

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO  
GARAVITO**

---

---

**ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y  
MEDIO AMBIENTE**

**METALES PESADOS EN EL AGUA LLUVIA**

**T R A B A J O D E G R A D O**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**Especialista en Recursos Hidráulicos y  
Medio Ambiente**

**P R E S E N T A:**

**Diana Margarita Hernández Avilés**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Ing. Jairo Alberto Romero Rojas**

**Bogotá D.C. Diciembre 2016**

## TABLA DE CONTENIDO.

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ANTECEDENTES.....	2
3.	METALES PESADOS EN AGUA LLUVIA .....	4
3.1	Plomo.....	4
3.2	Arsénico.....	7
3.3	Cadmio .....	9
3.4	Cromo .....	11
3.5	Cobre.....	13
3.6	Zinc.....	16
3.7	Níquel .....	19
3.8	Selenio.....	21
3.9	Mercurio.....	22
3.10	Plata.....	23
3.11	Antimonio.....	23
3.12	Hierro.....	24
3.13	Aluminio .....	26
3.14	Bario .....	28
3.15	Vanadio.....	29
3.16	Manganeso .....	31
3.17	Molibdeno .....	32
3.18	Cobalto .....	33
3.19	Titanio .....	35
4.	RESUMEN DE RESULTADOS.....	36
5.	NORMAS PARA REÚSO DE AGUA LLUVIA.....	40
5.1	Norma para agua potable. ....	40
5.2	Norma para uso agrícola.....	41
5.3	Norma para uso industrial .....	43
5.4	Norma para uso pecuario.....	43
5.5	Norma para otros usos.....	44
6.	CONCLUSIONES.....	46

7. REFERENCIAS .....	47
7.1 Artículos científicos.....	47
7.2 Tesis.....	51
7.3 Libros.....	51
7.4 Documentos inéditos .....	51
7.5 Memorias de congresos.....	52
7.6 Páginas web.....	52

### ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Comparación de concentraciones de Plomo en el agua lluvia en diferentes países del mundo. ....	37
Figura 2. Comparación de concentraciones de Cadmio en el agua lluvia en diferentes países del mundo. ....	37
Figura 3. Comparación de concentraciones de Cobre en el agua lluvia en diferentes países del mundo. ....	38
Figura 4. Comparación de concentraciones de Zinc en el agua lluvia en diferentes países del mundo. ....	38
Figura 5. Comparación de concentraciones de Hierro en el agua lluvia en diferentes países del mundo. ....	39
Figura 6. Comparación de concentraciones de aluminio en el agua lluvia en diferentes países del mundo. ....	39

### ÍNDICE TABLAS.

Tabla 1. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Plomo en el agua lluvia .....	5
Tabla 2. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Arsénico en el agua lluvia. ....	8
Tabla 3. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cadmio en el agua lluvia. ....	9
Tabla 4. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cromo en el agua lluvia.....	12
Tabla 5. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cobre en el agua lluvia.....	13
Tabla 6. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Zinc en el agua lluvia. ....	16
Tabla 7. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Níquel en el agua lluvia. ....	20
Tabla 8. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Selenio en el agua lluvia.....	21
Tabla 9. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Mercurio en el agua lluvia. ....	22
Tabla 10. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Plata en el agua lluvia.....	23
Tabla 11. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Antimonio en el agua lluvia. ....	23

Tabla 12. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Hierro en el agua lluvia .....	24
Tabla 13. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de aluminio en el agua lluvia .....	27
Tabla 14. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de bario en el agua lluvia.....	29
Tabla 15. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de vanadio en el agua lluvia. ....	30
Tabla 16. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Manganeso en el agua lluvia. ....	31
Tabla 17. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de molibdeno en el agua lluvia. ....	33
Tabla 18. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cobalto en el agua lluvia. ....	34
Tabla 19. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de titanio en el agua lluvia. ....	35
Tabla 20. Resultados de metales pesados en agua lluvia. ....	36
Tabla 21. Valores máximos permisibles para agua potable en $\mu\text{g/L}$ .....	41
Tabla 22. Valores máximos permisibles para uso agrícola en $\mu\text{g/L}$ .....	42
Tabla 23. Valores máximos permisibles para agua riego de áreas verdes en $\mu\text{g/L}$ .....	42
Tabla 24. Valores máximos permisibles para uso industrial en $\mu\text{g/L}$ .....	43
Tabla 25. Valores máximos permisibles para agua de uso pecuario en $\mu\text{g/L}$ .....	44
Tabla 26. Valores máximos permisibles para agua de uso para preservación de flora y fauna y consumo directo para ganado en $\mu\text{g/L}$ .....	45

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El proyecto final titulado "*Metales pesados en el agua lluvia*" presentado por la estudiante Diana Margarita Hernández Avilés, en cumplimiento del requisito parcial para optar por el título de Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, fue aprobado por el Director del Proyecto.

---

Ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas

Director de Proyecto

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta investigación es realizar una revisión literaria de metales pesados en el agua lluvia a nivel mundial. De conformidad con lo anterior, el contenido de este trabajo está dividido en tres capítulos principales: (i) la identificación de metales pesados comunes en el agua lluvia y comparar la composición de esta misma en diferentes sitios del mundo; (ii) las concentraciones promedio de metales pesados en el agua lluvia obtenidos a partir de la revisión literaria; (iii) Comparación de valores permisibles de metales pesados en el agua teniendo como referente técnico diferentes normas nacionales e internacionales de calidad de agua potable y reúso. Los resultados de este trabajo identificaron cuatro metales pesados en el agua lluvia que son perjudiciales, por lo que se hace necesario que nuevas investigaciones sean enfocadas en el estudio de técnicas para remover metales pesados en el agua lluvia.

## 2. ANTECEDENTES

Un sistema de recolección y almacenamiento de aguas lluvias para el abastecimiento de agua potable, riego de cultivos y recarga de acuíferos es una práctica comúnmente utilizada en zonas rurales en la cuales no existe un fácil acceso o hay ausencia parcial o total del recurso. En zonas urbanas, el abastecimiento de agua potable no es un problema, en especial en ciudades grandes donde existen más de una planta de tratamiento de agua potable, sin embargo, algunas edificaciones han tomado la iniciativa de aplicar un sistema de recolección de aguas lluvias como alternativa sostenible para el suministro de diversos usos pero no para consumo humano.

Los proyectos de aprovechamiento de las aguas lluvias en varias regiones rurales, islas o lugares de extrema pobreza como Australia (Huston *et al.*, 2012; Morrow *et al.*, 2007), Sudáfrica (Gichuki y Mason, 2013), Kenia (Wetangula y Wamalwa, 2015), Ghana (Cobbina *et al.*, 2015), Nigeria (Eletta y Oyeyipo, 2008) y Vietnam (Wilbers *et al.*, 2013) resultan ser la única forma viable de obtener agua potable, sin embargo, la presencia de compuestos químicos disueltos en el agua lluvia muchas veces es desconocida al momento de utilizar este recurso hídrico como alternativa. El agua lluvia se considera insegura para consumir e incluso puede ser limitado su uso para otros propósitos cuando es recolectada en zonas urbanas industrializadas o con alta densidad de tráfico. La importancia de determinar la presencia de metales pesados en el agua lluvia es debido a que muchas investigaciones han concluido que existe una relación notable entre las enfermedades crónicas como insuficiencia renal, cirrosis hepática, pérdida de cabello y anemia crónica, causado por la presencia de metales pesados comunes potencialmente peligrosos como Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), molibdato (Mo), Níquel (Ni) y Cromo (Cr) y el agua para consumo humano (Salem *et al.*, 2000). Chowdhury *et al.*, (2016) menciona que las poblaciones que reutilizan el agua lluvia para consumo humano sin un previo tratamiento pueden estar expuestas a metales pesados que tienen un comportamiento bioacumulable en el cuerpo humano (en lípidos y el sistema gastrointestinal) y pueden inducir a enfermedades crónicas como el cáncer y otros riesgos.

La contaminación del agua lluvia está directamente relacionada con el grado de contaminación del medio ambiente debido a que esta recoge las impurezas de aire a través de la lluvia que es posteriormente recolectada en un sistema de captación y almacenamiento. Comúnmente, las cubiertas o tejados de edificios y casas son utilizados como área de captación de agua lluvia. Estas superficies pueden ser de material compuesto por aleaciones metálicas, arcilla e incluso asbesto. El tipo de cubierta resulta ser un parámetro crítico y debe ser evaluado teniendo en cuenta que estos pueden causar un aumento en la contaminación del agua lluvia. Durante varios años, autores como Yaziz *et al.* (1989), Foster (1996), Chang *et al.* (2004), Eletta y Oyeyipo (2008), Torres *et al.* (2011), Lee *et al.* (2012) Magyar *et al.* (2014) y Duarte (2014) han evaluado la influencia del material de las cubiertas en la concentración de metales pesados en el agua lluvia y sus resultados son reportados en esta revisión.

Las personas que consumen el agua lluvia con trazas de metales pesados pueden o no estar expuestos a los riesgos anteriormente mencionados teniendo en cuenta varias fuentes de contaminación en la atmósfera como los medios de transporte y las actividades industriales (Garcia *et al.*, 2006; Halstead *et al.*, 2000; Kulshrestha *et al.*, 2003), el transporte de aerosoles (Mouli *et al.*, 2005) o los residuos del transporte aéreo (Smith *et al.*, 1999). Las posibilidades de detectar metales pesados en el agua lluvia son mayores sí esta tiene contacto con elementos o superficies de captación contaminadas. Autores como Zhu *et al.* (2004), Eletta y Oyeyipo (2008), Magyar *et al.* (2014) comprobaron que algunos materiales utilizados en los sistemas de captación, la antigüedad y la corrosión de las cubiertas vinculadas al material metálico inducen a que el agua lluvia sea contaminada por metales pesados, lo que permite que algunas veces esta misma agua no cumpla con los estándares de agua potable de la organización mundial de la salud (OMS, 2006). Otros autores como Smith *et al.* (1999) consideran que las fuentes puntuales de contaminación del agua lluvia se encuentran antes de que esta entre en contacto con la superficie de recolección. En áreas rurales donde la contaminación atmosférica no es generalmente un problema severo se debe de igual forma tomar precauciones debido a que otra forma de contaminación atmosférica es por medio del transporte de contaminantes a larga distancia causada por la acción de los vientos (Garnaud *et al.*, 1999; Khare *et al.*, 2004; Kulshrestha *et al.*, 2003).

Un fenómeno relevante para estudiar la presencia de metales pesados en el agua lluvia recolectada y almacenada es la lluvia ácida. La lluvia ácida es causada principalmente por la incorporación de elementos como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> causados por fuentes antropogénicas (Das *et al.*, 2005; Migliavacca *et al.*, 2005). Autores como Gould (1999), Migliavacca *et al.* (2004), Báez *et al.* (2007) y Magyar *et al.* (2014) mencionan que los niveles de pH bajos en el agua lluvia pueden lixiviar metales pesados en los tanques de almacenamiento.

Al-Khashman (2009) menciona que la mayor concentración de metales pesados se observa al comienzo de la temporada de lluvias o después de periodos de sequía, debido a que grandes cantidades de polvo acumulado en la atmósfera son atrapados por la lluvia. En contraste, los valores de metales pesados son bajos cuando la lluvia ocurre continuamente durante varios días.



### 3. METALES PESADOS EN EL AGUA LLUVIA

Los metales pesados se caracterizan por ser compuestos inorgánicos no biodegradables. Existen diferentes factores que definen si un elemento es un metal pesado como el peso atómico, las propiedades químicas y la toxicidad (Järup, 2003); sin embargo, un factor generalmente determinante es la densidad del elemento. Los metales pesados son comúnmente aquellos que tienen una densidad específica mayor a 5 g/cm.

La agencia de protección ambiental de EE.UU (USEPA, Siglas en inglés) ha reportado una lista de compuestos químicos tóxicos prioritarios para la regulación de la calidad del agua (EPA, 2015). La lista contiene metales pesados como el Antimonio, Arsénico, Berilio, Cadmio, Cromo, Cobre, Plomo, Mercurio, Níquel, Selenio, Plata y Zinc. Adicionalmente, se reporta el Manganeseo como contaminantes peligrosos del aire. A diferencia de algunos metales pesados tóxicos mencionados, existen comúnmente trazas de metales esenciales en el agua lluvia como el Cobalto, Hierro, Manganeseo, Selenio y Zinc a concentraciones bajas permiten el desempeño de funciones normales del cuerpo y funcionan como catalizadores para actividades enzimáticas (Salem *et al.*, 2000).

A continuación se describirán los metales pesados que comúnmente se encontraron en estudios acerca de la composición química del agua lluvia en diferentes locaciones del mundo desde el año 1982.

#### 3.1 Plomo (Pb)

La presencia de Plomo en el agua lluvia se relaciona con las emisiones principalmente generadas por el transporte. El Plomo puede presentarse por deposición seca y húmeda (Polvo y agua lluvia). Algunos techos utilizados como superficies de captación son recubiertos con pintura a base de Plomo lo que permite el aumento de este contaminante en el agua lluvia. Actualmente, el Plomo ha sido eliminado de los combustibles, pinturas, tuberías y soldaduras, sin embargo, el revestimiento y desgaste de los neumáticos sigue siendo una fuente importante de Plomo en la atmosfera y en el agua lluvia (Magyar *et al.*, 2014). Este mismo autor menciona que un pH bajo en el agua lluvia afecta directamente la concentración de Plomo disuelto, induciendo un aumento de este contaminante en el agua lluvia. El Plomo puede entrar al ambiente a través de la explotación de minas de Plomo y otros metales, y desde fábricas que manufacturan o utilizan Plomo, aleaciones de Plomo o compuestos de Plomo. Una vez que el Plomo entra a la atmósfera, puede viajar largas distancias si las partículas de Plomo son muy pequeñas. El Plomo es removido del aire por la lluvia. Algunos compuestos del Plomo son transformados en otros compuestos por la luz solar, el aire y el agua. Sin embargo, el Plomo elemental no puede ser degradado.

