



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE CARTAGENA**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS Y
DE INGENIERÍA DE MINAS**

MASTER EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS DEL AGUA Y EL TERRENO

**ANÁLISIS DE RIESGOS ECOLÓGICO Y PARA LA POBLACIÓN EN
EMPLAZAMIENTOS MINEROS, INDUSTRIALES Y URBANOS AFECTADOS
POR METALES PESADOS**

AUTOR:

JOSÉ GREGORIO CUEVAS BENCOSME

DIRECTORES:

**JOSÉ ALBERTO ACOSTA AVILÉS
SILVIA MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

CARTAGENA, JULIO 2020



AGRADECIMIENTOS.

Para este trabajo fin de master agradecer a todos los que de una forma u otra han contribuido, personas, instituciones. En primer lugar, a mis directores José Alberto Acosta Avilés y Silvia Martínez Martínez, por aportar sus conocimientos técnicos en el área, ser guías en el desarrollo y confiar en mi persona al poner a mi disposición las herramientas a fin de lograr el objetivo trazado.

A la institución que me dio la oportunidad de ser parte de este master, el ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología MESYCT, a través de su programa de becas internacionales, en procura de formar profesionales capaces de generar valor agregado.

A la Universidad Politécnica de Cartagena por brindar un servicio eficaz, en los diversos departamentos, sobre todo con aquellos que tuve más interacción servicio de estudiantes en la persona de Susana Martínez y servicios internacionales con Lucas Muñoz.

A mis padres por esta pendiente en todo lo concerniente a mi estadía y aspectos académicos, ser soporte y punta de lanza en todos los proyectos en los que me involucre.

INDICE.

RESUMEN.....	8
1.INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. La contaminación de suelos por metales pesados y metaloides.....	11
1.2. Riesgos para los ecosistemas y la población.....	14
1.3. Evaluación del riesgo para los ecosistemas.....	14
1.4. Evaluación de riesgo para la población.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo general.....	16
2.1. Objetivos específicos.....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1. Descripción de las zonas de estudio.....	18
3.2. Análisis de riesgo con el programa RISC5.....	21
3.2.1. Descripción del software.....	21
3.2.2. Riesgo para la salud.....	22
3.2.3. Riesgo para los ecosistemas.....	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1. Análisis de riesgo para la salud en zonas mineras.....	25
4.1.1. Riesgo cancerígeno Depósito Minero El Lirio.....	26
4.1.1. Riesgo no carcinogénico Depósito Minero El Lirio.....	26
4.1.2. Riesgo cancerígeno Depósito Minero Santa Antonieta.....	28
4.1.2. Riesgo no carcinogénico Depósito Minero Santa Antonieta.....	29
4.2. Análisis de riesgo para la salud en zonas industriales.....	30
4.2.1. Riesgo cancerígeno Balsa 1 (residuos).....	31
4.2.1. Riesgo no carcinogénico Balsa 1 (residuos).....	32
4.2.2. Riesgo cancerígeno Balsa 2 (residuos).....	34
4.2.2. Riesgo no carcinogénico Balsa 2 (residuos).....	35
4.3. Análisis de riesgo para la salud en zonas urbanas.....	36
4.3.1. Riesgo cancerígeno La Unión.....	37
4.3.1. Riesgo no carcinogénico La Unión.....	38

4.3.2. Riesgo cancerígeno Mazarrón.....	39
4.3.2. Riesgo no carcinogénico Mazarrón.....	40
4.4. Analisis de riesgo para la fauna en zonas mineras.	41
4.5. Sensibilidad de los parametros del análisis de riesgos.	46
4.5.1. Riesgo para la salud.....	46
4.5.2. Riesgo para la fauna	53
5. CONCLUSIONES.....	56
6.REFERENCIAS.....	58
7. ANEXO TABLAS.....	59

INDICE FIGURAS.

Figura 1. Vista aérea de las zonas de estudio de la Región de Murcia	17
Figura 2. Imagen aérea de la zona minera El Lirio	18
Figura 3. Imagen aérea de la zona minera de Santa Antonieta.....	18
Figura 4. Imagen aérea de la zona residencial La Unión.....	19
Figura 5. Imagen aérea de la zona residencial Mazarrón.....	19
Figura 6. Imagen aérea de la zona industrial Balsa 1.....	20
Figura 7. Imagen aérea de la zona industrial Balsa 2	20
Figura 8. Factores considerados en el cálculo de riesgo dérmico e inhalación.....	22
Figura 9. Factores considerados en el cálculo de riesgo, en la ingestión	23
Figura 10. Parámetros de exposición del usuario zona minera del Lirio.	25
Figura 11. Resultado de la evaluación de riesgo a cáncer depósito minero El Lirio ...	26
Figura 12. Parámetros de exposición del usuario zona minera de Santa Antonieta ...	28
Figura 13. Resultado de la evaluación de riesgo a cáncer depósito Santa Antonieta. ...	29
Figura 14. Parámetros de exposición de los usuarios obreros zona industrial Balsa ..	31
Figura 15. Resultado de riesgo a cáncer del usuario 1 en la Balsa 1	32
Figura 16. Resultado de riesgo a cáncer del usuario 2 en la Balsa 1	32
Figura 17. Parámetros de exposición de los usuarios zona industrial Balsa 2.....	34
Figura 18. Resultado riesgo a cáncer para el arsénico vía la ingestión y contacto	35
Figura 19. Parámetros de exposición de los usuarios residencial zona de la Unión ...	37
Figura 20. Resultado de la evaluación de riesgo a cáncer zona La Unión.	38
Figura 21. Parámetros de exposición de los usuarios residencial zona de Mazarrón .	39
Figura 22. Resultado de la evaluación de riesgo a cáncer en zona Mazarrón.....	40
Figura 23. Parámetros de sensibilidad de exposición en zona minera de Lirio	46
Figura 24. Parámetros de sensibilidad de exposición en la zona Santa Antonieta. ...	47
Figura 25. Características del receptor y parámetros de exposición por ingestión	53

INDICE TABLAS.

Tabla 1. Concentraciones promedio en El Lirio y Santa Antonieta.....	18
Tabla 2. Concentraciones promedio en La Unión y Mazarrón.....	19
Tabla 3. Concentraciones promedio en La Balsa 1 y Balsa 2.....	20
Tabla 4. Resultados de riesgo a contraer cáncer en deposito El Lirio.....	26
Tabla 5. Resultados de riesgo a la salud por las distintas en depósito del Lirio	27
Tabla 6. Resultados de riesgo a contraer cáncer en depósito Santa Antonieta.....	28
Tabla 7. Resultados de riesgo a la salud en zona minera de Santa Antonieta	29
Tabla 8. Resultados de riesgo a contraer cáncer en la zona industrial Balsa 1.....	31
Tabla 9. Resultados de riesgo a la salud en zona industrial Balsa 1	33
Tabla 10. Resultados de riesgo a contraer cáncer en zona industrial Balsa 2.	34
Tabla 11. Resultados de riesgo a la salud en zona industrial Balsa 2	35
Tabla 12. Resultados de riesgo a contraer cáncer en la zona de la Unión.....	37
Tabla 13. Resultados de riesgo a la salud en zona residencial de la Unión.....	38
Tabla 14. Resultados de riesgo a contraer cáncer zona residencial de Mazarrón.....	40
Tabla 15. Resultados de riesgo a la salud en zona residencial de Mazarrón.....	41
Tabla 16. Concentraciones de metales y metaloides, receptor El Lirio	41
Tabla 17. Concentración en la vegetación deposito minero El Lirio.....	42
Tabla 18. Concentraciones ingeridas vía el vegetal en El Lirio.....	42
Tabla 19. Concentraciones ingeridas de partículas en suelo El Lirio	42
Tabla 20. Concentraciones totales ingeridas de metales y metaloides en El Lirio.	42
Tabla 21. Niveles promedio no observados de riesgo toxico en El Lirio.....	43
Tabla 22. Niveles mínimos promedio con riesgo toxicológico en El Lirio	43
Tabla 23. Niveles promedio ajustado no observados de riesgo toxico en El Lirio	43
Tabla 24. Niveles mínimos promedio ajustado con riesgo toxicológico en El Lirio..	43
Tabla 25. Concentraciones características del receptor Santa Antonieta.....	43
Tabla 26. Concentración en la vegetación Santa Antonieta	44
Tabla 27. Concentraciones ingeridas vía el vegetal en Santa Antonieta.....	44
Tabla 28. Concentraciones ingeridas de partículas en Santa Antonieta.....	45

Tabla 29. Concentraciones totales ingeridas en Santa Antonieta	45
Tabla 30. Niveles promedio no observados de riesgo toxico Santa Antonieta.....	45
Tabla 31. Niveles mínimos promedio con riesgo toxicológico Santa Antonieta.....	45
Tabla 32. Niveles promedio ajustado no observados en Santa Antonieta... ..	45
Tabla 33. Niveles mínimos promedio ajustado en Santa Antonieta	45
Tabla 34. Resultados de sensibilidad de riesgo a contraer cáncer en El Lirio.....	46
Tabla 35. Resultados de sensibilidad de riesgo a la salud en depósito El Lirio.....	47
Tabla 36. Resultados de sensibilidad a contraer cáncer en Santa Antonieta	48
Tabla 37. Resultados de sensibilidad de riesgo a la salud en Santa Antonieta	48
Tabla 38. Concentraciones originales de metales pesados para la saturación	49
Tabla 39 . Concentraciones criticas de metales pesados para la saturación	49
Tabla 40. Resultados de senilidad da contraer cáncer zona industrial Balsa 1.....	50
Tabla 41 . Concentraciones promedio identificados y potenciales críticos.....	50
Tabla 42. Resultados de sensibilidad contraer cáncer zona Industrial Balsa 2.....	51
Tabla 43. Resultados de sensibilidad riesgo a la salud zona Industrial Balsa 2	51
Tabla 44. Resultados de sensibilidad de riesgo a cáncer en La Unión.....	52
Tabla 45. Resultados de sensibilidad de riesgo a la salud en La Unión.....	52
Tabla 46. Resultados de sensibilidad de riesgo a cáncer Mazarrón.....	52
Tabla 47. Resultados de sensibilidad de riesgo a la salud Mazarrón.....	53
Tabla 48. Resultado alternativo de niveles de toxicidad de arsénico en el receptor...	54
Tabla 49. Resultado alternativo de niveles de toxicidad de cadmio en el receptor.....	54
Tabla 50. Resultado alternativo de niveles de toxicidad de cobre en el receptor	54
Tabla 51. Resultado alternativo de niveles de toxicidad de plomo en el receptor.....	55
Tabla 52. Resultado alternativo de niveles de toxicidad de zinc en el receptor	55

RESUMEN

Los estudios capaces de estimar los niveles de riesgo a contraer cáncer y determinar otros efectos nocivos a la salud por exposición a suelos contaminados de compuestos orgánicos e inorgánicos, han alcanzado vital importancia, y en tal sentido, se han venido implementado modelos matemáticos que establecen parámetros numéricos para evaluar estos riesgos, para ellos tienen en cuenta el estado que presente el contaminante, las vías de exposición, así como las características del receptor.

