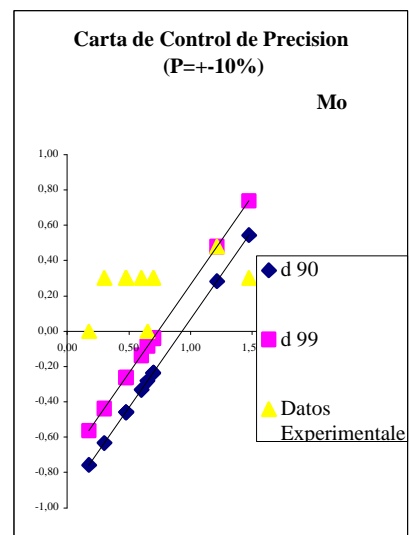


Zn									
x	y	(x+y)/2	Abs[x-y]	d90	d99	log(x+y)/2	log d90	Log d99	Log Abs[x-y]
21	20	21	1,0	2,38	3,73	1,31	0,38	0,57	0,00
148	147	147,5	1,0	17,1	26,87	2,17	1,23	1,43	0,00
117	120	118,5	3,0	13,7	21,58	2,07	1,14	1,33	0,48
63	61	62	2,0	7,21	11,29	1,79	0,86	1,05	0,30
96	97	96,5	1,0	11,2	17,58	1,98	1,05	1,24	0,00
40	42	41	2,0	5	7	1,61	0,68	0,87	0,30

12	13			15,4					
9	6	133	7,0	1	24,13	2,12	1,19	1,38	0,85
45	47	46	2,0	5,35	8,38	1,66	0,73	0,92	0,30
35	31	33	4,0	3,84	6,01	1,52	0,58	0,78	0,60
57	65	61	8,0	7,09	11,11	1,79	0,85	1,05	0,90
44	42	43	2,0	5,00	7,83	1,63	0,70	0,89	0,30
17	18	18	1,0	2,04	3,19	1,24	0,31	0,50	0,00



Mo									
x	y	(x+y)/2	Abs[x-y]	d90	d99	log(x+y)/2	log d90	Log d99	Log Abs[x-y]
4,0	6,0	5,00	2,0	0,58	0,91	0,70	-	-	0,30
4,0	2,0	3,00	2,0	0,35	0,55	0,48	0,46	0,26	0,30
4,0	6,0	5,00	2,0	0,58	0,91	0,70	0,24	0,04	0,30
3,0	1,0	2,00	2,0	0,23	0,36	0,30	0,63	0,44	0,30
5,0	4,0	4,50	1,0	0,52	0,82	0,65	0,28	0,09	0,00
4,0	2,0	3,00	2,0	0,35	0,55	0,48	0,46	0,26	0,30
15,0	18,0	16,50	3,0	1,92	3,01	1,22	0,28	0,48	0,48
5,0	3,0	4,00	2,0	0,42	0,73	0,60	0,33	0,14	0,30
29,0	31,0	30,00	2,0	3,49	5,46	1,48	0,54	0,74	0,30
1,0	2,0	1,50	1,0	0,17	0,27	0,18	0,76	0,56	0,00
4,0	2,0	3,00	2,0	0,35	0,55	0,48	0,46	0,26	0,30



ESTIMACIÓN DE EXACTITUD

Tabla 3. Estimación de exactitud en la determinación de As, Co y Cr, por Activación Neutrónica, en suelos de la Cuenca del río Bogotá

Elemento	As	Co	Cr
Valor Certificado o Recomendado	ppm 2.280	ppm 64	ppm 140
Valores Experimentales	2.120	62	128
	2.150	64	135
	2.190	65	140
	2.150	64	135
	2.230	65	130
	2.160	66	136
	2.250	63	141
	2.150	66	140
	2.190	66	137
	2.210	62	155
	2.220	62	143
	2.310	65	152
Mediana	2.210	65,0	143
Media	2.216	64,2	145
Desviación Estándar	58,99	2,05	7,77
Log Valor Experimental	3,3	1,8	2,2
Log Valor Certificado	3,4	1,8	2,1
Recorrido W	190	3,0	24,0
%DER	2,7	3,2	5,4
% Error	3,1	-1,6	-2,1
? log C	-0,01	0,01	0,01
$T_{i\ exp}$	0,34	0,07	0,23
$T_{i\ teorico}$	0,23	0,23	0,23

Tabla 4. Estimación de exactitud en la determinación de Cu, Mn, Ni, Ob, y Zn, por Espectroscopia de Emisión con Plasma Inductivamente Acoplado ICP-OES, en suelos de la Cuenca del río Bogotá