La Tabla 1 muestra las concentraciones de Plomo en el agua lluvia. A pesar de que en las últimas décadas se ha intentado inhabilitar el uso de Plomo, se ha encontrado recientemente niveles altos de Plomo que pueden comprometer la salud humana en países como Malasia, Francia, Taiwán y Colombia (Figura 1), especialmente cuando se utiliza cubiertas con tejas de Hierro galvanizado, Zinc o de fibrocemento como sistema de captación. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que en estos lugares se llevan a cabo actividades industriales y existe un gran flujo de tráfico que contribuye a la contaminación del aire y posteriormente a la de agua lluvia. Es importante resaltar que durante la revisión de la literatura el Plomo es uno de los metales pesados más encontrados en los estudios anteriormente realizados.

Tabla 1. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Plomo en el agua lluvia

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	44	N.E
		Toma directa	N.E	200	5.9
Yaziz et al., 1989	Selangor, Malasia	Cubierta	Teja de Hierro galvanizado y canales en PVC	198.8	6.54
		Cubierta	Cubierta en concreto y canales en PVC	197.4	6.88
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudos y botellas en PE	5.14	N.E
	Colorado, EEUU			1.09	
Vermette et al., 1995	Illinois, EEUU	N.E	Embudos y botellas cubiertas de teflón	0.87	N.E
	Tennessee, EEUU			0.56	
Helmerts y Schrems, 1995	Zona sur, Océano Atlántico	N.E	Embudos y botellas en PE	1.03	5.12
Kaya y Tuncel, 1997	Ankara, Turquía	N.E	N.E	19	N.E
Garnaud et al., 1999	Chatou, Francia	N.E	Botellas de PE	13.5	N.E
Gromaire-Mertz et al., 1999	Paris, Francia	Cubierta	N.E	493	N.E
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta edificio	Embudos y botellas en PE	1.24	4.55
Hernández y Campos, 2002	Ciudad de México	N.E	N.E	23	N.E
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudos y botellas en PE	2.57	6.4
Hu y Balasubramanian, 2003	Singapur	N.E	Tanques colectores de PE de alta densidad	26.9	N.E

Tabla 1. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Plomo en el agua lluvia (Continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Chang et al., 2004	Texas , EEUU	Prototipo de cubierta	Madera	25	5.55
			Aluminio	25	
			Hierro galvanizado	25	
			N.E	25	
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta edificio	Tanque de plástico	0.12	N.E
Garcia et al., 2006	Rancho viejo, México	N.E	Tanque de PE	1.13	4.5
Báez et al., 2007	Ciudad de México	Cubierta edificio	Tanques de PE	2.48	5.08
Morrow et al., 2007	Australia	Tanques de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	3.45	N.E
Eletta y Oyeyipo, 2008	Kwara, Nigeria	Teja nueva	Lamina de Hierro corrugado	10	6.95
		Teja antigua (10 años)		30	
Al-Khashman, 2009	Ghore El-Saf, Jordania	Sistema instalado a 1 m del piso	Embudos de PL y botellas de PE	66	6.9
Basak y Alagha, 2010	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE de alta densidad y tanque de PL	52.52	<5.5
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta de edificio	Tanque de plástico	1710	5.6
Honório et al., 2010	Boa Vista, Amazonas, Brasil	Sistema instalados a 1.5 m del suelo	Embudos y botellas de PE	0.41	4.7
	Manaus, Amazonas, Brasil			0.21	4.1
	Tabatinga, Amazonas, Brasil			0.21	5.1
Sekabira et al., 2010	Kampala, Uganda	Sistema instalados a 1.5 m del suelo	Embudos y botellas de PE	23	N.E
Torres et al., 2011	Sector Soacha, Bogotá, Colombia	Cubierta	Zinc y fibrocemento	311	7.4
	Sector Kennedy, Bogotá, Colombia			227	8

Tabla 1. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Plomo en el agua lluvia (Continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanques de almacenamiento	N.E	5.4	6.1
Lee et al., 2012	Seúl, Corea de Sur	Teja de madera, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	10	6.75
			Tanque recolector	3	6.5
		Teja de arcilla, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	10	7.2
			Tanque recolector	3.5	7.1
			Tanque recolector	3.5	6.2
Van der Sterren et al., 2013	Sídney, Australia	Cubierta y tanque recolector de primera lluvia Cubierta y tanque recolector de lluvia posterior	Acero galvanizado	9	6.16
				11	6.6
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	cubiertas	Paja, asbestos y metal galvanizado	5	7.1
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica Cape Point, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflon	1.5	N.E
				1.2	
Han et al., 2014	Area urbana, China	Toma directa	Botellas plasticas	2	N.E
Lamprea y Ruban, 2014	Ciudad de Nantes, Francia	Toma directa	Embudo de acero inoxidable y tanques plasticos	0.75	6.05
		Cubierta	Tejas de Zinc y canaletas galvanizadas	6.5	
Cobbina et al., 2015	Tamale, Ghana	N.E	Botellas esterilizadas	50	7.4
Wetangula y Wamalwa, 2015	Menengai, Kenya	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	0.31	6.6

*N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno*

### 3.2 Arsénico (As)

El Arsénico es clasificado químicamente como un metaloide, con propiedades tanto de metal como de un elemento no metálico. El Arsénico es en su forma inorgánica es muy tóxico. La organización mundial de la salud (OMS, 2006) menciona que el uso de agua contaminada con Arsénico para consumir, preparar alimentos y regar cultivos representa

una amenaza para la salud pública causando intoxicación crónica. Los altos niveles de concentración de Arsénico en el aire y en el agua lluvia se presentan cuando el área afectada se encuentra influenciada por industrias que utilizan este contaminante como agente de aleación o para el procesamiento de vidrio, pigmentos, textiles, papel y en gran proporción cuando es utilizado como preservativo la para madera. Adicionalmente, existen industrias que utilizan el Arsénico en pequeñas proporciones para la fabricación de plaguicidas y productos farmacéuticos (UNICEF, 2002).

La Tabla 2 muestra las concentraciones de Arsénico en el agua lluvia. Se observa que ningún estudio reporto valores de Arsénico que afecten la salud humana. También, se observa que el tipo de sistema de captación y material para el aprovechamiento de agua lluvias no afectan las concentraciones de Arsénico.

Tabla 2. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Arsénico en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	5.8	N.E
Vermette et al., 1995	Colorado, EEUU	N.E	Embudo y Botella cubiertos de teflón	0.16	N.E
	Illinois, EEUU			0.09	
	Tennessee, EEUU			0.1	
Simmons et al., 2001	Auckland, Nueva Zelanda	Cubierta	N.E	< 5	7.3
Morrow et al., 2007	Australia	Tanques de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	5.56	N.E
Melaku et al., 2008	Washington, EEUU	N.E	Tanque de plástico	0.35	N.E
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	1.05	5.6
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanques de almacenamiento	N.E	0.25	6.1
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	< 2	7.1
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	0.18	6.6

N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliéstireno

### 3.3 Cadmio (Cd)

El Cadmio es un contaminante que se presenta en la atmósfera y en el agua lluvia debido al humo de tabaco y la actividad de minería como subproducto de la refinación del Zinc, Cobre u otro elemento poco común como el Plomo. También, se utiliza para la estabilización del PVC, en fertilizantes y pesticidas en pequeñas concentraciones (Stoeppler, 1992), en la industria del acero, en los plásticos y en pilas eléctricas. El Cadmio en la atmósfera puede ser movilizado a largas distancias desde la fuente de emisión. Estudios anteriores realizados por McCallum y Woodward (1966) han reportado la presencia de Cadmio en el agua lluvia durante 470 días después de producirse una detonación nuclear en Nueva Zelanda. La asociación internacional del Cadmio (ICDA, siglas en inglés) menciona que en áreas urbanizadas e industrializadas se encuentran notables concentraciones de Cadmio en el agua lluvia que varían de 10 a 4000 ng/L de Cadmio total o disuelto dependiendo de la ubicación del área afectada. La agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR, siglas en inglés), reporta que anualmente se liberan entre 4,000 y 13,000 toneladas de Cadmio como consecuencia de actividades humanas por parte de la minería y el consumo de combustibles fósiles.

La Tabla 3 muestra las concentraciones de Cadmio en el agua lluvia. En la Figura 2, se observa que países como Turquía, Singapur, Jordania y Kenia presentan concentraciones de Cadmio muy altas, los cuales pueden perjudicar la salud humana. En esta revisión se detectó que Bogotá, Colombia tiene dos sectores críticos donde se presentaron concentraciones de Cadmio casi 100 veces superior al valor permisible que sugiere la OMS (2006). Torres *et al.* (2011) mencionan que en estas locaciones existe una gran actividad industrial, donde se fabrican textiles, productos químicos, pinturas, detergentes, caucho, vidrio, ladrillos, carbón vegetal, fundición de Cobre, Plomo y acero. También se llevan a cabo actividades como quema de combustibles domésticos y residuos como neumáticos. Es importante resaltar que durante la revisión de la literatura el Cadmio es uno de los metales pesados más encontrados en los estudios anteriormente realizados.

Tabla 3. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cadmio en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	0.7	N.E
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella PET	0.2	N.E
Vermette et al., 1995	Colorado, EEUU	N.E	Embudos y Botellas cubiertos de teflón	0.13	N.E
	Illinois, EEUU			0.16	
	Tennessee, EEUU			0.17	
Helmerts y Schrems, 1995	Zona sur, Océano Atlántico	N.E	Embudo y botella PET	0.196	5.12

Tabla 3. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cadmio en el agua lluvia (Continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Kaya y Tuncel, 1997	Ankara, Turquía	N.E	N.E	9.2	N.E
Garnaud et al., 1999	Chatou, Francia	N.E	Botella PET	0.09	N.E
Gromaire-Mertz et al., 1999	Paris, Francia	Cubierta	N.E	1.3	N.E
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta	Embudo y botella PET	0.063	4.55
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudo y botella PET	0.42	6.4
Hu y Balasubramanian, 2003	Singapur	N.E	Tanque de PE	11.8	N.E
Garcia et al., 2006	Rancho viejo, México	N.E	Tanque de PE	0.21	4.5
Báez et al., 2007	Ciudad de México	Cubierta	Tanque de PE	0.41	5.08
		Tanque de almacenamiento	Concreto, plástico y Hierro galvanizado	0.17	
Morrow et al., 2007	Australia		Hierro galvanizado	1.94	N.E
		Cubierta	Acero recubierto con Al-Zn	0.4	
Melaku et al., 2008	Washington, EEUU	N.E	Tanque de plástico	0.59	N.E
Al-Khashman, 2009	Ghore El-Saf, Jordania	Sistema instalado a 1 m del piso	Embudos de PL y Botellas PE	52	6.9
McCarton et al., 2009	Dublín, Irlanda	Cubierta	Teja de arcilla y botellas de plástico	0.03	7.24
Basak y Alagha, 2010	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y Botella de PL	1.7	<5.5
Sekabira et al., 2010	N.E	Sistema instalado a 1.5 m del piso	Embudo y botella PET	2.5	N.E

Tabla 3. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cadmio en el agua lluvia (Continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Torres et al., 2011	Sector Soacha, Bogotá, Colombia	Cubierta	Tejas de Zinc y fibrocemento	384	7.4
	Sector Kennedy, Bogotá, Colombia	Cubierta	Tejas de Zinc y fibrocemento	173	8
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	0.2	7.1
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflón	0.04	N.E
	Cape Point, Sudáfrica			0.02	
Lamprea y Ruban, 2014	Ciudad de Nantes, Francia	Toma directa	Embudo de acero inoxidable y tanque plástico	0.065	6.05
		Cubierta	Tejas de Zinc y canaletas galvanizadas	0.2	
Cobbina et al., 2015	Tamale, Ghana	N.E	Botellas esterilizadas	2	7.4
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalado a 1.5 m del piso	Embudo y botella PET	4.34	6.6

*N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno*

### 3.4 Cromo (Cr)

El Cromo es utilizado ampliamente en procesos de manufactura relacionados con productos como el dicromato de Cobre y el sulfato crómico para el tratamiento de la madera y el cuero, respectivamente. También, el Cromo puede ser liberado a la atmósfera por industrias vinculadas a la galvanoplastia, producción de textiles, quema de gas natural, petróleo o carbón y plantas productoras de cemento. La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de EE.UU (ATSDR, siglas en inglés) menciona que las áreas rurales o suburbanas generalmente contienen concentraciones de Cromo menores ( $< 1.0\text{E}^{-5} \mu\text{g/L}$ ) que las áreas urbanas (hasta  $3.0\text{E}^{-5} \mu\text{g/L}$ ).

La Tabla 4 muestra las concentraciones de Cromo en el agua lluvia. Se observa que no existen valores de Cromo en el agua lluvia que puedan afectar la salud humana, excepto en la ciudad de Estambul, Turquía.