Este trabajo fin de máster tiene como objetivo principal determinar los riesgos para la salud y los ecosistemas, de diferentes emplazamientos afectados por altas concentraciones de arsénico, cadmio, cobre, plomo y zinc.

Los escenarios evaluados se encuentran ubicados en la Región de Murcia, en zonas identificadas como industriales, residenciales y mineras. También se evaluaron los riesgos ecológicos sobre ciertos mamíferos propios de estas zonas, estableciendo límites de concentración a partir de los cuales existiría un riesgo para la especie en cuestión.

La herramienta utilizada para caracterizar estos niveles de riesgo fue el programa RISC5, una interfaz gráfica intuitiva que permite la modelación de diversos escenarios terrestres y acuáticos, con más de 128 compuestos químicos caracterizados, permitiendo de manera simultánea evaluar modelos con características distintas.

Los resultados obtenidos conforme a los escenarios planteados presentan diversos grados de riesgo en las zonas mineras de El Lirio y Santa Antonieta, y para un usuario con características recreacionales ambos emplazamientos no presentan ni riesgo cancerígeno, ni tóxico (no carcinogénico). Por el contrario, en las zonas residenciales de La Unión, Mazarrón y de la Balsa 2 de la zona industrial existiría tanto riesgo carcinogénico como tóxicos, sobre todo al considerar la vía de exposición por ingestión, superando el parámetro de referencia 10^{-5} . Finalmente, en la Balsa 1 de la zona industrial el riesgo sería tóxico asociado al contacto dérmico por altas concentraciones de zinc.

El conocimiento de los riesgos asociados a estos emplazamientos, permitirá diseñar y plantear planes de prevención, que pudiesen reducir el impacto sobre la salud, ya sea por inhalación, ingestión o contacto dérmico de los metales pesados, presentes en los mismos.

ABSTRACT

The studies capable of estimating the levels of risk of contracting cancer and determining other harmful effects on health due to exposure to soils contaminated with organic and inorganic compounds have reached vital importance, and in this sense, mathematical models have been implemented that establish numerical parameters to evaluate these risks, for which they take into account the state that the contaminant presents, the exposure routes, as well as the characteristics of the receptor.

The main objective of this final master's work is to determine the risks to health and ecosystems of different sites affected by high concentrations of arsenic, cadmium, copper, lead and zinc.

The scenarios evaluated are located in the Region of Murcia, in areas identified as industrial, residential and mining. The ecological risks to certain mammals in these areas were also evaluated, establishing concentration limits above which there would be a risk to the species.

The tool used to characterize these risk levels was the RISC5 program, an intuitive graphic interface that allows the modeling of diverse terrestrial and aquatic scenarios, with more than 128 chemical compounds characterized, allowing the simultaneous evaluation of models with different characteristics.

The results obtained according to the scenarios present different degrees of risk in the mining areas of El Lirio and Santa Antonieta, and for a user with recreational characteristics both sites present no carcinogenic or toxic (non-carcinogenic) risk, on the other hand, in the residential areas of La Unión, Mazarrón and La Balsa 2 in the industrial area there would be both carcinogenic and toxic risk, especially when considering the exposure route by ingestion, exceeding the reference parameter 10^{-5} . Finally, in La Balsa 1 of the industrial zone, the risk would be toxic associated with dermal contact due to high concentrations of zinc.

Knowledge of the risks associated with these sites will make it possible to design and propose prevention plans that could reduce the impact on health, whether by inhalation, ingestion or dermal contact of the heavy metals present there.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de riesgo para la salud humana y los sistemas ecológicos está definida como la probabilidad de que se generen efectos adversos como resultado de exponerse ante contaminantes químicos, factores físicos o biológicos (EPA, 2016).

Es ampliamente conocido que la acumulación de metales pesados en los suelos reduce la calidad del medio ambiente y amenaza la salud humana (Wang, *et al.*, 2019). Los seres humanos están expuestos a estos contaminantes por tres vías principales: la ingestión, inhalación de partículas y la absorción dérmica (Sardar, *et al.*, 2013). La exposición prolongada a los metales pesados puede conducir progresivamente a procesos degenerativos musculares, físicos y neurológicos similares a los de enfermedades como el Parkinson, la esclerosis múltiple, la distrofia muscular y el Alzheimer. Además, la exposición crónica a largo plazo de algunos metales pesados puede causar cáncer (Jerup, 2003).

Todos los metales pesados, a pesar de que algunos de ellos son micronutrientes esenciales, tienen efectos tóxicos en los animales a través de la interferencia metabólica, desestabilizando los ecosistemas debido a su bioacumulación en los organismos, y causando efectos tóxicos sobre la biota e incluso propiciando la muerte (Pandey and Madhuri, 2014).

La evaluación de riesgos es un proceso tanto para determinar la probabilidad de posibles peligros como la evaluación de las condiciones de vulnerabilidad existentes que podrían suponer una amenaza para las personas, y el medio ambiente del que dependen (ONU/EIRD, 2009). En este sentido, el programa RISC5 es una herramienta que permite evaluar los posibles riesgos para la salud humana y otros receptores ecológicos en lugares contaminados, el cual se basa en la evaluación de los vínculos entre las fuentes de contaminación y las vías de exposición. En la evaluación del riesgo para la salud, el proceso que utiliza el programa es evaluar las propiedades tóxicas de los productos químicos en relación a las condiciones en las que las personas están expuestas a ese compuesto químico. Su principal uso es la determinación del riesgo que tendría una población expuesta a una sustancia potencialmente tóxica (Fargašová, 2016).

Por otro lado, la evaluación de los riesgos ecológicos es un proceso de adquisición, organización y análisis de datos ambientales para estimar el riesgo o la probabilidad de que se produzcan efectos indeseables en los organismos, poblaciones o ecosistemas causados por diversos factores de estrés relacionados con las actividades humanas (Jensen and Bruus, 2006).

Una vez identificados y calificados todos los parámetros necesarios para el análisis de riesgos, el programa mediante relaciones aritméticas y modelos de predicción, realiza una estimación del riesgo el cual ofrece la contribución de manera separada de cada vía de exposición y concentración de cada elemento a los posibles riesgos de los organismos receptores (humanos y fauna). Es de destacar que el programa no ofrece el tipo de daño que ocasiona la sustancia evaluada, cada elemento al acumularse en los tejidos en concentraciones excesivas puede llegar a generar un daño a una zona en particular, por ejemplo, el arsénico y

cadmio se acumulan en el riñón, mientras que el plomo lo hace en la sangre y por lo tanto los daños ocasionados serían distintos (Dorne, 2011).

1.1. La contaminación de suelos por metales pesados y metaloides.

La exposición a algunos metales pesados y metaloides se ha asociado a una enorme variedad de efectos adversos para la salud, incluido el cáncer. Además, aunque algunos elementos son esenciales para los seres humanos, pueden ser peligrosos a ciertas concentraciones (Rodríguez, 2017). A continuación, se exponen las características más destacadas de los metales y metaloides evaluados en este trabajo.

Arsénico

El arsénico es un elemento clasificado como metaloide, ya que presenta propiedades metálicas y no metálicas. Se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, con niveles que oscilan entre 2 y 5 mg kg⁻¹ (Pérez, 2015). Las principales fuentes naturales liberadas a la atmósfera provienen de la roca madre y su meteorización en los suelos, así como las erupciones volcánicas con arrastres de partículas por el viento. Sin embargo, las contribuciones debidas a las fuentes naturales son superadas por las fuentes antropogénicas, siendo la aplicación de plaguicidas y fertilizantes en la agricultura una de las vías de entrada más importantes en el suelo (Pérez, 2015). De igual modo, diversas actividades industriales y mineras aportan gran cantidad de este elemento a los distintos sistemas terrestres y acuáticos.

El arsénico puede encontrarse en dos especies diferentes: inorgánico y orgánico. El inorgánico es la forma más tóxica, mientras que el orgánico se produce mediante biotransformación llevada a cabo por diferentes organismos como forma de desintoxicación, y siendo menos perjudicial que la forma inorgánica (Rangel, 2015).

En la exposición no ocupacional al arsénico se debe básicamente a la ingesta de alimentos y agua, varios estudios en diversos países han revelado una asociación entre las altas concentraciones de arsénico en el agua potable y el aumento de casos de cáncer de piel. Del mismo modo una correlación positiva se ha evidenciado entre la inhalación de arsénico y el cáncer de pulmón (Medina, *et al.*, 2018).

El arsénico posee un factor de pendiente oral de $1,5 \text{ mg kg}^{-1}\text{-día}^{-1}$ y de inhalación de $15,1 \text{ (mg kg}^{-1}\text{-día}^{-1})$ (US EPA, 2000b). La dosis de referencia estimada (RFD) para exposiciones orales y contacto dermico crónicas y subcrónicas es de $3 \times 10^{-4} \text{ mg kg}^{-1}\text{-día}^{-1}$ y dosis de referencia de inhalación $4.29 \times 10^{-6} \text{ mg kg}^{-1}\text{-día}^{-1}$.

Cadmio

El cadmio es un elemento clasificado como metal pesado ampliamente distribuido en la naturaleza, asociado principalmente a los depósitos de zinc. El cadmio se encuentra distribuido en la corteza terrestre en una concentración media de $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$, (Sánchez,2016). La meteorización de los minerales, los volcanes y los incendios forestales son las principales fuentes naturales (Cámara, 2018). Se ha encontrado que la combustión del carbón, la madera y el petróleo, la incineración de residuos y la producción de metales son las principales fuentes antropogénicas de cadmio liberado a la atmósfera (García ,2012). En los suelos, una de las principales vías de cadmio es a través de la aplicación de fertilizantes fosfatados (Sánchez ,2016). Por su parte, la minería metálica de zinc y plomo lleva asociada grandes cantidades de cadmio, el cual es dispersado a los suelos durante la extracción y el procesado del mineral. Finalmente, actividades industriales cuya materia prima contienen cadmio, como puede ser las industrias de producción de fertilizantes, contribuye a la acumulación de este elemento en los suelos.

La ingesta es la principal vía de exposición de la entrada del cadmio en el cuerpo humano, seguido de la inhalación. Algunos de los efectos en la salud producidos por dicha exposición son daño renal, osteoporosis y cáncer (Sánchez, 2016).

El cadmio posee factores de pendiente de inhalación de $6,3 \text{ mg kg}^{-1}\text{-día}^{-1}$ (US EPA, 2000b). La dosis de referencia oral y contacto dérmico es de $5 \times 10^{-4} \text{ mg kg}^{-1}\text{-día}^{-1}$ y siendo la dosis de referencia de inhalación de $2,86 \times 10^{-6} \text{ mg kg}^{-1}\text{día}^{-1}$.

Cobre

El cobre se clasifica como un metal de transición, se puede encontrar en la corteza terrestre como cobre puro nativo, pero en su mayoría se produce en combinación con otros elementos. Se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, con niveles que oscilan entre 70 y 100 mg kg^{-1} (Eisler,2007). Las principales fuentes de contaminación antropogénica del cobre incluyen, la actividad minería y la contaminación industrial (Panos 2018).

El cobre es un oligoelemento esencial y los efectos adversos para la salud pueden estar potencialmente asociados con ingestas altas. La vía de exposición al cobre se presenta al respirar el aire, beber agua, ingesta comida y el contacto de la piel con el suelo. La exposición a largo plazo al polvo de cobre puede irritar la nariz, boca, y ojos, y causan dolores de cabeza,

mareos, náuseas y diarreas, la ingesta intencionalmente alta de cobre puede causar daños en el hígado y los riñones e incluso la muerte. No se tiene evidencia de que el cobre cause cáncer en humanos (ATSDR,2002).

La dosis oral y para contacto dérmico de referencia crónica para el cobre es de $4,00 \times 10^{-2}$ (mg kg⁻¹-día⁻¹). (US EPA, 2000b).

Plomo

El plomo es un metal tóxico cuyo uso generalizado ha causado una amplia contaminación y problemas de salud en muchas partes del mundo. Es un tóxico acumulativo que afecta a múltiples sistemas del cuerpo, incluyendo el neurológico, hematológico, gastrointestinal, los sistemas cardiovascular y renal. Se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, con niveles que oscilan entre 10 a 30 mg kg⁻¹ (Khan, 2018).

La presencia generalizada de plomo en el medio ambiente se debe en gran medida a actividades humanas, como la minería, la fundición, el refinado y el reciclado de plomo y la utilización de gasolina con plomo, etc. Se ha observado que el polvo contaminado con plomo puede ser la principal fuente de exposición de este elemento.

El plomo posee una dosis de referencia para la ingestión y el contacto de $3,6 \times 10^{-3}$ mg kg⁻¹-día⁻¹ (US EPA, 2000b).

Zinc

En comparación con otros iones metálicos con propiedades químicas similares, el zinc es relativamente inofensivo. Sólo la exposición a altas dosis tiene efectos tóxicos, lo que hace que la intoxicación aguda por zinc sea un suceso poco frecuente. Existen tres vías principales de entrada del zinc en el cuerpo humano: por inhalación, a través de la piel o por ingestión. Cada tipo de exposición afecta a partes específicas del cuerpo y permite la absorción de diferentes cantidades de zinc.

Mientras que otros metales son cancerígenos, el zinc no se considera en general como un agente causante del desarrollo del cáncer. Además, sólo hay informes anecdóticos de una grave intoxicación por zinc.

Para el zinc se establece una dosis de referencia de 0,3 mg kg⁻¹-día⁻¹. Este parámetro es establecido para la ingestión, y producto de la ausencia de estudios que permitan una referencia para el contacto dérmico se hace uso del mismo valor numérico.

1.2 Riesgos para los ecosistemas y la población

La evaluación del riesgo es el proceso de estimar el impacto potencial de un compuesto químico, físico, microbiológico a una población humana o un sistema ecológico específico en un conjunto de condiciones concretas y para un cierto marco de tiempo. La evaluación de riesgos tiene por objeto proporcionar información completa a los gestores de riesgos, específicamente a los encargados de formular políticas y regulaciones.

Un instrumento de evaluación de riesgo puede ser cualquier metodología, modelo o programa informático diseñado para calificar o cuantificar el riesgo planteado por un contaminante en la evaluación de una conexión fuente- camino-receptor. Hay varios instrumentos de evaluación de riesgos que han sido desarrollados comercialmente, y muchos que han sido desarrollados específicamente para lugares específicos ya sean países o regiones.

Evaluación del riesgo para los ecosistemas

La evaluación de los riesgos ecológicos es una ciencia relativamente reciente creada en los años 80 como equivalente a evaluaciones de los riesgos para la salud humana y su papel en la toma de decisiones ambientales.

Una evaluación de riesgos ecológicos es el proceso de evaluación de la probabilidad de que el medio ambiente pueda verse afectado como resultado de la exposición a uno o más factores. El enfoque más común del análisis de la exposición consiste en medir las concentraciones reales de un agente estresante y la absorción por la biota. En la actualidad, a esta determinación de la calidad ambiental se le denomina evaluación de riesgos ambientales y ecológicos (ERA).

Los métodos utilizados para la evaluación de riesgos ecológicos provienen del documento de orientación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2008) y del Manual Marco de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2012), siendo estos los análisis válidos para organismos individuales, poblaciones, y/o ecosistemas completos con algunas características comunes, como la ingestión o la exposición, al contaminante.

Específicamente, una evaluación de riesgos ecológicos es un proceso científico utilizado para evaluar los posibles efectos negativos para las plantas, los animales y el medio ambiente por la exposición a contaminantes tóxicos. Destacar que, en esta concepción de riesgo ecológico, no incluye los efectos negativos para el hombre o los animales domésticos.

Destacar que este tipo de análisis de riesgos se basa en la eco-toxicología, la cual requiere actualizaciones periódicas de los datos necesarios para la ERA, proceso que se basa en los efectos observados a nivel de población y los datos de toxicidad, los cuales faltan para la mayoría de los productos químicos y especies.

La evaluación de riesgos ecológicos abarca una mayor variedad de cuestiones complejas y más especies que la evaluación de los riesgos para la salud humana. Peces, invertebrados acuáticos, plantas acuáticas y terrestres, insectos, aves, mamíferos salvajes, reptiles y anfibios, cada especie dentro de un ecosistema cumple un papel ecológico específico, y requiere una evaluación de riesgo individualizada.

La evaluación de riesgos proporciona información sobre la presencia de un riesgo y define un rango o magnitud de ese riesgo. Con esta información, un gestor de riesgos de un lugar concreto debe interconectar los resultados para tomar y justificar decisiones. La precisión y comprensión de la evaluación depende de la cantidad y la exactitud de los datos de investigación en los que se fundamente el análisis.

En términos generales, el riesgo ecológico puede llegar a ser más importante que cualquier evaluación de riesgos para la salud, porque las evaluaciones ecológicas los receptores experimentan una mayor exposición y son más sensibles a los contaminantes en comparación con el ser humano (Suter *et al.*, 2000; Bartell, 2010).

Evaluación de riesgo para la población

Riesgo No Carcinogénico

Se define por el cálculo entre la dosis diaria media (CADD) y la dosis de referencia (RFD) obteniéndose el índice de riesgo como $HQ=CADD/RFD$. Para evaluar el potencial de riesgo para la salud humana a través de más de un elemento, el índice se obtiene como la suma de los cocientes de riesgo calculado individuales para una vía de exposición particular, se establece que la población está segura cuando el $HQ < 1$ y en un nivel de preocupación cuando esta entre $1 < HQ < 5$ (Guerra *et al.*, 2012).