Tabla 4. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cromo en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	3.2	N.E
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella de PE	1.52	N.E
Kaya y Tuncel, 1997	Ankara, Turquía	N.E	N.E	2.98	N.E
Al-Momani , 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudo y botella de PE	0.77	6.4
Hu y Balasubramanian, 2003	Singapur	N.E	Tanque de PE	6.2	N.E
Garcia et al., 2006	Rancho viejo, México	N.E	Tanque de PE	0.42	4.5
Báez et al., 2007	Ciudad de México	Cubierta	Tanque de PE	0.52	5.08
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	0.83	N.E
Melaku et al., 2008	Washington, EEUU	N.E	Tanque de plástico	0.8	N.E
Al-Khashman, 2009	Ghore El-Saf, Jordania	Sistema instalado a 1 m del piso	Embudo de PL y botella PE	3.1	6.9
Basak y Alagha 2010	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y botella PL	66.92	<5.5
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	0.4	5.6
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	0.53	6.1
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	0.5	7.1
Lamprea y Ruban, 2014	Ciudad de Nantes, Francia	Toma directa	Embudo de acero inoxidable y tanque plástico	0.35	6.05
		Cubierta	Tejas de Zinc y canaletas galvanizadas	3.2	
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalado a 1.5 m del piso	Embudo y botella PET	0.26	6.6

N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno

### 3.5 Cobre (Co)

El Cobre es uno de los metales pesados que en caso de que se encuentre diluido en el agua para consumo humano significa un beneficio o una desventaja en la salud humana de acuerdo a los niveles de concentración que se presenten en esta misma. El Cobre es un metal ampliamente utilizado en las industrias manufactureras debido a sus propiedades altamente deseables como la durabilidad, ductibilidad, maleabilidad y conductividad eléctrica y térmica. El Cobre es utilizado comúnmente como revestimiento de techos y puede representar una fuente de contaminación en el agua lluvia captada, debido al efecto de corrosión a causa de las características físico-químicas del agua que entra en contacto con los materiales que contienen Cobre. Autores como Gretchen *et al.* (2012) demostraron que factores como el pH de la lluvia y la longitud de la cubierta o longitud de escurrimiento se relacionan con la variabilidad en las concentraciones de Cobre.

La Tabla 5 muestra las concentraciones de Cobre en el agua lluvia. De acuerdo a los estándares internacionales, se observa que ningún país reporta valores de Cobre superiores al valor permisible que permite afectaciones en la salud humana. También se observa en la Figura 3 que los sectores de Usme, Soacha y Kennedy pertenecientes a la ciudad de Bogotá (Colombia), reportan valores similares a ciudades como Georgia (EEUU), Paris (Francia), Auckland (Nueva Zelanda), Ghore El-Saf (Jordania) y Seúl (Corea del Sur). Es importante resaltar que durante la revisión de la literatura el Cobre es uno de los metales pesados más encontrados en los estudios anteriormente realizados.

Tabla 5. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cobre en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	41	N.E
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella de PE	4	N.E
	Colorado, EEUU			0.87	
Vermette et al., 1995	Illinois, EEUU	N.E	Embudos y Botellas cubiertos de teflón	0.6	N.E
	Tennessee, EEUU			0.57	
Helmers y Schrems, 1995	Zona sur, Océano Atlántico	N.E	Embudo y botella de PE	0.91	5.12
Gromaire-Mertz et al., 1999	Paris, Francia	Cubierta	N.E	37	N.E
Garnaud et al., 1999	Chatou, Francia	N.E	Botellas de PE	3	N.E
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta	Embudo y botella de PE	0.62	4.55
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	1.27	6.6

Tabla 5. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cobre en el agua lluvia (Continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Simmons et al., 2001	Auckland, Nueva Zelanda	Cubierta	N.E	60	7.3
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudo y botella de PE	3.08	6.4
Migliavacca et al., 2004	Región de Candiota, Brasil	N.E	Embudo y botella de PE	1.96	5.4
Chang et al., 2004	Texas , EEUU	Cubierta	Teja de madera	22	5.55
			Aluminio	20	
			Hierro galvanizado	20	
		Toma directa	N.E	21	
Basak y Alagha, 2004	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	4.19	5.58
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	Tanque de plástico	0.01	N.E
Migliavacca et al. 2005	Guaiba, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella de PE	3.82	5.97
Morrow et al., 2007	Australia	Tanques de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	76.69	N.E
Eletta y Oyeyipo, 2008	Kwara, Nigeria	Cubierta Nueva		60	6.95
		Cubierta antigua	Lamina de Hierro corrugado	222	
		Toma directa	Tanque de PL	130	
Al-Khashman, 2009	Ghore El-Saf, Jordania	Sistema instalado a 1 m del suelo	Embudos de PL y Botellas de PE	73	6.9
Sekabira et al., 2010	N.E	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella de PE	19.5	N.E
Basak y Alagha 2010	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	151.12	<5.5
Honório et al., 2010	Boa Vista, Brasil			4.45	4.7
	Manaus, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella de PE	5.78	4.1
	Tabatinga, Brasil			1.02	5.1

Tabla 5. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cobre en el agua lluvia (Continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	993	5.6
Torres et al., 2011	Sector Soacha, Bogotá, Colombia	Cubierta	Tejas de Zinc y fibrocemento	59	7.4
	Sector Kennedy, Bogotá, Colombia	Cubierta	Tejas de Zinc y fibrocemento	35	8
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanques de almacenamiento	N.E	21	6.1
Lee et al., 2012	Seúl, Corea de Sur	Teja de madera, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	40	6.75
			Tanque recolector	15	6.5
		Teja de arcilla, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	35	7.2
			Tanque recolector	20	7.1
		Acero galvanizado, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	60	6.5
			Tanque recolector	40	6.2
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	cubiertas	Paja, asbestos y metal galvanizado	0.9	7.1
Van der Sterren et al., 2013	Sídney, Australia	Cubierta y Tanque recolector de primera lluvia	Acero galvanizado	100	6.16
				Cubierta y Tanque recolector de lluvia posterior	221
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflón	2.5	N.E
	Cape Point, Sudáfrica			0.81	
Han et al., 2014	Área urbana, China	Toma directa	Botellas plásticas	40	N.E
Lamprea y Ruban, 2014	Ciudad de Nantes, Francia	Toma directa	Embudo de acero inoxidable y tanques plásticos	4	6.05
		Cubierta	Tejas de Zinc y canaletas galvanizadas	3.4	
Duarte, 2014	Usme, Bogotá, Colombia	Cubierta	Tejas Fibrocemento	60	7.4
			Tejas plásticas	60	6.2
			Tejas Zinc	70	6.4

N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno

### 3.6 Zinc (Zn)

El Zinc es un elemento esencial para el ser humano que se encuentra comúnmente en suplementos dietéticos, sin embargo, su presencia en altas concentraciones puede representar una amenaza potencial en la sociedad y en el medio ambiente. El Zinc metálico se utiliza en muchas industrias manufactureras; su uso más común es revestir Hierro para prevenir la corrosión y para formar aleaciones como el latón y el bronce. Otras actividades que pueden aumentar los niveles de Zinc en la atmósfera son a partir del resultado de la minería como la refinación de minerales de Zinc, Plomo y Cadmio, la producción de acero, la incineración de carbón y de residuos. La cantidad de Zinc disuelta en el agua lluvia es directamente proporcional al aumento de acidez del agua. Losno y Bergametti (1988) comprobaron mayor cantidad de Zinc soluble en el agua lluvia cuando estas presentan un pH menor a 5.5.

La Tabla 6 muestra las concentraciones de Zinc en el agua lluvia. Se observa en la figura 4 que ciudades como Paris y Nantes (Francia), Texas (EEUU), Kwara (Nigeria), Sidney (Australia) y Menengai (Kenia) reportan altos niveles de Zinc que pueden ser perjudiciales para la salud humana. Las concentraciones Zinc encontradas en los sectores de Usme, Kennedy y Soacha de la ciudad de Bogotá son similares. También se puede observar que en la mayoría de casos estudiados, el uso de cubiertas de Hierro galvanizado y Zinc como área de captación, pueden aportar grandes cantidades de este metal pesado al agua lluvia. Es importante resaltar que durante la revisión de la literatura el Zinc es uno de los metales pesados más encontrados en los estudios anteriormente realizados.

Tabla 6. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Zinc en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	34	N.E
Losno y Bergametti, 1988	Isla Corsica, Francia	N.E	Tanque de PE	0.6	5.5
		Toma directa	N.E	34	5.9
Yaziz et al., 1989	Selangor, Malaysia	Cubierta	Teja de Hierro galvanizado y canales en PVC	423	6.54
		Cubierta	Cubierta en concreto y canales en PVC	93.6	6.88
Poissant et al., 1994	Montreal, Canada	N.E	Embudo y botella de PE	28.1	N.E
Helmery y Schrems, 1995	Zona sur, Océano Atlántico	N.E	Embudos y botellas PE	3.93	5.12

Tabla 6. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Zinc en el agua lluvia (continuación).

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Vermette et al., 1995	Colorado, EEUU			3.57	
	Illinois, EEUU	N.E	Embudos y Botellas cubiertos de teflón	2.12	N.E
	Tennessee, EEUU			1.67	
Gromaire-Mertz et al., 1999	Paris, Francia	Cubierta	N.E	3422	N.E
Garnaud et al., 1999	Chatou, Francia	N.E	Embudo y botella de PE	34.1	N.E
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta	Embudo y botella de PE	4.77	4.55
Simmons et al., 2001	Auckland, Nueva Zelanda	Cubierta	N.E	400	7.3
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudos y Botellas PE	6.52	6.4
Chang et al., 2004	Texas, EEUU	Cubierta	Teja de madera	9717	5.55
			Aluminio	2248	
			Hierro galvanizado	8219	
		Toma directa	N.E	85	
Migliavacca et al., 2004	Región de Candiota, Brasil	N.E	Embudos y Botellas PE	38.1	5.4
Basak y Alagha, 2004	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	8.23	5.58
Migliavacca et al., 2005	Guaiba, Brasil	Sistema instalados a 1.5 m del suelo	Embudos y Botellas PE	30.38	5.97
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	Tanque de plástico	0.034	N.E
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	1017.64	N.E
Eletta y Oyeyipo, 2008	Kwara, Nigeria	Cubierta nueva		2730	
		Cubierta antigua	Lamina de Hierro corrugado	3175	6.95
		Toma directa	Tanques de PL	240	
Al-Khashman, 2009	Ghore El-Saf, Jordania	Sistema instalado a 1 m del piso	Embudos de PL y botellas de PE	210	6.9
Basak y Alagha, 2010	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	303.51	<5.5

Tabla 6. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Zinc en el agua lluvia (continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Honório et al., 2010	Boa Vista, Brasil			31.84	4.7
	Manaus, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudos y botellas de PE	31.77	4.1
	Tabatinga, Brasil			7.65	5.1
Sekabira et al., 2010	N.E	Sistema instalados a 1.5 m del suelo	Embudos y botellas de PE	19.5	N.E
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	64.2	5.6
Torres et al., 2011	Sector Soacha, Bogotá, Colombia	Cubierta	Tejas de Zinc y fibrocemento	2088	7.4
	Sector Kennedy, Bogotá, Colombia	Cubierta	Tejas de Zinc y fibrocemento	2465	8
Lee et al., 2012	Seúl, Corea de Sur	Teja de madera, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	150	6.75
			Tanque recolector	30	6.5
		Teja de arcilla, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	150	7.2
			Tanque recolector	40	7.1
		Acero galvanizado, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	450	6.5
Tanque recolector	80	6.2			
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	770	6.1
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	83.8	7.1
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflón	11.1	N.E
	Cape Point, Sudáfrica			68.5	
Van der Sterren et al., 2013	Sídney, Australia	Cubierta y Tanque recolector de primera lluvia		59000	6.16
		Cubierta y Tanque recolector de lluvia posterior	Acero galvanizado	2630	6.6

Tabla 6. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Zinc en el agua lluvia (Continuación).

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Lamprea y Ruban, 2014	Ciudad de Nantes, Francia	Toma directa	Embudo de acero inoxidable y tanques plásticos	20	6.05
		Cubierta	Tejas de Zinc y canaletas galvanizadas	4244	
Duarte, 2014	Usme, Bogotá, Colombia	Cubierta	Tejas Fibrocemento	90	7.4
			Tejas plásticas	130	6.2
			Tejas Zinc	2300	6.4
Han et al., 2014	Área urbana, China	Toma directa	Botellas plásticas	27	N.E
Cobbina et al., 2015	Tamale, Ghana	N.E	Botellas esterilizadas	80	7.4
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalados a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	9304.5	6.6

*N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno*

De acuerdo a lo anterior, se observa que en ciudades como Sídney, Australia, la contaminación del agua lluvia por Zinc es muy severa, reportando valores hasta 59 mg/L, lo que puede indicar que las altas concentraciones de Zinc no dependen solamente del tipo de cubierta que se utilice para la captación del agua, también depende de otras fuentes potenciales como la presencia de partículas emitidas por el alto flujo de tráfico, el desgaste de los neumáticos y el polvo generado por las vías asfálticas.

### 3.7 Níquel (Ni)

El Níquel es liberado a la atmósfera por actividades del hombre como la minería para utilizarlo principalmente en la fabricación de acero inoxidable. También, es usado comúnmente para aleaciones utilizadas en la fabricación de monedas, joyas y válvulas e intercambiadores de calor. El Níquel puede combinarse con otros elementos como el cloro, azufre y oxígeno para formar compuestos de Níquel. Estos compuestos se usan para niquelado, colorear cerámicas, fabricar baterías y catalizadores. El Níquel también es liberado a la atmósfera por plantas de energía para la quema de petróleo o carbón y por los incineradores de basura. Generalmente el Níquel puede tardar hasta 30 días en ser removido del aire por acción de la lluvia.

La Tabla 7 muestra las concentraciones de Níquel en el agua lluvia. Se observa que no existen valores de Níquel en el agua lluvia que puedan afectar la salud humana, excepto en la ciudad de Estambul, Turquía.



Tabla 7. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Níquel en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	12	N.E
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella de PE	2.82	N.E
Helmerts y Schrems, 1995	Zona sur, océano atlántico	N.E	Embudos y Botellas de PE	1.42	5.12
Kaya y Tuncel, 1997	Ankara, Turquía	N.E	N.E	3.8	N.E
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta	Embudo y botella de PE	0.26	4.55
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudos y botellas de PE	2.62	6.4
Migliavacca et al., 2004	Región de Candiota, Brasil	N.E	Embudos y botellas de PE	3.32	5.4
García et al., 2006	Rancho viejo, México	N.E	Tanque de PE	2.05	4.5
Báez et al., 2007	Ciudad de México	Cubierta	Tanques de PE	3.37	5.08
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	2.85	N.E
Al-Khashman, 2009	Ghore El-Saf, Jordania	Sistema instalado a 1 m del piso	Embudos de PE y Botellas PL	3.5	6.9
Basak y Alagha, 2010	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	66.34	<5.5
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	7.24	5.6
	Boa Vista, Brasil			1.5	4.7
Honório et al., 2010	Manaus, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudos y Botellas de PE	3.21	4.1
	Tabatinga, Brasil			0.44	5.1
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	1.3	6.1
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflón	0.82	N.E
	Cape Point, Sudáfrica			8.3	

Tabla 7. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Níquel en el agua lluvia (continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	0.4	7.1
Lamprea y Ruban, 2014	Ciudad de Nantes, Francia	Toma directa	Embudo de acero inoxidable y tanques plásticos	0.96	6.05
		Cubierta	Tejas de Zinc y canaletas galvanizadas	1.9	
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	0.49	6.6

*N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliéstireno*

### 3.8 Selenio (Se)

El Selenio es producido como producto secundario en la refinación del Cobre. También, es utilizado en artículos fotográficos, líquidos de limpieza para partes metálicas de armas de fuego, plásticos, pinturas, ciertos tipos de vidrios o suplementos nutricionales para aves o ganado. El Selenio ingresa a la atmosfera cuando se realizan procesos de quema de carbón o petróleo. Una vez ocurra lo anterior, el agua lluvia puede reaccionar con este elemento y formar compuesto de Selenio solubles en esta misma agua. La ATSDR (2011) menciona que la probabilidad de exposición de compuestos de Selenio es alta debido a su alta capacidad de movilizarse de un lugar a otro.

La Tabla 8 muestra las concentraciones de Selenio en el agua lluvia. Se observa que muy pocos valores de Selenio son reportados en muestras de agua lluvia. Adicionalmente, los niveles de Selenio reportados en países como Australia y Kenia no resultan ser perjudiciales para la salud humana.

Tabla 8. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Selenio en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Morrow et al., 2007	Australia	Tanques de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	1.39	N.E
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	0.11	6.6

*N.E: No Específica; PE: Polietileno*

### 3.9 Mercurio (Hg)

El Mercurio es uno de los metales pesados que tiene la característica de ser bioacumulable. Las fuentes de origen de este metal en forma de mineral de cinabrio, el cual contiene sulfuro de Mercurio. La forma metálica del Mercurio es producida mediante el refinamiento del sulfuro de Mercurio a temperaturas por encima de 540 °C. Los vapores producidos durante el refinamiento son capturados y enfriados para formar Mercurio metálico en forma líquida. Este tipo de Mercurio es utilizado en termómetros, barómetros, baterías, interruptores eléctricos, producción de cloro gaseoso, soda cáustica y para la extracción de oro.

Otras actividades humanas como el uso de combustibles fósiles producen una liberación adicional de Mercurio al ambiente. La ATSDR (2011) estima que entre uno y dos tercios de Mercurio liberado a la atmosfera anualmente, se derivan de la actividad humana. El 80% de estas cargas contaminantes liberadas a la atmosfera es Mercurio elemental, causado por el uso de combustibles fósiles, la minería, fundiciones, la incineración de desechos sólidos médicos y municipales y la producción de cemento. Los hongos o bacterias que se encuentran en las cubiertas de captación de agua lluvia pueden convertir el Mercurio inorgánico en metilMercurio. El metilMercurio liberado por los microorganismos puede permanecer el agua durante mucho tiempo (ATSDR, 2011).

La Tabla 9 muestra las concentraciones de Mercurio en el agua lluvia. Se observa que muy pocos valores de Mercurio son reportados en muestras de agua lluvia. En la región de Cape Point, Sudáfrica, se realizaron dos estudios en la misma región y se detectaron resultados significativamente diferentes. Brunke et al., (2015) comenta que el alto nivel de Mercurio encontrado en la región de Cape Point, Sudáfrica, se debe a la influencia de los cambios de la temperatura en la superficie del mar y por las sequías (Influencia del fenómeno del niño) a gran escala que se presentaron en esta misma región.

Tabla 9. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Mercurio en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	0.745	N.E
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica Cape Point, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflón	0.019 0.011	N.E
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	< 1,2	7.1
Brunke et al., 2015	Cape Point, Sudáfrica	N.E	Embudo de vidrio y botella de teflón	9.91	N.E
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	0.16	6.6

*N.E: No Específica; PE: Polietileno*

### 3.10 Plata (Ag)

Las fuentes de origen que liberan Plata al medio ambiente son las minas que producen este mismo elemento y otros metales. La Plata que se encuentra en la atmosfera puede movilizarse a grandes distancias a través del aire. También, la lluvia puede arrastrar los compuestos de Plata que se encuentran en el aire.

La Tabla 10 muestra las concentraciones de Plata en el agua lluvia. Se observa que muy pocos valores de Plata son reportados en muestras de agua lluvia. No es posible afirmar que estos valores encontrados en países como EEUU y Australia sean perjudiciales para la salud humana, debido a que no existe un valor permisible en lineamientos internacionales.

Tabla 10. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Plata en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	3.2	N.E
Morrow et al., 2007	Australia	Tanques de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	0.01	N.E

*N.E: No Específica*

### 3.11 Antimonio (Sb)

Generalmente se realizan mezclas de una pequeña cantidad de Antimonio con otros metales como Plomo y Zinc para aleaciones. Estas aleaciones son utilizadas en baterías de almacenamiento a base de Plomo, soldaduras, láminas y tuberías, rodamientos, moldes y algunos tipos de metales. Los incineradores y las plantas generadoras de energía por combustión de carbón emiten pequeñas cantidades de Antimonio a la atmosfera que luego son eliminadas del aire por la lluvia. La ATSDR (2011) menciona que Antimonio puede permanecer en el aire durante más de un mes.

La Tabla 11 muestra las concentraciones de Antimonio en el agua lluvia. Se observa que muy pocos valores de Antimonio son reportados en muestras de agua lluvia. Adicionalmente, estos valores reportados en países como Canadá, Jordania, China y Australia, no son perjudiciales para la salud humana.

Tabla 11. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Antimonio en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Poissant et al., 1994	Montreal, Canada	N.E	Embudos y Botellas PE	0.35	N.E

Tabla 11. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Antimonio en el agua lluvia (continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	N.E	0.0008	N.E
Al-Momani, 2003	Area rural, Jordania	N.E	Embudos y Botellas PE	0.16	6.4
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	0.15	6.1

*N.E: No Específica; PE: Polietileno*

### 3.12 Hierro (Fe)

La presencia de Hierro en el agua lluvia puede no generar efectos perjudiciales sobre las personas que consumen agua con cantidades significativas de Hierro. Sin embargo, los problemas se presentan en el color, turbidez en el agua y sabor. Las partículas contaminantes de Hierro pueden ser transferidas de la atmosfera a la superficie de captación y almacenamiento mediante la deposición seca en forma de polvo. También puede ser transferida al agua lluvia por deposición humedad debido al intercambio de vapores. Autores como *Kieber et al.*, (2001) han identificado que el agua lluvia en zonas costeras contiene importante cantidad de Hierro que contribuye a la producción de algas en los mares.

La Tabla 12 muestra las concentraciones de Hierro en el agua lluvia. En la Figura 5 se observa que en países como Turquía, Nigeria, Jordania, Corea del Sur y Malasia, presentan niveles de Hierro que pueden ser perjudiciales para la salud humana, especialmente cuando se utiliza cubiertas con tejas de Hierro galvanizado. Caso excepcional, fue el observado en la ciudad de Ghore El-Saf, Jordania, donde Al-Khashman (2009) comenta que el alto nivel de Hierro encontrado en el agua lluvia puede ser causado por el transporte atmosférico a largo plazo de actividades provenientes de países europeos que tienen fuentes puntuales de contaminación atmosférica. Se resalta que durante la revisión de la literatura el Hierro es uno de los metales pesados más encontrados en los estudios anteriormente realizados.

Tabla 12. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Hierro en el agua lluvia

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella de PE	90.5	N.E
Helmers y Schrems, 1995	Zona sur, Océano Atlántico	N.E	Embudos y Botellas de PE	63.5	5.12
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudos y Botellas de PE	92	6.4

Tabla 12. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Hierro en el agua lluvia (continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Basak y Alagha, 2004	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	514	5.58
Migliavacca et al., 2004	Región de Candiota, Brasil	N.E	Embudos y Botellas de PE	9.92	5.4
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	Tanque de plástico	0.11	N.E
Migliavacca et al., 2005	Guaiba, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudos y Botellas de PE	26.6	5.97
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	46.32	N.E
Eletta y Oyeyipo, 2008	Kwara, Nigeria	Cubierta	Lamina de Hierro corrugado	2015	6.95
		Cubierta		3430	
		Toma directa	Tanques de PL	570	
McCarton et al., 2009	Dublín, Irlanda	Cubierta	Teja de arcilla y botellas de plástico	25.66	7.24
Al-Khashman, 2009	Ghore El-Saf, Jordania	Sistema instalado a 1 m del suelo	Embudos de PL y Botellas PE	430	6.9
Sekabira et al., 2010		sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudos y Botellas de PE	150	N.E
Honório et al., 2010	Boa Vista, Brasil			13.23	4.7
	Manaus, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudos y Botellas de PE	27.31	4.1
	Tabatinga, Brasil			14.58	5.1
Lee et al., 2012	Seul, Corea de Sur	Teja de madera, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	160	6.75
			Tanque recolector	35	6.5
		Teja de arcilla, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	165	7.2
			Tanque recolector	35	7.1
		Acero galvanizado, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	285	6.5
			Tanque recolector	35	6.2

Tabla 12. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Hierro en el agua lluvia (continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflon	62.3	N.E
	Cape Point, Sudáfrica			31.8	
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	13.2	7.1
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	68	6.1
Cobbina et al., 2015	Tamale, Ghana	N.E	Botellas esterilizadas	60	7.4

*N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno*

### 3.13 Aluminio (Al)

La presencia de aluminio en el medio ambiente se debe a los incineradores, las plantas de energía que utilizan carbón como combustible y las fabricas industriales manufactureras de elementos como latas para contener bebidas, ollas, sartenes, papel de aluminio, aleaciones para aviones y cubiertas para las viviendas. El aluminio en polvo es utilizado para explosivos y fuegos artificiales.

La ATSDR (2011) reporta que los niveles de aluminio en el aire generalmente oscilan entre  $5\text{E}^{-5}$  y  $18\text{E}^{-3}$   $\mu\text{g/L}$ , dependiendo de la localidad, las condiciones climáticas y del tipo de actividad industrial que esté operando en el área. La mayor parte del aluminio en el aire se encuentra suspendido en forma de pequeñas partículas de polvo. Los niveles de aluminio en áreas urbanas e industriales pueden ser más altos y pueden oscilar entre  $4\text{E}^{-3}$  y  $8\text{E}^{-2}$   $\mu\text{g/L}$ .

La Tabla 13 muestra las concentraciones de aluminio en el agua lluvia. En la Figura 6 se observa que en países como Turquía, Singapur, Jordania, EEUU y Corea del Sur, presentan altos niveles de aluminio en aguas lluvias que pueden ser perjudiciales para la salud, en caso de utilizar el agua lluvia para consumo humano. De acuerdo al tipo de sistema de recolección utilizado en estos países, no es conveniente afirmar que la fuente de contaminación puede ser por el uso de cubiertas de aluminio o Hierro galvanizado. Lo anterior, puede ser causado por el uso desmesurado de automóviles, los cuales tienen motores hechos de aluminio que al desgastarse emiten grandes cantidades de este metal a la atmosfera. Ciudades como Ibagué, Colombia, reporta bajos niveles de aluminio, los cuales son muy similares a los presentados en ciudades como Guaiba y Boa Vista (Brasil), Beijing (China) y Montreal (Canadá). Se resalta que durante la revisión de la literatura el

aluminio es uno de los metales pesados más encontrados en los estudios anteriormente realizados.

Tabla 13. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de aluminio en el agua lluvia

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	valor $\mu\text{g/L}$	pH [Und]
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella PET	17.5	N.E
Helmers y Schrems, 1995	Zona sur, Océano Atlántico	N.E	Embudo y botella PET	131	5.12
Kaya and Tunce, 1997	Ankara, Turquía	N.E	N.E	957	N.E
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta	Embudo y botella PET	6.06	4.55
Al-Momani , 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudo y botella PET	382	6.4
Hu y Balasubramanian, 2003	Singapur	N.E	Tanques colectores de PE	386	N.E
Basak y Alagha, 2004	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	1303	5.58
Chang et al., 2004	Texas , EEUU	Cubierta	Teja de madera	224	5.55
			Aluminio	169	
			Hierro galvanizado	194	
		Toma directa	N.E	251	
Migliavacca et al., 2004	Región de Candiota, Brasil	N.E	Embudo y botella PET	9.23	5.4
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	Tanque de plástico	0.097	N.E
Migliavacca et al., 2005	Guaiba, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	25.83	5.97
García et al., 2006	Rancho viejo, México	N.E	Tanque de PE	136	4.5
Báez et al., 2007	Ciudad de México	Cubierta	Tanques colectores de PE	50.7	5.08
Al-Khashman, 2009	Ghore El-Saf, Jordania	Sistema instalado a 1 m del piso	Embudos de PL y Botellas PE	324	6.9
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	13.8	5.6
Honório et al., 2010	Boa Vista, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	27.41	4.7
	Manaus, Brasil			37	4.1
	Tabatinga, Brasil			8.82	5.1



Tabla 13. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de aluminio en el agua lluvia (continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	valor $\mu\text{g/L}$	pH [Und]
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	60	6.1
Lee et al., 2012	Seul, Corea de Sur	Teja de madera, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	210	6.75
			Tanque recolector	40	6.5
		Teja de arcilla, canaletas y bajante PVC	Primera lluvia	220	7.2
			Tanque recolector	40	7.1
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica Cape Point, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflón	78	N.E
				9.9	
Van der Sterren et al., 2013	Sídney, Australia	Cubierta y Tanque recolector de primera lluvia	Acero galvanizado	125	6.16
		Cubierta y Tanque recolector de lluvia posterior		115	6.6
Ospina y Ramirez, 2014	Ibagué, Colombia	N.E	Tanque de PE Esterilizado	25	5.7
Xu et al., 2015	Beijing, China	Cubierta	Embudo y botella PET	18.8	4.73
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalados a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	36.79	6.6

N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno

### 3.14 Bario (Ba)

El Bario y sus compuestos como el sulfato de bario se derivan de la minería para usarse en industrias de gas y petróleo para fabricar lodos de perforación. El sulfato de bario también se utiliza para fabricar pinturas, ladrillos, baldosas, vidrio y caucho. Otros compuestos de bario, como el carbonato de bario, cloruro de bario e hidróxido de bario, se utilizan para fabricar cerámicas, veneno para insectos y ratas. La ATSDR (2011) reporta que el sulfato de bario y el carbonato de bario son los compuestos que se encuentran con mayor frecuencia en el agua. Esta misma agencia comenta que en muchas ocasiones el aire contiene aproximadamente  $0.0015 \mu\text{g/L}$  y en locaciones donde existe industria pesada, el aire contiene aproximadamente  $< 0.33 \mu\text{g/L}$ . La OMS (2006) reporta un valor de referencia

correspondiente a 700 µg/L, donde la presencia de esta concentración en el agua de consumo puede afectar a la salud humana.