Riesgo Carcinogénico

El riesgo carcinogénico viene dado por el valor del ILCR que representa la probabilidad de riesgos para la salud del individuo a lo largo de su vida. El nivel de riesgo aceptable de cáncer se considera dentro del rango de 10^{-6} a 10^{-4} . El valor se obtiene de la multiplicación del factor de pendiente (SF) y la dosis promedio de por vida (LADD). La base de las pruebas epidemiológicas son las que demuestran claramente una relación causal entre la exposición a la sustancia y el cáncer en los seres humanos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo fin de master es determinar los niveles de riesgos para la salud humana y diversos receptores ecológicos expuestos a altas concentraciones de arsénico, cadmio, cobre, plomo y zinc en zonas residenciales, industriales y depósitos mineros localizados, en emplazamientos de la Región de Murcia. Ambas estimaciones proporcionan una valiosa fuente de información para diversos sectores a fin de crear programas y políticas de gestión y reglamentación encaminadas a reducir dichos riesgos.

2.1. Objetivo específico.

Los objetivos específicos del presente trabajo son los siguientes:

- Determinar y comparar el nivel de riesgo que corresponde a cada zona evaluada (industrial, residencial y depósito minero).
- Caracterizar los elementos de mayor riesgo y su relación con las vías de exposición.
- Caracterizar el nivel de riesgo de los receptores en relación a la zona evaluada y comportamiento durante la exposición.
- Determinar qué factores ambientales y propiedades del suelo inciden en el nivel de riesgo para la salud y receptores ecológicos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción de las zonas de estudio

Las zonas de estudio se localizan en la Región de Murcia (Figura 1), donde se encuentran dos zonas mineras (Sierra Minera de Cartagena-La Unión y de Mazarrón) en cuyos límites están localizados multitud de depósitos mineros, con incidencia en las zonas urbanas próximas a ellas. Esto se debe que estas zonas están sujeta a emisiones contaminantes de partículas inorgánicas enriquecidas en metales pesados y metaloides. La exposición a estos elementos químicos podría significar un riesgo potencial para la salud humana y sistemas ecológicos afectados por ellos. Este impacto ocurre por tres vías principales de exposición la ingestión, la inhalación y el contacto dérmico. De igual modo en la Región de Murcia hay zonas industriales donde se han operado industrias potencialmente contaminantes del suelo, ya que en sus procesos generaban una serie de residuos con altas concentraciones de metales y metaloides.

Los elementos cancerígenos evaluados fueron el arsénico y cadmio, presentando el cobre, plomo y zinc solo afección a la salud, en el caso del arsénico representa probabilidad por la vía de la ingestión, inhalación y contacto dérmico, mientras que el cadmio solamente por la vía de la inhalación, presenta perspectiva de cáncer. De estas vías, la ingestión es aquella que mayor valor agrega tanto en el análisis carcinogénico y no carcinogénico, seguido por el contacto dérmico y la inhalación.



Figura 1. Localización de las zonas de estudio.

Zona 1. Depósitos mineros

Los depósitos mineros (El Lirio y Santa Antonieta) son importantes fuentes de metales pesados como, cadmio, cobre, plomo y zinc, y metaloides como el arsénico. En la Tabla 1 se presentan las concentraciones medidas de estos metales y arsénico en los dos depósitos estudiados.

Tabla. 1 Concentraciones medias de metales pesados y As presentes en los depósitos mineros.

	Zn (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	As (mg kg ⁻¹)
El Lirio	11915	4503	128	36	8
Santa Antonieta	2294	1528	74	3,2	387

El pH medio para el depósito minero El Lirio fue de 6,86 (neutro), mientras que la conductividad eléctrica fue de 5,55 dS m⁻¹ (salino). Por su parte el pH medio para el depósito minero Santa Antonieta fue de 2,88 (altamente ácido), mientras que la conductividad eléctrica fue de 3,99 dS m⁻¹ (salino).



Figura 2. Imagen aérea de la zona minera El Lirio.

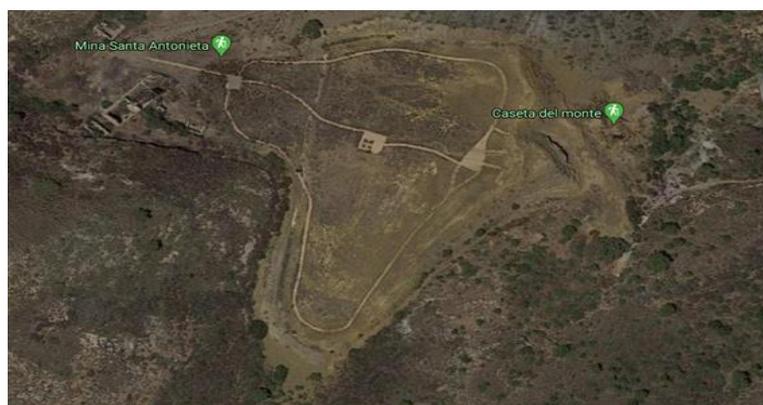


Figura 3. Imagen aérea de la zona minera de Santa Antonieta.

Zona 2. Áreas urbanas de La Unión y Mazarrón

Las zonas residenciales de la (Unión y Mazarrón) son importantes receptores de metales pesados debido a su cercanía a las zonas mineras, llegando a ellas elevadas concentraciones de, cadmio, cobre, plomo, zinc, y metaloides como el arsénico. En la Tabla 2 se presentan las concentraciones de estos metales y arsénico en ambas zonas.

Tabla. 2 Concentraciones medias de metales pesados y arsénico presentes en las zonas residenciales.

	Zn (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	As (mg kg ⁻¹)
La Unión	1726,2	2227,9	74,2	5,6	106,4
Mazarrón	2101,3	2456,1	47,0	5,8	321,1

El pH medio para la zona residencial de La Unión fue de 6,30, mientras que la conductividad eléctrica fue de 1,72 dS m⁻¹. Por su parte, el pH medio para la zona residencial de Mazarrón fue de 6,03, mientras que la conductividad eléctrica fue de 2,40 dS m⁻¹.



Figura 4. Imagen aérea de la zona residencial de La Unión.



Figura 5. Imagen aérea de la zona residencial de Mazarrón.

Zona 3. Área industrial

Las zonas industriales seleccionadas en este estudio incluyen dos balsas de residuos de jarositas de una industria productora de zinc (Balsa 1 y Balsa 2), las cuales son importantes fuentes de metales pesados como, cadmio, cobre, plomo, zinc, y metaloides como el arsénico. En la Tabla 3 se presentan las concentraciones medias de estos metales y arsénico en ambas balsas.

Tabla. 3 Concentraciones medias de metales pesados y arsénico presentes en la zona industrial.

	Zn (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	As (mg kg ⁻¹)
Balsa 1	100458	328	997	573	158
Balsa 2	60427	16540	908	486	1409

El pH medio de la Balsa 1 fue de 8.81, mientras que la conductividad eléctrica fue de 6,75 dS m⁻¹. El pH medio para la zona industrial de la Balsa 2 fue de 4,02, mientras que la conductividad eléctrica fue de 14,29 dS m⁻¹.



Figura 6. Imagen aérea de la zona industrial Balsa 1



Figura 7. Imagen aérea de la zona industrial Balsa 2

3.2. Análisis de riesgo con el programa RISC5

Los análisis de riesgos en emplazamientos concretos se pueden hacer tanto para la salud de la población expuesta como para posibles receptores ecológicos, entendidos estos últimos animales salvajes o en libertad.

En el caso del análisis para salud, este puede ser un riesgo cancerígeno o bien un riesgo tóxico, lo cual está relacionado con las características de los contaminantes causantes de este riesgo. Para establecer parámetros de probabilidad de riesgo de contraer cáncer se suele utilizar la dosis diaria promedio de por vida (LADD), la cual se relaciona con un factor de pendiente para las distintas vías de exposición, amplificando la posible afección. En el caso de la afección a la salud (riesgo tóxico) se usa la denominada dosis diaria promedio crónica (CADD), la cual se mide con relación a una dosis de referencia.

Para el análisis de riesgo de afecciones a la salud de las personas, se evaluaron las vías de exposición: ingestión, inhalación y contacto dérmico, el riesgo potencial al cáncer y el tóxico, como parámetro para establecer probabilidad de cáncer se estableció un mínimo de 10^{-5} , donde estimaciones mayores a este número se detectaban como concentraciones cancerígenas para el usuario supuesto. Para establecer riesgo a la salud (riesgo tóxico) el umbral se marcó a partir de la unidad, es decir, a partir de un HQ igual o mayor a "1" habría riesgo tóxico.

Para los receptores ecológicos (seres vivos, excluyendo plantas, seres humanos y animales domésticos), su nivel de toxicidad queda caracterizado por una concentración de la contaminación vía alimentación, así como las posibles partículas asociadas al alimento, esto a su vez se mide en relación a un nivel mínimo observado promedio (LOAEL), el cual estadísticamente representa la afección toxicológica. De igual modo, los análisis de riesgo en receptores ecológicos hacen uso de un nivel no observado (NOAEL), el cual es usado para considerar valores de referencia inferiores y, de este modo, hacer el análisis con una mayor seguridad.

3.2.1. Descripción del software

El *Software Integrado de Riesgo para la salud y ecológica versión 5 (RISC5)*, anteriormente conocido como "BP RISC", está diseñado para calcular el riesgo para la salud humana y el riesgo ecológico de los contaminantes en el medio ambiente. Contiene modelos de destino y transporte de contaminantes para predecir las concentraciones de los puntos de exposición, con una amplia gama de vías de exposición y base de datos químicos con normas toxicológicas, de destino y de transporte, así como normas reglamentarias. RISC5 fue desarrollado para ser una herramienta fácil de usar que ayuda a realizar una evaluación de riesgos a usuarios sin experiencia previa.

RISC5 incluye varias vías de exposición no consideradas en otros programas de

evaluación de riesgos, como la exposición dérmica y la inhalación durante la ducha en el interior de un lugar, las vías de irrigación y las vías de entrada de aguas superficiales y sedimentos tanto para los seres humanos como para receptores ecológicos.

Una evaluación de riesgos adecuada ofrece muchas ventajas para sus usuarios, por ejemplo, para los funcionarios, una evaluación bien definida de los riesgos en el lugar de trabajo puede proporcionar una base racional para las prácticas y conductas seguras en los lugares de trabajo.

Para los gerentes institucionales, una evaluación bien definida de los riesgos puede proporcionar objetivos claros para los programas de prevención de efectos nocivos para la salud. Para los reguladores y otros órganos de supervisión, una evaluación bien definida de los riesgos ayuda a establecer normas de salud y seguridad y a vigilar su cumplimiento sin necesidad de realizar juicios caso por caso. Para los ciudadanos, una evaluación bien definida de los riesgos proporciona un enfoque conciso para evaluar la protección del bienestar público y propio.

3.2.2. Riesgo para la salud

Riesgo no Carcinogénico (riesgo toxico).

Este nivel de riesgo queda caracterizado por el cociente de peligrosidad (HQ), el cual se obtiene del cociente entre el promedio de concentración en exposición para un periodo de un tiempo no mayor de 7 años (CADD) y la dosis de referencia de referencia segura (RFD), estableciendo como parámetro la unidad (1), valores inferiores no representa peligros potenciales, en cambio los valores superiores se consideran con probabilidad de riesgo, en todas las vías consideradas, inhalación, ingestión, contacto dérmico.

La dosis diaria media para concentración a menos de 7 años (CADD) queda definida de acuerdo a la vía de exposición por las siguientes variables (Figura 8):

Contacto Dérmico	Inhalación
Concentración de contaminación a los 7 años (C_{max})	Concentración de contaminación a los 7 años (C_{max})
Superficie de piel expuesta (SA)	Ratio de inhalación (InhR)
Factor de absorción dérmica (AAF)	Duración de exposición diaria (ET)
Factor de adherencia suelo-piel (AF)	Frecuencia de exposición (EF)
Frecuencia de exposición (EF)	Peso corporal usuario (BW)
Peso corporal usuario (BW)	Dosis de referencia inhalación (RFD)
Dosis de referencia ingestión (RFD)	

Figura 8. Factores considerados en el cálculo de riesgo, contacto dérmico e inhalación.

Riesgo Carcinogénico

El nivel queda establecido al realizar el producto de la dosis diaria promedio de por vida (LADD) y un factor de toxicidad, factor de pendiente (SF), el límite para esta consideración de probabilidad de riesgo se establece en 10^{-5} , en las tres modalidades de vías de exposición, inhalación, ingestión y contacto dérmico.

Contacto Dérmico	Variable
Concentración de contaminación (C_{ave})	Concentración de contaminación (C_{ave})
Superficie de piel expuesta (SA)	Ratio de inhalación (InhR)
Factor de absorción dérmica (AAF)	Duración de exposición diaria (ET)
Factor de adherencia suelo-piel (AF)	Frecuencia de exposición (EF)
Frecuencia de exposición (EF)	Duración de exposición acumulado (ED)
Duración de exposición acumulado (ED)	Promedio de edad de mayor riesgo (LT)
Promedio de edad de mayor riesgo (LT)	Peso corporal usuario (BW)
Peso corporal usuario (BW)	Factor de pendiente de inhalación (SF)
Factor de pendiente de ingestión (SF)	

Figura 9. Factores considerados en el cálculo de riesgo, en la ingestión de compuestos.

Dosis de Referencia: dosis diaria de una sustancia a la que pueden estar expuestas las personas durante toda la vida sin que se espere tenga lugar un daño para la salud, incluyendo los grupos más susceptibles.

Factor de pendiente: factor de ajuste de riesgo carcinógeno por exposición de compuesto para contabilizar el incremento de susceptibilidad por exposición durante las primeras etapas de la vida.

LOAEL: dosis más baja probada de una sustancia que haya sido declarada causante de efecto nocivo adverso sobre la salud en personas o animales.

NOAEL: dosis más alta probada de una sustancia que no produce efecto dañino adverso sobre la salud de personas o animales.

3.2.3. Riesgo para los ecosistemas

La cantidad de contaminante que entra en el receptor ecológico (animales salvajes o en libertad) depende de los siguientes factores:

- Las propiedades físico-químicas del contaminante.

-
- La forma en que el contaminante penetra en el organismo.
 - La naturaleza de los receptores (comportamiento, patrones de vida, etc.).

Factor de uso del área

El factor de uso del área de un animal puede definirse como la proporción del área de contaminación al área utilizada por el animal, como son, su rango de hogar, rango de reproducción, o rango de alimentación.

Biodisponibilidad

A falta de una estimación específica del lugar de estudio, se asume que la biodisponibilidad de los contaminantes en el sitio es del 100 % debido a que pocas especies han sido probadas en cuanto a la biodisponibilidad de metales y metaloides, la suposición más conservadora es apropiada en estos casos.

Peso Corporal

Las estimaciones del peso corporal y de las tasas de ingestión de alimentos de los animales receptores también deben hacerse de manera conservadora para maximizar la dosis de ingestión de contaminantes.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de riesgo para la salud en zonas mineras

Las zonas donde se encuentran depósitos mineros presentan un potencial de riesgo para la salud dada la concentración de metales pesados y metaloides presentes en ellos. Los datos de los que se dispone para hacer el análisis de riesgo son los siguientes:

- Se tienen un total de 15 muestras en Lirio y 11 para Santa Antonieta, de las cuales se ha determinado su contenido en metales totales y cuyos resultados se mostraron en la Tabla 1.
- En ambos casos las dimensiones de influencia consideradas fueron 200 m de largo, 50 m de ancho un espesor de residuos de 15 m y distancia al nivel freático de la concentración de contaminación en 10 m.
- En suelo presente una textura limo arenosa.
- Se consideró un turista con los valores más desfavorables, a fin de obtener el máximo de riesgo posible, los resultados son la suma de exposición por contacto dérmico e inhalación. Posteriormente se evaluó al mismo usuario con un tiempo de exposición correspondiente al 50% del máximo presentado por el programa RISC5.

4.1.1 Depósito de residuos mineros El Lirio

Para este análisis se consideró el riesgo como el producto de la exposición dérmica, y la inhalación de partículas y del aire, se evaluó tanto el riesgo a contraer cáncer y como el riesgo contra la salud en sentido general (riesgo toxico). Para el análisis sobre la superficie dérmica, se considera la absorción dérmica generada por una capacidad de adherencia suelo-piel, relacionándose con el tiempo y frecuencia de estos eventos.

Se debe tener en cuenta que el arsénico es el único elemento que es cancerígeno por las tres vías de exposición, ingestión, inhalación y contacto dérmico.

El usuario considerado para este escenario fue un turista, con características predefinidas (Figura 10), por lo tanto, se utilizaron los parámetros más críticos propuestos por el software, considerando edad de riesgo a cáncer los 70 años.

The screenshot shows the RISC5 software interface. At the top, there is a menu bar with 'File', 'Debug', and 'Help'. Below the menu bar, there are 'OK' and 'Cancel' buttons, a 'Description' field, a 'File name' field, and a 'Save date: 03-26-2020 10:27:00' field. The main window title is 'Step 4b: Specify Exposure Parameters'. Under 'Choose Default Profiles:', there are radio buttons for 'One' (selected) and 'Two' receptors, and a dropdown menu for 'Receptor 1:' set to 'Recreational User - Upper Percentile'. Below this, there is a section for 'Exposure Parameters:' with a 'Receptor Description:' field set to 'Recreational User - Upper Percentile'. A table of parameters is shown below:

Averaging time for carcinogens (yr)	70
Body weight (kg)	49.5
Exposure duration (yr)	7
Exposure frequency for soil (events/yr)	52
Skin surface area exposed to soil (cm ²)	5300
Soil/skin adherence factor (mg/cm ²)	0.07
Exposure frequency for outdoor air (events/yr)	52
Inhalation rate outdoors (m ³ /hr)	2.3
Time outdoors (hr/d)	3

Figura 10. Parámetros de exposición del usuario zona minera del Lirio.

Análisis de riesgo a contraer cáncer

Como se puede ver en la Tabla 4 y la Figura 11, el riesgo carcinogénico por contacto dérmico supera en $3,4 \times 10^9$ unidades, al riesgo con respecto a la inhalación de partículas. Sin embargo, conforme a los máximos establecidos para esta concentración no habría riesgo de cáncer, al no superar el valor de 10^{-5} . Para una misma concentración, el arsénico resulta ser más nocivo que el cadmio vía inhalación, para este análisis consideramos un ratio de inhalación horaria, así como un factor de pendiente propio de cada elemento. Por contacto dérmico, solo el arsénico representa un potencial peligro, con un factor de pendiente de aumento de probabilidad de riesgo de $1,5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$. El cobre, plomo y zinc son considerados como elementos no cancerígenos (Anexo 1.1).

Tabla.4 Resultados de riesgo a contraer cáncer por las distintas vías, depósito El Lirio.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK
 Receptor 1:
 Recreational User - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	3,7E-08	0,0E+00	3,8E-18	3,7E-08
Cadmium	ND	0,0E+00	7,2E-18	7,2E-18
Copper	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND
TOTAL	3,7E-08	0,0E+00	1,1E-17	3,7E-08

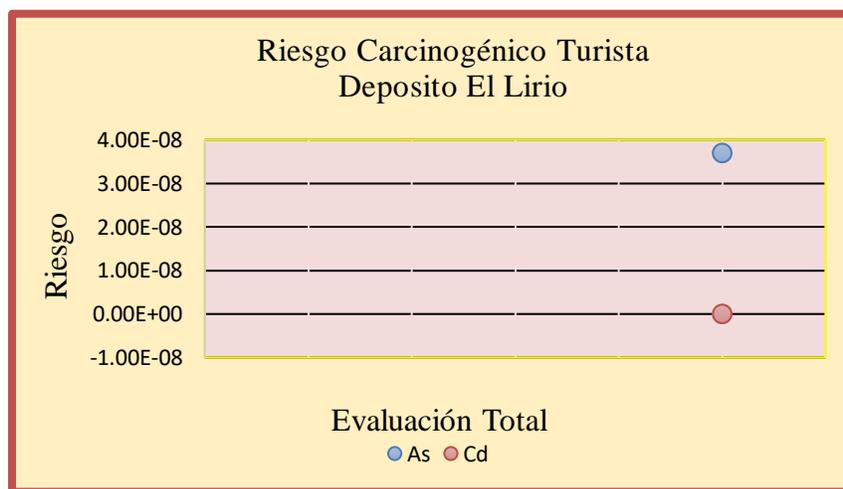


Figura. 11 Resultado de la evaluación total de riesgo a cáncer para el arsénico y cadmio.