La Tabla 14 muestra las concentraciones de bario en el agua lluvia. Se observa que los niveles de bario reportados en ciudades con una gran densidad de población como Hong Kong (China), Tainan (Taiwán) y Brisbane (Australia), no son altos y no afecta la salud humana.

Tabla 14. Concentración [µg/L] de bario en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta	Embudo y botella de PE	0.37	4.55
Basak y Alagha, 2004	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	1.73	5.58
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	Tanque de plástico	0.0057	N.E
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	5.56	N.E
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	7.91	5.6
	Boa Vista, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo		2.06	4.7
Honório et al., 2010	Manaus, Brasil	N.E	Embudos y Botellas de PE	0.69	4.1
	Tabatinga, Brasil	N.E		0.55	5.1
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	12	6.1
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	2.2	7.1

*N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno*

### 3.15 Vanadio (V)

El vanadio se encuentra generalmente en el medio ambiente combinado con elementos como oxígeno, sodio, azufre o cloruro. El óxido de vanadio es utilizado frecuentemente por la industria de producción de acero, la industria de la energía atómica y en la tecnología espacial para la construcción de aeronaves. La ATSDR (2011) menciona que durante la década de los años ochenta, la producción de vanadio en forma de pentóxido de vanadio, oscilaba entre 34 y 45 Millones de kg, en países como China, Finlandia, Sudáfrica, Estados Unidos y la Unión Soviética. La OMS (2006) reporta concentraciones de vanadio en el agua potable menores de 10 µg/L, sin embargo este valor en otras fuentes hídricas reportan valores hasta 30 µg/L.

La Tabla 15 muestra las concentraciones de vanadio en el agua lluvia. Aunque no existe un valor permisible de concentración de vanadio en agua para consumo humano, ciudades como Georgia (EEUU) y Estambul (Turquía) presentan altas concentraciones de vanadio en el agua lluvia en comparación con valores comunes encontrados en una red de distribución de agua potable (OMS, 2006).

Tabla 15. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de vanadio en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	42	N.E
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella de PE	0.75	N.E
Kaya and Tuncel, 1997	Ankara, Turquía	N.E	N.E	2.2	N.E
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta	Embudo y botella de PE	0.23	4.55
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudos y Botellas de PE	4.21	6.4
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	Tanque de plástico	0.00074	N.E
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Concreto, plástico y Hierro galvanizado	0.47	N.E
		Cubierta	Hierro galvanizado	0.16	
			Acero recubierto con Al-Zn	0.21	
Báez et al., 2007	Ciudad de México	Cubierta	Tanques colectores de PE	5.13	5.08
Basak y Alagha, 2010	Estambul, Turquía	N.E	Embudo de PE y tanque de PL	53.41	<5.5
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	1.19	5.6
Honório et al., 2010	Boa Vista, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudos y Botellas de PE	0.1	4.7
	Manaus, Brasil			1.78	4.1
	Tabatinga, Brasil			0.051	5.1
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	0.32	6.1

*N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno*

### 3.16 Manganese (Mn)

El Manganese se encuentra en los subproductos de combustión del escape de automóviles o camiones y en las plantas de acero. El Manganese es utilizado como aditivos para la gasolina, plaguicidas, oxidantes para la limpieza, el blanqueado y la desinfección en forma de permanganato potásico. También es utilizado en la fabricación de aleaciones de Hierro y acero. La presencia de Manganese en el agua en concentraciones mayores a 100 µg/L produce sabor y genera manchas. La ATSDR (2011) reporta que el Manganese es utilizado en Estados Unidos como un compuesto orgánico, conocido como MMT, para potenciar el octanaje de la gasolina.

La Tabla 16 muestra las concentraciones de Manganese en el agua lluvia. Se observa que las ciudades que tienen reportes de concentración de Manganese no evidencian niveles superiores a 100 µg/L, por lo cual el agua lluvia evaluada puede no presentar sabor o generar manchas particularmente por este metal pesado.

Tabla 16. Concentración [µg/L] de Manganese en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	23	N.E
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella PET	9.46	N.E
Vermette et al., 1995	Colorado, EEUU	N.E	Embudos y Botellas cubiertos de teflon	5.17	N.E
	Illinois, EEUU			2.11	
	Tennessee, EEUU			1.25	
Helmerts y Schrems, 1995	Zona sur, Océano Atlántico	N.E	Embudo y botella PET	3.43	5.12
Takeda et al., 2000	Hiroshima, Japón	Cubierta	Embudo y botella PET	1.64	4.55
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudo y botella PET	2.11	6.4
Hu y Balasubramanian, 2003	Singapur	N.E	Tanques colectores de PE	48.6	N.E
Chang et al., 2004	Texas, EEUU	Cubierta	Teja de madera	22	5.55
			Aluminio	10	
			Hierro galvanizado	10	
		Toma directa	N.E	17	
Migliavacca et al., 2004	Región de Candiota, Brasil	N.E	Embudo y botella PET	2.94	5.4

Tabla 16. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Manganeso en el agua lluvia (continuación)

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	Tanque de plástico	0.0065	N.E
Migliavacca et al., 2005	Guaiba, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	4.05	5.97
Garcia et al., 2006	Rancho viejo, México	N.E	Tanque de PE	7.32	4.5
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	8.79	N.E
Báez et al., 2007	Ciudad de México	Cubierta	Tanques colectores de PE	9.64	5.08
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	9.94	5.6
Sekabira et al., 2010	N.E	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	30	N.E
	Boa Vista, Brasil			55.82	4.7
Honório et al., 2010	Manaus, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	75.32	4.1
	Tabatinga, Brasil			17.97	5.1
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	8.7	6.1
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflón	13.7	N.E
	Cape Point, Sudáfrica			1.8	
Wilbers et al., 2013	Mekong Delta, Vietnam	Cubierta	Paja, asbestos y metal galvanizado	2	7.1
Cobbina et al., 2015	Tamale, Ghana	N.E	Botellas esterilizadas	10	7.4
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenya	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	19.72	6.6

N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno

### 3.17 Molibdeno (Mo)

El molibdeno es un metal y un mineral que generalmente se encuentra asociado a otros elementos. Guzmán (2015) explica que el molibdeno es utilizado en obtención de aleaciones para fabricar aceros más resistentes, en la industria petrolera como catalizador de azufre, en el proceso de refinación del petróleo, en la fabricación de piezas de aviones y automóviles, en la industria química como pigmento para la fabricación de plásticos pinturas y compuestos de caucho, y en la agricultura, para prevenir la carencia de molibdeno en los cultivos. Shijo *et al.* (1996) comenta que pocas publicaciones acerca de la caracterización química del agua lluvia reportan molibdeno debido a la insuficiente sensibilidad instrumental.

La Tabla 17 muestra las concentraciones de molibdeno en el agua lluvia. Se observa que en general los países que reportaron presencia de molibdeno en el agua lluvia no tienen niveles altos de este metal pesado que pueda comprometer la salud, en caso de que el agua lluvia sea utilizada para consumo humano.

Tabla 17. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de molibdeno en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	valor $\mu\text{g/L}$	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	0.2	N.E
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudos y Botellas de PE	0.72	N.E
Al-Momani, 2003	Área rural, Jordania	N.E	Embudos y Botellas de PE	0.32	6.4
		Tanque de almacenamiento	Concreto, plástico y Hierro galvanizado	0.11	
Morrow et al., 2007	Australia		Hierro galvanizado	0.08	N.E
		Cubierta	Acero recubierto con Al-Zn	0.12	
	Boa Vista, Brasil			0.29	4.7
Honório et al., 2010	Manaus, Brasil	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudos y Botellas de PE	0.58	4.1
	Tabatinga, Brasil			0.58	5.1
Wetangula y Wamalwa et al., 2015	Menengai, Kenia	Sistema instalado a 1.5 m del suelo	Embudo y botella PET	0.18	6.6

N.E: No Específica; PE: Polietileno; PL: Poliestireno

### 3.18 Cobalto (Co)

El Cobalto se encuentra asociado a otros elementos como oxígeno, azufre y Arsénico. También, el Cobalto se mezcla con otros metales para formar aleaciones más resistentes al desgaste y la corrosión. Estas aleaciones son utilizadas en aplicaciones militares e industriales como por ejemplo en la fabricación de motores de avión, imanes y en herramientas cortantes y de trituración. Los compuestos de Cobalto se utilizan como colorantes en vidrio, cerámicas y pinturas, como catalizadores y en productos para secado de pinturas. El Cobalto también puede existir en formas radioactivas como el isótopo  $^{58}\text{Co}$  y el  $^{60}\text{Co}$  que pueden ser liberados al ambiente como consecuencia de accidentes nucleares, la disposición de residuos radioactivos o durante las operaciones en plantas de energía nuclear. El Cobalto no puede ser destruido en el ambiente. Solamente puede cambiar de forma, adherirse o separarse en partículas. La OMS (2006) menciona que existe un bajo nivel de ocurrencia del Cobalto y sus compuestos en el agua.

La Tabla 18 muestra las concentraciones de Cobalto en el agua lluvia. Se observa que en general los países que reportaron presencia de Cobalto en el agua lluvia no tienen niveles altos de este metal pesado que pueda comprometer la salud, en caso de que el agua lluvia sea utilizada para consumo humano.

Tabla 18. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de Cobalto en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Galloway et al., 1982	Georgia, EEUU	N.E	N.E	1.8	N.E
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudos y Botellas de PE	0.13	N.E
Helmers y Schrems, 1995	Zona sur, Océano Atlántico	N.E	Embudos y Botellas de PE	1.72	5.12
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Cubierta de Hierro galvanizado, cemento y Zinc; Tanques de concreto, plástico y Hierro galvanizado	0.16	N.E
Cheng y You, 2010	Tainan, Taiwán	Cubierta	Tanque de plástico	0.2	5.6
Huston et al., 2012	Brisbane, Australia	Tanque de almacenamiento	N.E	0.17	6.1
Gichuki y Mason, 2013	Pretoria, Sudáfrica Cape Point, Sudáfrica	N.E	Embudo y botella de teflón	0.3 0.17	N.E

*N.E: No Específica*

### 3.19 Titanio (Ti)

El titanio es utilizado en algunas aleaciones de bronce y acero inoxidable para aumentar la resistencia a la tracción. La mayor parte del metal producido se aplica en los motores de avión y automóvil o en la construcción de submarinos. El dióxido de titanio es utilizado como pigmento en la producción de pinturas, sintéticos, papel, fibra y cosméticos. Otros compuestos como el carburo de titanio y el cloruro de titanio se aplican en la producción de herramientas de corte y como catalizador, respectivamente. La OMS (2006) menciona que existe un bajo nivel de ocurrencia del titanio y sus compuestos en el agua.

La Tabla 19 muestra las concentraciones de titanio en el agua lluvia. Se observa que en general los países que reportaron presencia de titanio en el agua lluvia no tienen niveles altos de este metal pesado que pueda comprometer la salud, en caso de que el agua lluvia sea utilizada para consumo humano.

Tabla 19. Concentración [ $\mu\text{g/L}$ ] de titanio en el agua lluvia.

Referencia	Locación	Lugar muestreo	Sistema	Valor	pH [Und]
Poissant et al., 1994	Montreal, Canadá	N.E	Embudo y botella de PE	1.26	N.E
Zheng et al., 2005	Hong Kong, China	Cubierta	Tanque de plástico	0.0027	N.E
Morrow et al., 2007	Australia	Tanque de almacenamiento	Concreto, plástico y Hierro galvanizado	0.09	N.E

*N.E: No Específica; PE: Polietileno;*



#### 4. RESUMEN DE RESULTADOS.

La Tabla 20 muestra los valores promedio de concentración de metales pesados en el agua lluvia y los rangos de ocurrencia reportados en los estudios que se presentan en las Tablas 1 a 19. Los resultados muestran que las concentraciones promedio de Aluminio, Hierro, Mercurio y Plomo se encuentran por encima del valor máximo permisible especificado en las guías de la OMS y de la norma colombiana para agua potable (Tabla 21). Sin embargo, si cumplen con los valores permisibles para otros usos (Tablas 22 a 26).

Tabla 20. Resultados de metales pesados en el agua lluvia en  $\mu\text{g/L}$ .

Elemento	Valor promedio	Rango
<b>Pb</b>	75	0.12 – 1710
<b>As</b>	2	0 - 6
<b>Cd</b>	1	0 - 384
<b>Cr</b>	2	0.3 - 67
<b>Cu</b>	10	0 - 993
<b>Zn</b>	2087	0 – 59000
<b>Ni</b>	4	0.3 - 66
<b>Se</b>	1	0.1 - 1
<b>Hg</b>	2	0 - 10
<b>Ag</b>	2	0 - 3
<b>Sb</b>	0.2	0 – 0.4
<b>Fe</b>	318	0.1 – 3430
<b>Al</b>	397	0.1 – 1303
<b>Ba</b>	3	0 - 12
<b>V</b>	6	0 - 53
<b>Mn</b>	11	0 - 75
<b>Mo</b>	0.3	0.1 - 1
<b>Co</b>	1	0.1 - 2
<b>Ti</b>	1	0 - 1

En las Figuras 1 a 6, se presenta la comparación entre los valores promedio de concentración de Plomo, Cobre, Zinc y Aluminio en Colombia con otros países. Adicionalmente, se comparan los valores con la norma colombiana para agua potable (Resolución 2115 de 2007).

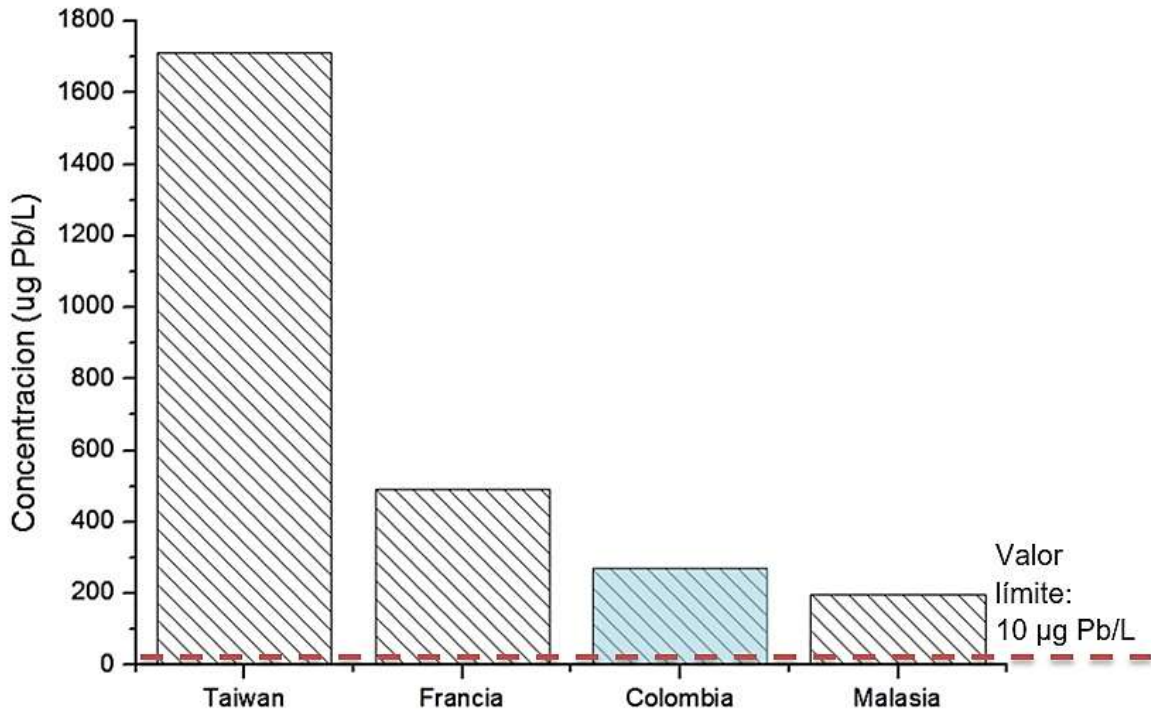


Figura 1. Comparación de concentraciones de Plomo en el agua lluvia en diferentes países del mundo, (---) Valor máximo admisible OMS y Resolución 2115 de 2007.

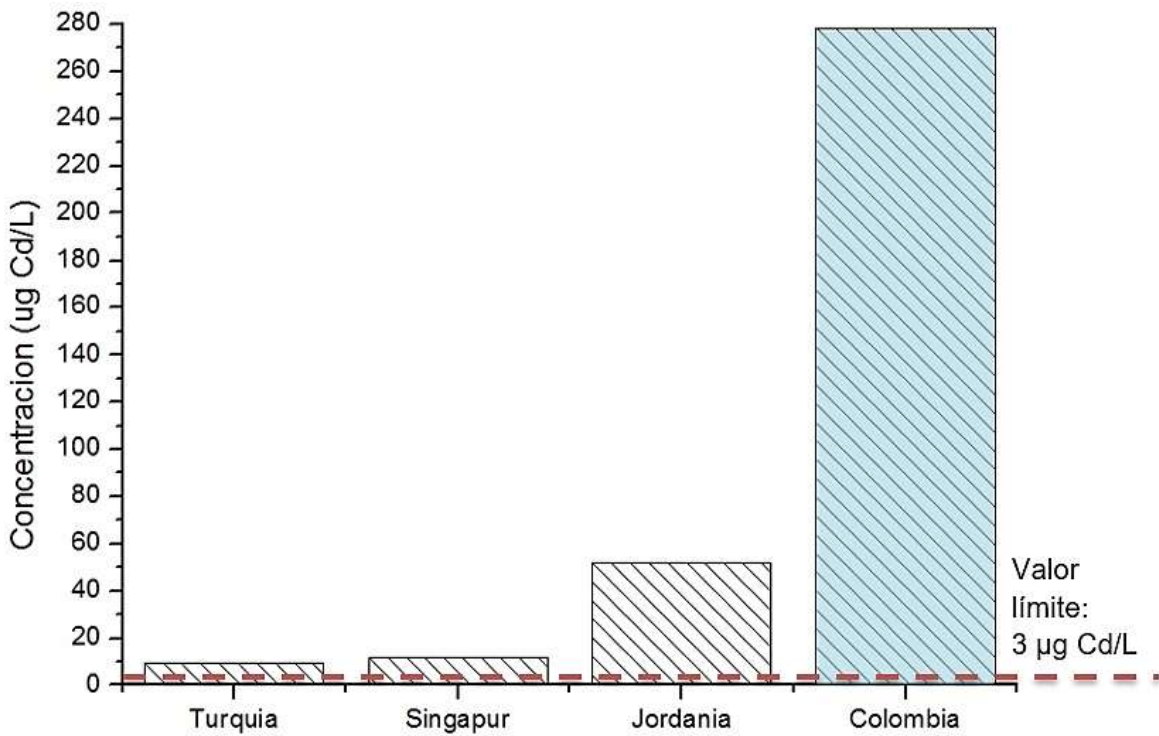


Figura 2. Comparación de concentraciones de Cadmio en el agua lluvia en diferentes países del mundo, (---) Valor máximo admisible OMS y Resolución 2115 de 2007.

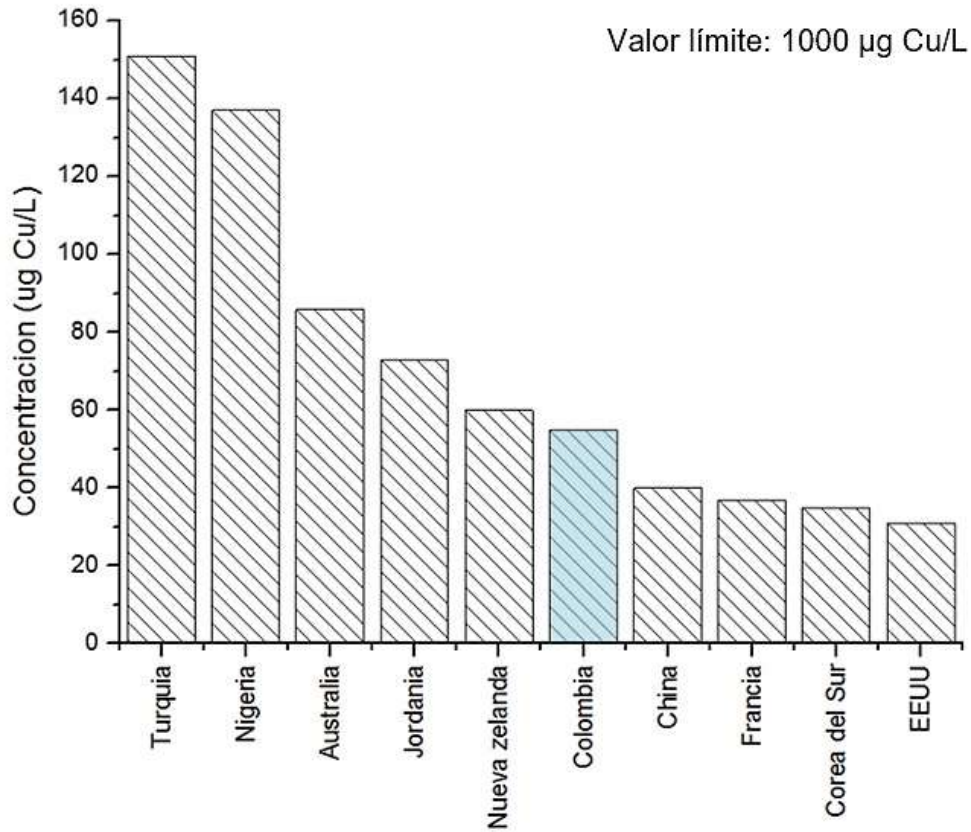


Figura 3. Comparación de concentraciones de Cobre en el agua lluvia en diferentes países del mundo.

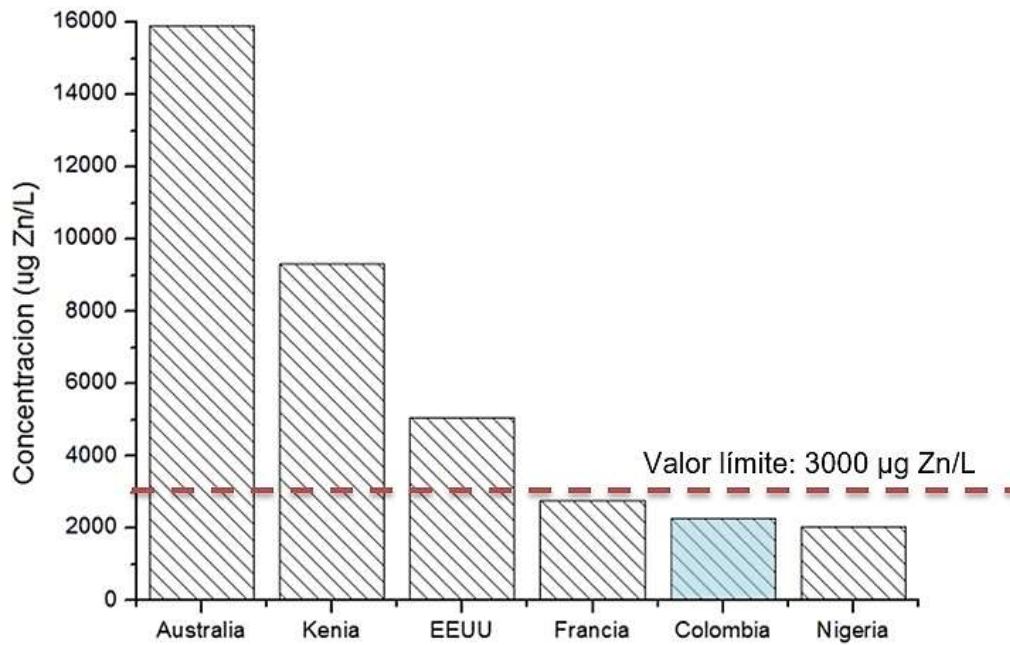


Figura 4. Comparación de concentraciones de Zinc en el agua lluvia en diferentes países del mundo, (---) Valor máximo admisible OMS y Resolución 2115 de 2007.

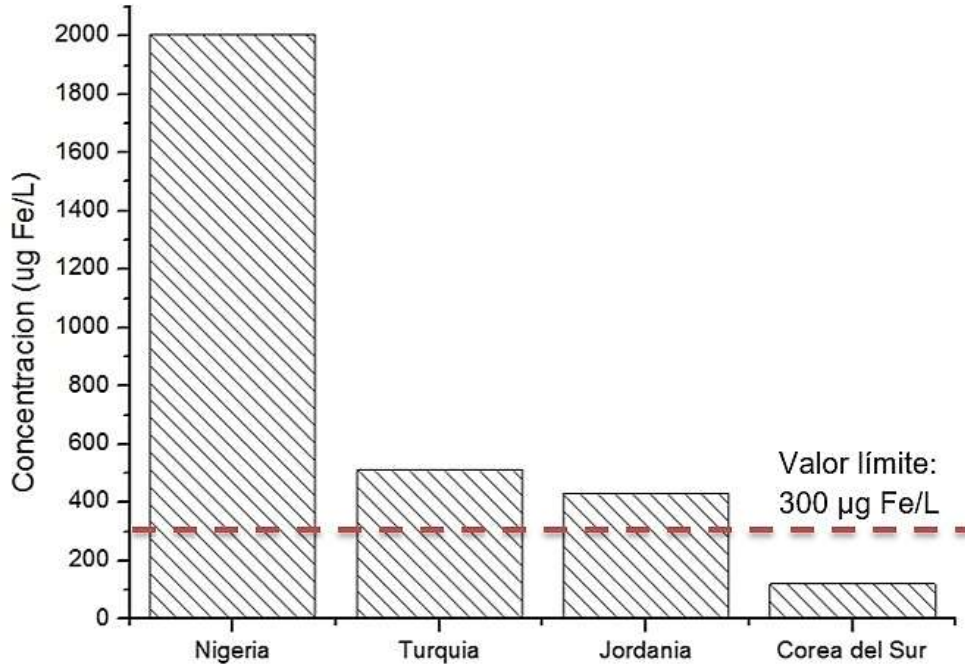


Figura 5. Comparación de concentraciones de Hierro en el agua lluvia en diferentes países del mundo, (---) Valor máximo admisible OMS y Resolución 2115 de 2007.