Riesgo no carcinogénico

Como se puede ver en la Tabla 5, el riesgo no carcinogénico por contacto dérmico supera en todos los aspectos, al riesgo con respecto a la inhalación de partículas, en todos los elementos

evaluados. No obstante, conforme a los máximos establecidos para estas concentraciones, no habría riesgo para la salud, estando por debajo de la unidad (1). El plomo y el zinc son los elementos que mayor riesgo representan, sin llegar al límite, con dosis de referencia de $3,60 \times 10^{-3}$ y $0,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ respectivamente.

El riesgo no carcinogénico por la inhalación de partículas solo está contemplado para el arsénico y el cadmio. De los elementos analizados estos dos poseen dosis de referencia avalada, siendo estos valores de orden de varias unidades menores al ser comparadas con las evaluaciones dérmicas. El análisis considera en su modelo el ratio de inhalación horaria, los tiempos de exposición y las características físicas del usuario.

Tabla.5 Resultados de riesgo a la salud por las distintas en depósito del Lirio.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS				
Receptor 1: Recreational User - Upper Percentile				
Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	8,3E-04	0,0E+00	5,9E-13	8,3E-04
Cadmium	7,5E-05	0,0E+00	4,0E-12	7,5E-05
Copper	3,3E-03	ND	ND	3,3E-03
Lead	1,3E-02	ND	ND	1,3E-02
Zinc	4,2E-02	ND	ND	4,2E-02
TOTAL	5,9E-02	0,0E+00	4,6E-12	5,9E-02

4.1.2 Depósito minero Santa Antonieta

Este escenario corresponde a una evaluación de riesgo para la salud por concentración de metales pesados realizada en depósito minero minera de Santa Antonieta:

En el depósito minero Santa Antonieta al igual que el primer escenario del El Lirio, se analizó para un usuario en actividades recreacionales, en la condición más desfavorable, para la correspondiente concentración de metales y metaloides.

Para este análisis consideraremos los riesgos como el producto de la exposición dérmica, y la inhalación de partículas y del aire por volatilidad. Para el análisis sobre la superficie dérmica, se considera la absorción dérmica generada por una capacidad de adherencia suelo-piel, relacionándose con el tiempo y frecuencia de estos eventos.

La textura que componen los residuos del depósito limo arenosa con las propiedades propuestas por el software. Por este medio el arsénico es el único elemento que es cancerígeno por las tres vías de exposición ingestión, inhalación y contacto dérmico.

El usuario considerado para este escenario fue un turista que visita estas zonas, utilizando los parámetros más críticos propuestos por el software, considerando edad de riesgo a cáncer los 70 años (figura12). Este usuario posee los mismos parámetros del análisis anteriormente comentado para el depósito de El Lirio.

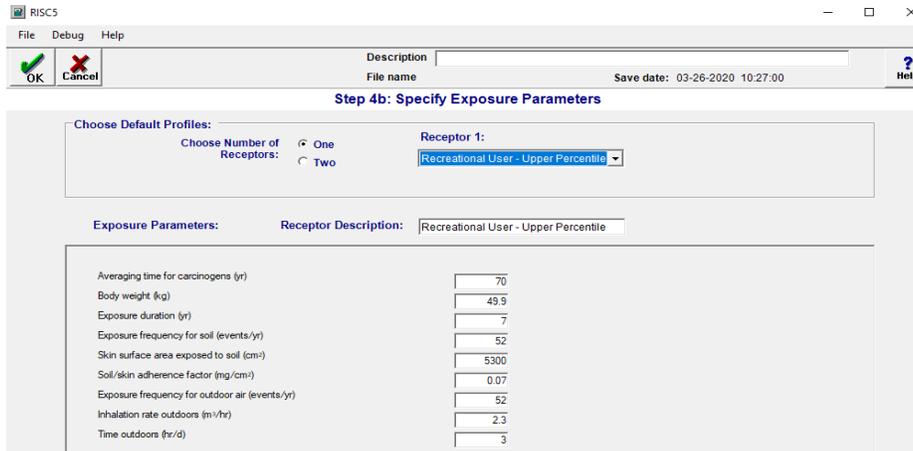


Figura 12. Parámetros de exposición del usuario zona minera de Santa Antonieta.

Análisis de riesgo a contraer cáncer

Como se puede ver en la Tabla 6 y la Figura 13, el riesgo carcinogénico por contacto dérmico supera en $9,5 \times 10^9$ unidades, a la inhalación de partículas, sin embargo, conforme a los máximos establecidos para esta concentración no habría riesgo a cáncer, al no superar el límite de 10^{-5} . El Arsénico es el que más riesgo representa vía dérmica.

En comparación a la zona minera del Lirio donde la concentración de Arsénico era de $8 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$, con un margen de incremento en 50 veces, $387 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ el riesgo por contacto dérmico tiene una relación lineal. Los parámetros de absorción dérmica y tiempo permanecieron constantes para las concentraciones evaluadas (Anexo 1.3).

Esta relación del aporte vía dérmica para el riesgo al cáncer prevalece en el valor total, indicando que el arsénico tiene mayor contribución en el sumatorio en relación al cadmio.

Tabla. 6 Resultados de riesgo a contraer cáncer por las distintas vías, depósito Santa Antonieta

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK

Receptor 1:

Recreational User - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,8E-06	0,0E+00	1,9E-16	1,8E-06
Cadmium	ND	0,0E+00	6,4E-19	6,4E-19
Copper	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND
TOTAL	1,8E-06	0,0E+00	1,9E-16	1,8E-06



Figura. 13 Resultado de la evaluación total de riesgo a cáncer para el arsénico y cadmio.

Riesgo no carcinogénico

Como se puede observar en la Tabla 7, el riesgo no carcinogénico por contacto dérmico supera en varias unidades, para esta modalidad de exposición y concentraciones, los riesgos por inhalación de partículas. Cuyos resultados son semejantes para Cu, Pb y Zn, siendo estos del mismo orden de magnitud. Por el contrario, el As es el elemento que representa mayor riesgo. No obstante, conforme a los máximos establecidos para estas concentraciones no habría riesgo para la salud, estando en todos los casos por debajo de la unidad.

El riesgo no carcinogénico a la inhalación de partículas, se mantiene presente en varios órdenes de magnitud inferiores al riesgo por contacto dérmico. Para todos los elementos se mantiene una relación lineal entre el riesgo para la salud y los niveles de concentración en comparación a la zona minera de El Lirio, al mantener los demás parámetros constantes.

El Arsénico para el receptor turista representa el 72,7% del total del riesgo para la salud por contacto dérmico.

Tabla.7 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías zona minera de Santa Antonieta

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS
 Receptor 1:
 Recreational User - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	4,0E-02	0,0E+00	2,9E-11	4,0E-02
Cadmium	6,7E-06	0,0E+00	3,6E-13	6,7E-06
Copper	2,0E-03	ND	ND	2,0E-03
Lead	4,4E-03	ND	ND	4,4E-03
Zinc	8,0E-03	ND	ND	8,0E-03
TOTAL	5,5E-02	0,0E+00	2,9E-11	5,5E-02

4.2. Análisis de riesgo para la salud en zonas industriales

Las balsas de residuos producto de la actividad industrial para la obtención de zinc, presentan un potencial riesgo para la salud dada las altas concentración de metales pesados y metaloides presentes en ellas. Los datos de los que se dispone para hacer el análisis de riesgo son los siguientes:

- Se tienen un total de 11 muestras en la Balsa 1 y Balsa 2, de las cuales se ha determinado su contenido en metales totales y arsénico cuyos resultados se mostraron en la Tabla 3.
- En ambos casos las dimensiones de influencia consideradas fueron 100 m de largo, 50 m de ancho, un espesor de residuos de 5 m y distancia al nivel freático de la concentración de contaminación en 3 m.
- En suelo presente una textura limosa.
- Se consideran dos obreros con los valores más desfavorables para uno e intermedio en el otro, a fin de obtener el máximo de riesgo posible, los resultados son la suma de exposición por contacto dérmico e inhalación. Posteriormente se evaluó a los mismos usuarios, determinando concentraciones que generaban riesgo, realizando un análisis regresivo.

4.2.1 Zona industrial (Balsa 1).

Para este análisis se consideró el riesgo como el producto de la exposición dérmica, inhalación de partículas y del aire, se evaluó tanto el riesgo a contraer cáncer y el riesgo contra la salud en sentido general (riesgo tóxico). Para el análisis sobre la superficie dérmica, se considera la absorción dérmica generada por una capacidad de adherencia suelo-piel, relacionándose con el tiempo y frecuencia de estos eventos.

Al igual que en los casos anteriores, se debe de considerar que el arsénico es el único elemento que es cancerígeno por las tres vías de exposición: ingestión, inhalación y contacto dérmico.