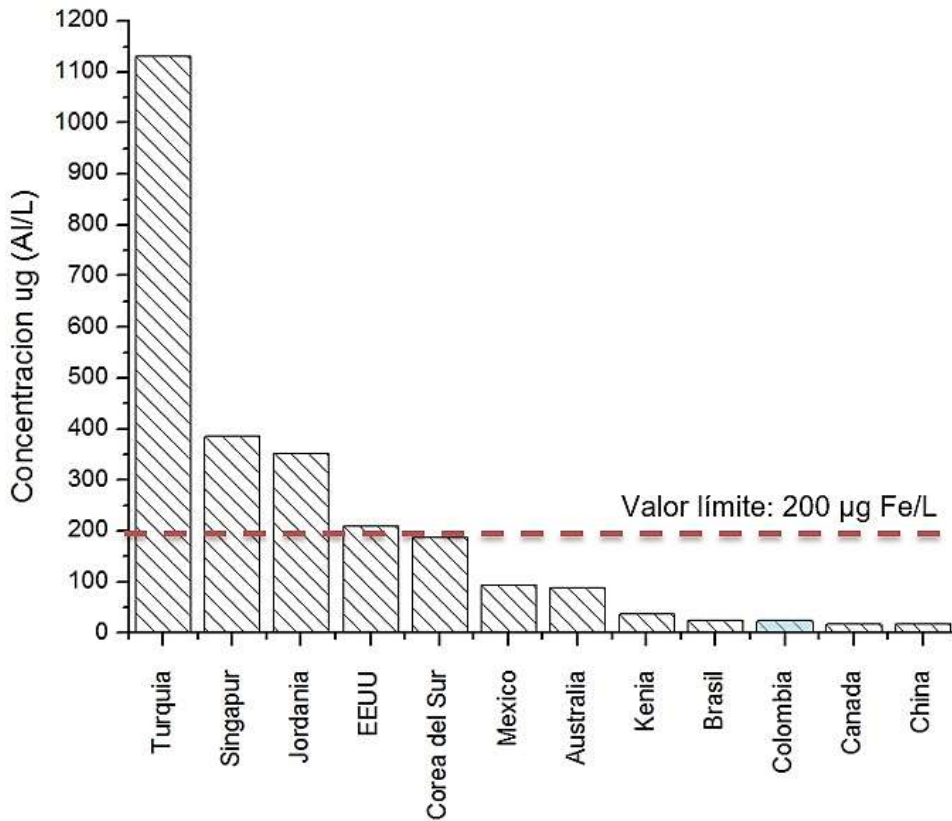


Figura 6. Comparación de concentraciones de aluminio en el agua lluvia en diferentes países del mundo, (---) Valor máximo admisible OMS y Resolución 2115 de 2007.

## 5. NORMAS PARA REÚSO DE AGUA LLUVIA

- I. Nivel nacional
  - a) Resolución 1207 de 2014: Disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.
  - b) Resolución 2115 de 2007: Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano
- II. Nivel internacional
  - a) La organización mundial de la salud: La OMS establece unas directrices para la calidad del agua potable que son el punto de referencia internacional para el establecimiento de estándares y seguridad del agua potable.
  - b) La organización de las Naciones Unidas para alimentación y la agricultura: La FAO establece unas directrices para la calidad del agua en la agricultura.
  - c) Directiva 98/83/EC: Directrices para la calidad del agua destinadas al consumo humano establecidas por La Unión Europea.
  - d) La agencia de protección ambiental de EEUU: Criterios norteamericanos recomendados de calidad del agua para la protección de la vida acuática y la salud humana en aguas superficiales.

Los valores máximos permisibles de las anteriores normativas se encuentran resumidos en las siguientes tablas. Los parámetros de calidad mostrados corresponden exclusivamente a metales pesados encontrados comúnmente en el agua lluvia. Adicionalmente, se muestra que para algunos parámetros no existe un valor permisible, debido a que no existen estudios sobre los efectos de ese elemento en un organismo vivo y no es viable definir un valor límite.

### 5.1 Norma para agua potable

El agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada uno de los parámetros que se encuentran en la Tabla 21.

Tabla 21. Valores máximos permisibles para agua potable en µg/L

Parámetro	OMS <sup>1</sup>	UE <sup>2</sup>	US EPA <sup>3</sup>	Colombia <sup>4</sup>
Aluminio	200	200	N.E	200
Antimonio	5	5	6	20
Arsénico	10	10	10	10
Bario	300	N.E	2000	700
Cadmio	3	5	5	3
Cobalto	N.E	N.E	N.E	N.E
Cobre	1000	3000	1300	1000
Cromo	50	50	100	50
Hierro	300	200	300	300
Manganeso	100	50	50	100
Mercurio	1	1	2	1
Molibdeno	N.E	N.E	N.E	70
Níquel	20	50	610	20
Plata	N.E	10	N.E	50
Plomo	10	50	15	10
Selenio	10	10	50	10
Titanio	N.E	N.E	N.E	N.E
Vanadio	N.E	N.E	N.E	N.E
Zinc	3000	5000	7400	3000

N.E: No Específica

<sup>1</sup> Organización Mundial de la Salud

<sup>2</sup> Directiva 98/83/EC, Unión Europea

<sup>3</sup> Agencia de protección ambiental de EEUU

<sup>4</sup> Resolución 2115 de 2007

## 5.2 Norma para uso agrícola

En la Resolución 1207 de 2014 (Colombia) se especifica la aplicación de la calidad de agua de riego en cultivos de pastos, cultivos no alimenticios, cultivos de fibras celulósicas y derivados, cultivos para la obtención de biocombustibles y lubricantes, cultivos forestales de madera y fibras y otros no comestibles.

Tabla 22. Valores máximos permisibles para uso agrícola en µg/L

Parámetro	FAO <sup>1</sup>	US EPA <sup>2</sup>	Colombia <sup>3</sup>
Aluminio	5000	5000	5000
Antimonio	N.E	N.E	N.E
Arsénico	100	100	100
Bario	N.E	N.E	N.E
Cadmio	10	10	10
Cobalto	N.E	50	50
Cobre	200	200	1000
Cromo	100	100	100
Hierro	5000	5000	5000
Manganeso	N.E	200	200
Mercurio	N.E	N.E	2
Molibdeno	N.E	10	70
Níquel	200	200	200
Plata	N.E	N.E	N.E
Plomo	5000	5000	5000
Selenio	N.E	20	20
Titanio	N.E	N.E	N.E
Vanadio	N.E	100	100
Zinc	2000	2000	3000

N.E: No Específica

<sup>1</sup> Organización de las Naciones Unidas para alimentación y la agricultura

<sup>2</sup> Agencia de protección ambiental de EEUU

<sup>3</sup> Resolución 1207 de 2014

Según la Resolución 1207 de 2014 los valores permisibles máximos para riego de áreas verdes en parques y campos deportivos, jardines y actividades de mantenimiento en Colombia son los de la Tabla 23.

Tabla 23. Valores máximos permisibles para agua de riego de áreas verdes y jardines en µg/L

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Aluminio	5000	Mercurio	2
Antimonio	50	Molibdeno	70
Arsénico	100	Níquel	200
Bario	N.E	Plata	N.E
Cadmio	10	Plomo	5000
Cobalto	50	Selenio	20
Cobre	1000	Titanio	N.E
Cromo	100	Vanadio	100
Hierro	5000	Zinc	3000
Manganeso	200		

### 5.3 Norma para uso industrial

La Resolución 1207 de 2014 (Colombia) especifica la calidad de agua para uso industrial en intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas; para descarga de aparatos sanitarios, para limpieza mecánica de vías, para riego de vías y para sistemas de redes contraincendio.

Tabla 24. Valores máximos permisibles para uso industrial en µg/L

Parámetro	Valor <sup>1</sup>	Valor <sup>2</sup>
Aluminio	5000	5000
Antimonio	N.E	N.E
Arsénico	100	100
Bario	N.E	N.E
Cadmio	10	10
Cobalto	50	50
Cobre	1000	1000
Cromo	N.E	N.E
Hierro	5000	5000
Manganeso	200	200
Mercurio	1	1
Molibdeno	70	70
Níquel	200	200
Plata	N.E	N.E
Plomo	5000	5000
Selenio	10	20
Titanio	N.E	N.E
Vanadio	100	100
Zinc	3000	3000

*N.E: No Específica*

<sup>1</sup> *Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas*

<sup>2</sup> *Limpieza mecánica de vías y riego de vías*

### 5.4 Norma para uso pecuario

Tanto la norma colombiana como la agencia de protección ambiental de EEUU mencionan concentraciones máximas de contaminantes o parámetros que representen un riesgo significativo para la mayoría de las especies en cuerpos de agua. El resumen de estos parámetros se encuentra en la Tabla 25.



Tabla 25. Valores máximos permisibles para agua de uso pecuario en µg/L

Parámetro	US EPA <sup>1</sup>	US EPA <sup>2</sup>	Colombia <sup>2</sup>
Aluminio	750	N.E	5000
Antimonio	N.E	N.E	N.E
Arsénico	340	69	200
Bario	N.E	N.E	N.E
Cadmio	1.8	33	50
Cobalto	N.E	N.E	N.E
Cobre	N.E	4.8	500
Cromo	570	1100	1000
Hierro	1000	N.E	N.E
Manganeso	N.E	N.E	N.E
Mercurio	1.4	1.8	10
Molibdeno	N.E	N.E	N.E
Níquel	470	74	N.E
Plata	3.2	1.9	N.E
Plomo	65	210	100
Selenio	N.E	290	N.E
Titanio	N.E	N.E	N.E
Vanadio	N.E	N.E	N.E
Zinc	120	90	25000

*N.E: No Específica*

<sup>1</sup> *Agencia de protección ambiental de EEUU, agua dulce*

<sup>2</sup> *Agencia de protección ambiental de EEUU. Agua salada*

<sup>3</sup> *Resolución 1594 de 1984*

### 5.5 Norma para otros usos

Directrices como la Resolución 1594 de 1984 (Colombia) y la organización de las Naciones Unidas para alimentación y la agricultura mencionan otras aplicaciones para reutilizar el agua como en la preservación de flora y fauna y para consumo directo por parte del ganado, respectivamente.

Tabla 26. Valores máximos permisibles para agua de uso para preservación de flora y fauna y consumo directo para ganado (FAO) en µg/L

<b>Parámetro</b>	<b>FAO<sup>1</sup></b>	<b>Colombia<sup>2</sup></b>
Aluminio	5000	N.E
Antimonio	N.E	N.E
Arsénico	200	100
Bario	N.E	100
Cadmio	50	10
Cobalto	1000	N.E
Cobre	500	100
Cromo	1000	10
Hierro	N.E	100
Manganeso	50	100
Mercurio	10	10
Molibdeno	300	N.E
Níquel	N.E	10
Plata	N.E	10
Plomo	100	10
Selenio	50	10
Titanio	N.E	N.E
Vanadio	100	N.E
Zinc	24000	10

*N.E: No Específica*

<sup>1</sup> Organización de las Naciones Unidas para alimentación y la agricultura

<sup>2</sup> Resolución 1594 de 1984

## 6. CONCLUSIONES

- Las concentraciones observadas de Aluminio, Hierro, Mercurio y Plomo en el agua lluvia no cumplen con la norma colombiana para agua potable (Resolución 2115 de 2007).
- Las concentraciones de Arsénico, Cromo, Cobre, Cadmio, Cobalto, Zinc, Níquel, Selenio, Plata, Antimonio, Bario, Manganeso, Molibdeno, Titanio y Vanadio si cumplen con la norma colombiana para agua potable (Resolución 2115 de 2007).
- Las concentraciones observadas de Aluminio, Antimonio, Arsénico, Bario, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Hierro, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Titanio, Vanadio y Zinc en el agua lluvia si cumplen con la norma colombiana para riego de cultivos, áreas verdes y jardines (Resolución 1207 de 2014).
- Las concentraciones observadas de Mercurio en el agua lluvia no cumplen con la norma colombiana para actividades de intercambio de calor en torres de enfriamiento y para la limpieza mecánica o riego de vías (Resolución 1207 de 2014).
- Las concentraciones observadas de Aluminio, Antimonio, Arsénico, Bario, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Hierro, Manganeso, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Titanio, Vanadio y Zinc en el agua lluvia si cumplen con la norma colombiana para actividades de intercambio de calor en torres de enfriamiento y para la limpieza mecánica o riego de vías (Resolución 1207 de 2014).
- Las concentraciones observadas de Aluminio, Antimonio, Arsénico, Bario, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Hierro, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Titanio, Vanadio y Zinc en el agua lluvia si cumplen con la norma colombiana para uso pecuario (Decreto 1594 de 1984).
- Las concentraciones observadas de Hierro, Plomo y Zinc en el agua lluvia no cumplen con la norma colombiana para preservación de flora y fauna (Decreto 1594 de 1984).
- Las concentraciones observadas de Aluminio, Antimonio, Arsénico, Bario, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Plata, Selenio, Titanio y Vanadio en el agua lluvia si cumplen con la norma colombiana para preservación de flora y fauna (Decreto 1594 de 1984).
- Con base en las concentraciones observadas de metales pesados, el agua lluvia puede usarse para descarga de aparatos sanitarios y para sistemas de redes contraincendio.