Los usuarios considerados para este escenario serán dos obreros, con características predefinidas (Figura 14). Por lo tanto, utilizaremos los parámetros más críticos propuestos por el software, considerando edad de riesgo a cáncer los 70 años.

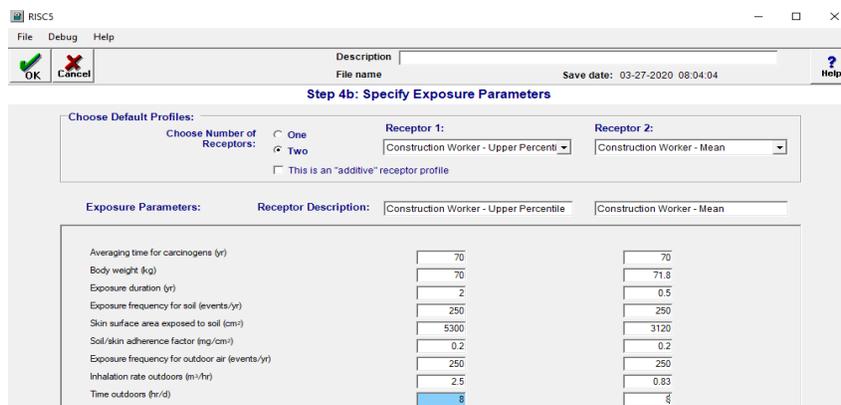


Figura.14 Parámetros de exposición de los usuarios zona industrial Balsa 1.

Análisis de riesgo a contraer cáncer

Como se puede observar en la Tabla 8 y las Figuras 15 y 16, el riesgo carcinogénico por contacto dérmico supera entre 2×10^{10} y $3,4 \times 10^{10}$ unidades, al riesgo con respecto a la inhalación de partículas. Sin embargo, conforme a los máximos establecidos para esta concentración no habría riesgo a cáncer, al no superar el valor de 10^{-5} . Para una misma concentración el arsénico resulta ser más nocivo que el cadmio vía la inhalación, para este análisis consideramos una ratio de inhalación horaria, así como un factor de pendiente propio de cada elemento. Por contacto dérmico, solo el arsénico representa un potencial peligro, con un factor de pendiente de aumento de probabilidad de riesgo de $1,5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$. El cobre, plomo y zinc son considerados como elementos no cancerígenos (Anexo 1.1).

Tabla. 8 Resultados de riesgo a contraer cáncer por las distintas vías zona industrial Balsa 1.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK

Receptor 1:

Construction Worker - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	2,0E-06	0,0E+00	1,0E-16	2,0E-06
Cadmium	ND	0,0E+00	1,6E-16	1,6E-16
Copper	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND
TOTAL	2,0E-06	0,0E+00	2,6E-16	2,0E-06

Receptor 2:

Construction Worker - Mean

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	2,5E-07	0,0E+00	7,4E-18	2,5E-07
Cadmium	ND	0,0E+00	1,1E-17	1,1E-17
Copper	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND
TOTAL	2,5E-07	0,0E+00	1,9E-17	2,5E-07

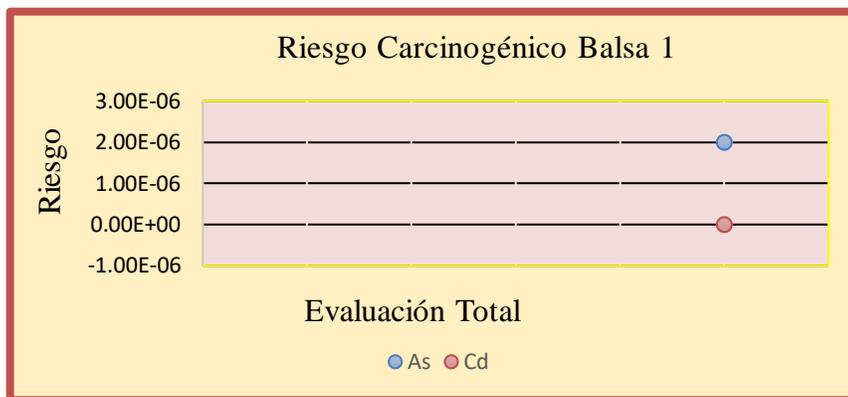


Figura. 15 Resultado de la evaluación total de riesgo a cáncer para el arsénico y cadmio usuario #1.

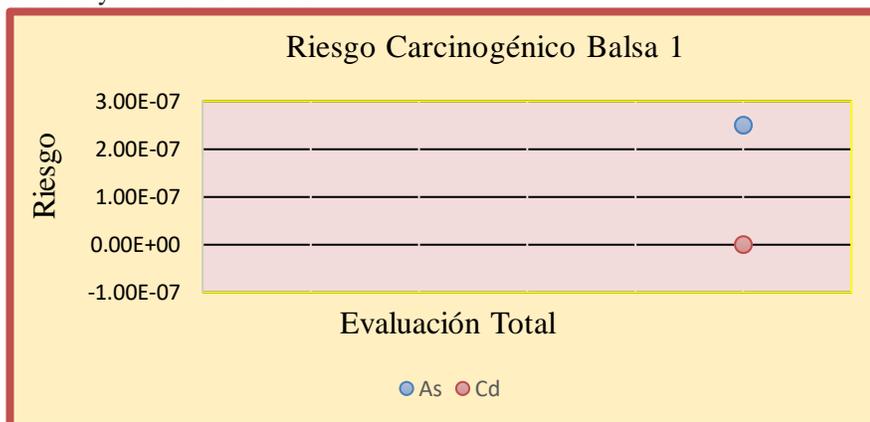


Figura. 16 Resultado de la evaluación total de riesgo a cáncer para el arsénico y cadmio usuario #2.

Riesgo no carcinogénico

El riesgo no carcinogénico por contacto dérmico supera en todos los aspectos, al riesgo generado por la inhalación de partículas, en todos los elementos evaluados, conforme a los máximos establecidos para estas concentraciones, habría riesgo a la salud (riesgo tóxico), estando por encima de la unidad (1), en el usuario 1 y 2 debido al zinc. El cobre y arsénico son los otros elementos que mayor riesgo representan, sin llegar al límite.

El riesgo no carcinogénico por la inhalación de partículas solo está contemplado para el arsénico y el cadmio, de los elementos analizados estos dos poseen dosis de referencia avalada, estos valores son de orden de varias unidades menores al ser comparadas con las evaluaciones dérmicas. El análisis considera un ratio de inhalación horaria, tiempos y características físicas del usuario.

Tabla.9 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías zona industrial Balsa 1.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS

Receptor 1:
Construction Worker - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,6E-01	0,0E+00	5,6E-11	1,6E-01
Cadmium	1,1E-02	0,0E+00	3,1E-10	1,1E-02
Copper	2,5E-01	ND	ND	2,5E-01
Lead	9,0E-03	ND	ND	9,0E-03
Zinc	3,3E+00	ND	ND	3,3E+00
TOTAL	3,7E+00	0,0E+00	3,6E-10	3,7E+00

Receptor 2:
Construction Worker - Mean

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	7,8E-02	0,0E+00	1,6E-11	7,8E-02
Cadmium	5,7E-03	0,0E+00	8,7E-11	5,7E-03
Copper	1,2E-01	ND	ND	1,2E-01
Lead	4,5E-03	ND	ND	4,5E-03
Zinc	1,7E+00	ND	ND	1,7E+00
TOTAL	1,9E+00	0,0E+00	1,0E-10	1,9E+00

4.2.2 Zona industrial (Balsa 2)

Este escenario corresponde a una evaluación de riesgo para la salud por concentración de metales pesados y arsénico realizada en la Balsa 2 de la zona industrial.

En la Balsa 2 de la zona industrial, al igual que el primer escenario de la Balsa 1, se analizaron dos usuarios en actividades de trabajo, uno con las condiciones más desfavorables y otro con condiciones medias, para la correspondiente concentración de metales y metaloides. Para este análisis se consideraron los riesgos como el producto de la ingestión de partículas, la exposición dérmica; y la inhalación de partículas, y del aire. Para el análisis sobre la superficie dérmica, se considera la absorción dérmica generada por una capacidad de adherencia suelo-piel, relacionándose con el tiempo y frecuencia de estos eventos.

La textura que componen los residuos de la zona industrial limosa, con las propiedades propuestas por el software. Por este medio el arsénico es el único elemento que es cancerígeno por las tres vías de exposición: ingestión, inhalación y contacto dérmico.

Los usuarios considerados para este escenario fueron dos obreros con actividades laborales en estas zonas, utilizando los parámetros más críticos propuestos por el software, considerando edad de riesgo a cáncer los 70 años. Los usuarios poseen los mismos parámetros del análisis anterior comentado para la Balsa 1 de la zona industrial.

Step 4b: Specify Exposure Parameters

Choose Default Profiles: Choose Number of Receptors: One Two

Receptor 1: Construction Worker - Upper Percentile
 Receptor 2: Construction Worker - Mean

This is an "additive" receptor profile

Exposure Parameters: Receptor Description: Construction Worker - Upper Percentile | Construction Worker - Mean

Averaging time for carcinogens (yr)	70	70
Body weight (kg)	70	71.8
Exposure duration (yr)	2	0.5
Exposure frequency for soil (events/yr)	250	250
Skin surface area exposed to soil (cm ²)	5300	3120
Soil/skin adherence factor (mg/cm ²)	0.2	0.2
Exposure frequency for outdoor air (events/yr)	250	250
Inhalation rate outdoors (m ³ /hr)	2.5	0.83
Time outdoors (hr/d)	8	8

Figura.17 Parámetros de exposición de los usuarios zona industrial Balsa 2.