## 7. REFERENCIAS

### 7.1 Artículos científicos

- Al-Khashman, O. A., 2009. Chemical characteristics of rainwater collected at a western site of Jordan. *Atmospheric Research*, 91(1), 53–61.
- Al-Momani, I. N., 2003. Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP-MS : acidity and possible sources. *Atmospheric Environment*, 37, 4507–4515.
- Báez, a., Belmont, R., García, R., Padilla, H., & Torres, M. C., 2007. Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmospheric Research*, 86(1), 61–75.
- Başak, B., Alagha, O., 2004. The chemical composition of rainwater over Büyükçekmece Lake, Istanbul. *Atmospheric Research*, 71(4), 275–288.
- Brunke, E.-G., Walters, C., Mkololo, T., Martin, L., Labuschagne, C., Silwana, B., Somerset, V., 2016. Mercury in the atmosphere and in rainwater at Cape Point, South Africa. *Atmospheric Environment*, 125, 24–32.
- Caillet, S., Arpagaus, P., Monna, F., Dominik, J., 2001. Factors controlling Be and Pb atmospheric deposition as revealed by sampling individual rain events in the region of Geneva, Switzerland. *J Environ Radioact.* 53, 241–56.
- Chang, M., McBroom, M. W., & Scott Beasley, R., 2004. Roofing as a source of nonpoint water pollution. *Journal of environmental management*, 73(4), 307–15.
- Cheng, M.-C., & You, C.-F., 2010. Sources of major ions and heavy metals in rainwater associated with typhoon events in southwestern Taiwan. *Journal of Geochemical Exploration*, 105(3), 106–116.
- Cobbina, S. J., Agoboh, Y. P., Duwiejuah, a. B., & Bakobie, N., 2015. Evaluation of Stored Rainwater Quality in Basic Schools in the Tamale Metropolis, Ghana. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(4), 583–590.
- Das, R., Das, S., Misra, V., 2005. Chemical composition of rainwater and dust fall at Bhubaneswar in the east coast of India. *Atmos. Environ.* 39, 5908–5916.
- Ehmen, A., Viegas, R., Velizarov, S., Reis, M.A.M., Crespo, J.G., 2006. Removal of heavy metals from drinking water supplies through the ion exchange membrane bioreactor. *Desalination* 199, 405–407.
- Eletta, O. A. A., Oyeyipo, J. O., 2008. Rain Water Harvesting : Effect of Age of Roof on Water Quality. *International Journal of Applied Chemistry*, 4(2), 157–162.

- Forster, J., 1996. Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Water Science and Technology*, 33(6), 39–48.
- Galloway, J. N., Thornton, J. D., Norton, S. A., & Volchok, H. L., 1982. Trace metals in atmospheric deposition: a review and assessment, 16(1), 1677–1700.
- Garcia, R., Deltorresma, C., Padilla, H., Belmont, R., Azpra, E., Arcegacabrera, F., Baez, a., 2006. Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of Mexico, Mexico. *Atmospheric Environment*, 40(32), 6088–6100.
- Garnaud, S., Mouchel, J.M., Chebbo, G., Thevenot, D.R., 1999. Heavy metal concentrations in dry and wet atmospheric deposits in Paris district: comparison with urban runoff. *Sci. Total Environ.* 235, 235–245.
- Gichuki, S. W., & Mason, R. P., 2013. Mercury and metals in South African precipitation. *Atmospheric Environment*, 79, 286–298.
- Gretchen, K., Bielmyer, W., Ray, A., Joseph R., Tomasso, J.J., Isely, S., Klaine J., 2012. Effects of roof and rainwater characteristics on copper concentrations in roof runoff. *Environ Monit Assess*, 184, 2797–2804.
- Gromairemertz, M., Garnaud, S., Gonzalez, a, & Chebbo, G., 1999. Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology*, 39(2), 1–8.
- Halstead, M.J.R., Cunninghame, R.G., Hunter, K.A., 2000. Wet deposition of trace metals to a remote site in Fiordland, New Zealand. *Atmospheric Environment* 34, 665–676.
- Han, J., Gao, X., Liu, Y., Wang, H., Chen, Y., 2013. Distributions and transport of typical contaminants in different urban stormwater runoff under the effect of drainage systems. *Desalination and Water Treatment*, 52(7-9), 1455–1461.
- Helmerts, E., & Schrems, O., 1995. Wet deposition of metals to the tropical north and the south Atlantic ocean. *Atmospheric Environment*, 29(18), 2475-2484.
- Honório, B.A.D., Horbe, A.M.C., Seyler, P., 2010. Chemical composition of rainwater in western Amazonia — Brazil. *Atmospheric Research*, 98, 416–425.
- Hu, G.P., Balasubramanian, R., 2003. Wet deposition of trace metals in Singapore. *Water, Air, and Soil Pollution* 144: 285–300.
- Huston, R., Chan, Y. C., Chapman, H., Gardner, T., & Shaw, G., 2012. Source apportionment of heavy metals and ionic contaminants in rainwater tanks in a subtropical urban area in Australia. *Water research*, 46(4), 1121–32.
- Ioannidou, A., Papastefanou C., 2006. Precipitation scavenging of Be and Cs radionuclides in air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 85, 121-136.

- Jarup, L., 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68(1), 167–182.
- Kaya, G., Tuncel, G., 1997. Trace element and major ion composition of wet and dry deposition in Ankara, Turkey. *Atmos. Environ.* 31, 3985–3998.
- Khare, P., Goel, A., Patel, D., Behari, J., 2004. Chemical characterization of rainwater at a developing urban habitat of Northern India. *Atmos. Res.* 69, 135–145.
- Kieber, R.J., Williams, K., Willey, J. D., Skrabal, S., Brooks, G., 2001. Iron speciation in coastal rainwater: concentration and deposition to seawater. *Marine Chemistry*, 73, 83–95.
- Kulshrestha, U.C., Kulshrestha, M.J., Sekar, R., Sastry, G.S.R., Vairamani, M., 2003. Chemical characteristics of rainwater at an urban site of south-central India. *Atmos. Environ.* 37, 3019–3026.
- Lamprea, K., & Ruban, V., 2011. Characterization of atmospheric deposition and runoff water in a small suburban catchment. *Environmental technology*, 32(9-10), 1141–9.
- Lee, J. Y., Bak, G., & Han, M., 2012. Quality of roof-harvested rainwater--comparison of different roofing materials. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 162, 422–9.
- Losno, R., Bergametti, G., 1988. Zinc partitioning in mediterranean rainwater. *Geophysical research letters*, 15 (12), 389-1392.
- Magyar, M., Ladson, A., Diaper, C., Mitchell, V., 2014. Influence of roofing materials and lead flashing on rainwater tank contamination by metals. *Australian Journal of Water Resources*, 18(1).
- Mccallum, G. J., Woodward., R. N., 1966. Cadmium in New Zealand Rainwater. *Nature*, 209, 69-70.
- Melaku, S., Morris, V., Raghavan, D., & Hosten, C., 2008. Seasonal variation of heavy metals in ambient air and precipitation at a single site in Washington , DC. *Environmental Pollution*, 155, 88-98.
- Migliavacca, D., 2004. Study of chemical elements in atmospheric precipitation in South Brazil. *Atmospheric Environment*, 38(11), 1641–1656.
- Migliavacca, D., Teixeira, E.C., Wiegand, F., Machado, A., Sanchez, J., 2005. Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaiba hydrographic basin, Brazil. *Atmos. Environ.* 39, 1829–1844.
- Morrow, A., Coombes, P., Dunstan, H., Evans, C., & Martin, A., 2007. Elements in Tank Water – Comparisons with Mains Water & Effects of Locality & Roofing Materials, 1–8.

- Mouli, P.C., Mohan, S.V., Reddy, S.J., 2005. Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmos. Environ.* 39, 999–1008.
- Ospina-Zúñiga, O.E., Ramírez-Arcila, H., 2014. Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia. *Ingeniería Solidaria*. 10 (17), 125-138.
- Parimal, P., 2015. Groundwater Arsenic remediation: Treatment Technology and Scale UP. Elsevier Inc., Oxford OX5 1GB, UK 978-0-12-801281-9.
- Poissant L., Schmit J.P., Beront, P., 1994. Trace inorganic elements in rainfall in the Montreal Island. *Atmospheric Environment*, 28(2), 339-346.
- Sekabira, K., Origa, H. O., Basamba, T. A., Mutumba, G., & Kakudidi, E., 2010. Archive of SID Heavy metal assessment and water quality values in urban stream and rain water, 7(4), 759–770.
- Shijo, Y., Suzuki, M., Shimizu, T., Aratake S., Uehara N., 1996. Determination of Trace Amounts of Molybdenum in Rainwater and Snow by Graphite-Furnace Atomic after Solvent extraction and Micro-Volume Absorption Spectrometry Back-Extraction. *Analytical Sciences*, 12, 953-957.
- Simmons, G., Hope, V., Lewis, G., Whitmore, J., & Gao, W., 2001. Contamination of potable roof-collected rainwater in Auckland , New Zealand. *Wat. Res.*, 35( 6), 1518–1524.
- Stoepler, M., 1992. Hazardous metals in the environment. Elsevier, Amsterdam Techniques and instrumentation in analytical chemistry. 12, 177-230.
- Takeda, K., Marumoto, K., Minamikawa, T., Sakugawa, H., & Fujiwara, K., 2000. Three-year determination of trace metals and the lead isotope ratio in rain and snow depositions collected in Higashi Hiroshima, Japan. *Atmospheric Environment*, 34, 4525-453.
- Torres, A., Méndez-fajardo, S., López-kleine, L., Marín, V., González, J. A., Suárez, C., Ruiz, A., 2011. Evaluación preliminar de la calidad de la escorrentía pluvial sobre tejados para su posible aprovechamiento en zonas periurbanas de Bogotá, 127–135.
- Sterren, M. Van Der., Rahman, A., Dennis, G. R., 2013. Quality and Quantity Monitoring of Five Rainwater Tanks in Western Sydney , Australia, 139(March), 332–340.
- Vermette, J., Peden, M. E., Willoughby, T. I. M. C., Lindberg, S. E., Weiss, A. D., 2008. Methodology for the sampling of metals in precipitation: results of the national atmospheric deposition program ( NADP ) pilot network, 29(11), 1221–1229.
- Wilbers, G.-J., Sebesvari, Z., Rechenburg, A., & Renaud, F. G., 2013. Effects of local and spatial conditions on the quality of harvested rainwater in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental pollution*, 182, 225–32.

Xu, Z., Wu, Y., Liu, W.-J., Liang, C.-S., Ji, J., Zhao, T., & Zhang, X., 2015. Chemical composition of rainwater and the acid neutralizing effect at Beijing and Chizhou city, China. *Atmospheric Research*, 164-165, 278–285.

Yaziz, M. I., Gunting, H., Sapari, N., & Ghazali, A. W., 1989. Variations in rainwater quality from roof catchments. *Wat. Res.*, 23(6), 761–765.

Zheng, M., Guo, Z., Fang, M., Rahn, K. A., & Kester, D. R., 2005. Dry and wet deposition of elements in Hong Kong. *Marine Chemistry*, 97, 124–139.

Zhu K., Zhang L., Hart W., Hui, M. L.C., 2004. Quality issues in harvested rainwater arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 487-505.

## 7.2 Tesis

Duarte, M.A., 2014. Variabilidad espacio-temporal de las concentraciones de metales pesados (CD, CU, HG, NI, PB, ZN) presentes en aguas lluvias de escorrentía sobre tejados de viviendas en una zona periurbana de Bogotá y su relación con la pluviosidad y los niveles de urbanización. Tesis maestría en hidrosistemas, Pontificia Universidad Javeriana.

## 7.3 Libros

World Health Organization (WHO), 2006, *Guidelines for Drinking-water Quality*, Vol. 1: recommendations, Tercera edición, Geneva.

## 7.4 Documentos inéditos

Decreto 1594, Usos del Agua y Residuos Líquidos (Ministerio de Salud, Republica de Colombia, 26 de Junio de 1984).

Decreto 2115, Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano (Ministerio de la Protección Social y de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, República de Colombia, 22 de Junio de 2007).

Gould, J., 1999. Is rainwater safe to drink? A review of recent findings. ASAL Consultants, Lincoln University, New Zealand.

Resolución 1207, disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, República de Colombia, 25 de Julio de 2014).

Morrow, A., Coombes, P., Dunstan, H., Evans, C., & Martin, A., 2006. Elements in Tank Water – Comparisons with Mains Water & Effects of Locality & Roofing Materials, (2000), 1–8.



Pescod, M. B. (1992) "Wastewater Treatment and Reuse in Agriculture," FAO Irrigation and Drainage Paper No. 47, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Salem, H. M., Eweida, A., Farag, A., 2000. Heavy metals in drinking water and their environmental impact on human health. ICEHM2000, Cairo University, Egypt, Septiembre, 2000, 542- 556.

Smith, H., Fok, Y.S., Heitz, L.F., 1999. Considerations for developing guidelines for rainwater catchment systems in the US Virgin Islands, Dept. of Water Resources, University of the Virgin Islands, St Thomas.

UNICEF, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, 2002. Arsénico y metales pesados en agua de Nicaragua. Ed. O. Moraga, UNICEF, Managua, Nicaragua.

Unión Europea. (3 de Noviembre de 1998). DIRECTIVA 98/83/CE DEL CONSEJO Relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Unión Europea.

U.S. EPA (2004) Guidelines for Water Reuse, EPA-625/R-04-108, U.S. Environmental Protection Agency and U.S. Agency for International Development, Washington, DC.

#### 7.5 Memorias de congresos

McCarton, L., O'Hogain, S., Reid, A., McIntyre, N., Pender, J.: Pilot Rainwater Harvesting Study Ireland. 14th International Rainwater Catchment Systems Conference. Malayasia, 10 Agosto 2009.

Wetang, G. N., & Wamalwa, H. M., 2015. Trace Elements in Rainfall Collected around Menengai Area Kenya. Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015

#### 7.6 Páginas web

ATSDR, Agency for toxic substances y disease registry, 2011. Toxic Substances portal. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/indexAZ.asp#A>, visitada el 30.09.16.

Guzman, C., 2015. Molibdeno. Disponible en: <https://prezi.com/clrbh2hoxpqz/m-o-l-i-b-d-e-n-o/>, visitada el 20.10.16.

Hernández R. A, Campos V.L., 2002. Evaluación de Plomo en agua de lluvia en dos sitios de muestreo (centro de la Ciudad de México y Ciudad Nezahualcoyotl). Disponible en: [web.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/congresos/.../CAMPOS.do](http://web.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/congresos/.../CAMPOS.do), visitada el 07.10.16.

US EPA, United States Environmental Protection Agency (Agencia de protección del medio ambiente de los Estados Unidos), 2015. Priority Pollutant List. Disponible en: <https://www.epa.gov/waterdata>, visitada el 30.09.16