Análisis de riesgo a contraer cáncer

Como se puede observar en la Tabla 10 y la Figura 18, el riesgo carcinogénico por ingestión supera entre 5 y 10 unidades, al contacto dérmico de partículas, y conforme a los máximos establecidos para esta concentración habría riesgo a cáncer, al superar el límite de 10^{-5} . El arsénico es el que más riesgo representa vía ingestión.

En comparación con la balsa 1 de la zona industrial, donde la concentración de arsénico era de $158 \text{ mg kg}^{-1}\text{día}^{-1}$, produce un incremento de 9 veces, $1409 \text{ mg kg}^{-1}\text{día}^{-1}$ observándose una relación lineal con el riesgo por contacto dérmico. Los parámetros de absorción dérmica y tiempo permanecieron constantes para las concentraciones evaluadas (Anexo 3.2).

Esta relación del aporte vía ingestión para el riesgo al cáncer prevalece en el valor total, además de que el arsénico tiene mayor aporte en el sumatorio con relación al elemento cadmio.

Tabla. 10 Resultados de riesgo a contraer cáncer en zona industrial Balsa 2.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK

Receptor 1:
Construction Worker - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,9E-04	1,8E-05	0,0E+00	9,3E-16	2,0E-04
Cadmium	ND	ND	0,0E+00	1,3E-16	1,3E-16
Copper	ND	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND	ND
TOTAL	1,9E-04	1,8E-05	0,0E+00	1,1E-15	2,0E-04

Receptor 2:
Construction Worker - Mean

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,2E-05	2,3E-06	0,0E+00	6,6E-17	1,4E-05
Cadmium	ND	ND	0,0E+00	9,5E-18	9,5E-18
Copper	ND	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND	ND
TOTAL	1,2E-05	2,3E-06	0,0E+00	7,5E-17	1,4E-05

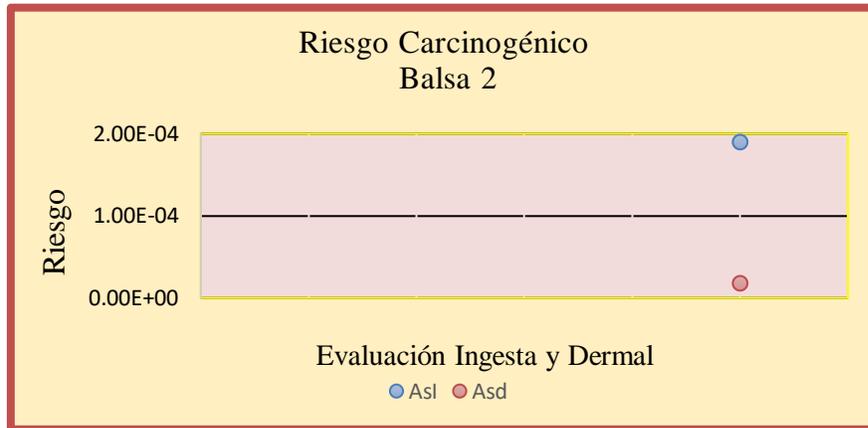


Figura. 18 Resultado de la evaluación de riesgo a cáncer para el Arsénico vía la ingestión y contacto.

Riesgo no carcinogénico

Como se puede observar en la Tabla 11, el riesgo no carcinogénico por ingestión supera en varias unidades, para esta modalidad de exposición y concentraciones, los riesgos por contacto dérmico. Cuyos resultados son semejantes para As, Pb y Zn, siendo estos del mismo orden de magnitud. Aunque es el As el elemento que representa mayor riesgo., Conforme a los máximos establecidos para estas concentraciones habría riesgo para la salud, estando las estimaciones por encima de la unidad.

El riesgo no carcinogénico a la inhalación de partículas, se mantiene presente en varios órdenes de magnitud inferiores al riesgo por contacto dérmico e ingestión. Para todos los elementos se mantiene una relación lineal entre el riesgo para la salud y los niveles de concentración en comparación a la Balsa 1 de la zona industrial, al mantener los demás parámetros constantes.

El Arsénico para los receptores representa el 45% del total del riesgo para la salud por las diferentes vías.

Tabla.11 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías zona industrial Balsa 2.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS

Receptor 1:
Construction Worker - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,4E+01	1,4E+00	0,0E+00	5,0E-10	1,6E+01
Cadmium	1,5E-01	9,6E-03	0,0E+00	2,6E-10	1,6E-01
Copper	7,0E-02	2,2E-01	ND	ND	2,9E-01
Lead	1,4E+01	4,5E-01	ND	ND	1,5E+01
Zinc	6,2E-01	2,0E+00	ND	ND	2,6E+00
TOTAL	2,9E+01	4,1E+00	0,0E+00	7,6E-10	3,4E+01

Receptor 2:
Construction Worker - Mean

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	3,7E+00	7,0E-01	0,0E+00	1,4E-10	4,4E+00
Cadmium	3,9E-02	4,8E-03	0,0E+00	7,4E-11	4,4E-02
Copper	1,8E-02	1,1E-01	ND	ND	1,3E-01
Lead	3,7E+00	2,3E-01	ND	ND	3,9E+00
Zinc	1,6E-01	1,0E+00	ND	ND	1,2E+00
TOTAL	7,6E+00	2,0E+00	0,0E+00	2,2E-10	9,7E+00

4.3. Análisis de riesgo para la salud en zonas residenciales

Las zonas residenciales presentan un potencial de riesgo dada la concentración de metales pesados y metaloides presentes en ellas. Los datos de los que se dispone para hacer el análisis de riesgo son los siguientes:

- Se tienen un total de 21 muestras en La Unión y Mazarrón, de las cuales se ha determinado su contenido en metales totales y arsénico, y cuyos resultados se mostraron en la Tabla 2.
- En ambos casos las dimensiones de influencia consideradas fueron 25 m de largo, 25 m de ancho un espesor de suelos de 0,5 m (tamaños medios de jardines y parcelas de ambas zonas) y distancia al nivel freático de la concentración de contaminación en 7,5 m.
- En suelo presente una textura arcilloso arenosa.
- Se consideró un niño con los valores más desfavorables, a fin de obtener el máximo de riesgo posible, los resultados son la suma de exposición por ingestión, contacto dérmico e inhalación. Posteriormente se evaluó al mismo con características de menor riesgo presentado por el programa RISC5.

4.3.1 Zona residencial La Unión

Para este análisis se consideró el riesgo como el producto de la ingestión, exposición dérmica, inhalación de partículas y del aire, se evaluó tanto el riesgo a contraer cáncer y el riesgo contra la salud en sentido general (riesgo tóxico). Para el análisis sobre la superficie dérmica, se considera la absorción dérmica generada por una capacidad de adherencia suelo-piel, relacionándose con el tiempo y frecuencia de estos eventos.

Nuevamente destacar que el arsénico es el único elemento que es cancerígeno por las tres vías ingestión, inhalación y contacto dérmico.

El usuario considerado para este escenario será un niño, con características predefinidas (Figura 4), por lo tanto, utilizaremos los parámetros más críticos propuestos por el software, considerando edad de riesgo a cáncer los 70 años.

Figura 19. Parámetros de exposición de los usuarios zona residencial de la Unión.

Análisis de riesgo a contraer cáncer

Como se puede ver en la Tabla 12 y la Figura 20, el riesgo carcinogénico por ingestión supera en 15 unidades, al riesgo con respecto al contacto dérmico. Conforme a los máximos establecidos para esta concentración habría riesgo de cáncer, al superar el valor de 10^{-5} . Para una misma concentración el arsénico resulta ser más nocivo que el cadmio considerando la vía de exposición la inhalación. Para este análisis consideramos una ratio de inhalación horaria, así como un factor de pendiente propio de cada elemento. Por ingestión y contacto dérmico, solo el arsénico representa un potencial peligro, con un factor de pendiente de aumento de probabilidad de riesgo de $1,5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$. El cobre, plomo y zinc son considerados como elementos no cancerígenos (Anexo 1.1).

Tabla.12 Resultados de riesgo a contraer cáncer en la zona residencial de la Unión

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK
 Receptor 1:
 Child Resident - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,7E-04	1,1E-05	0,0E+00	1,2E-16	1,8E-04
Cadmium	ND	ND	0,0E+00	2,8E-18	2,8E-18
Copper	ND	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND	ND
TOTAL	1,7E-04	1,1E-05	0,0E+00	1,3E-16	1,8E-04

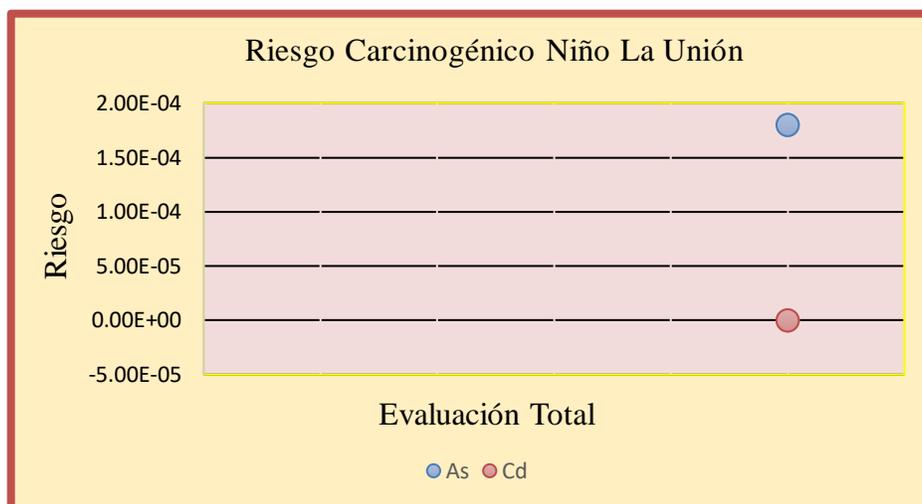


Figura 20. Resultado de la evaluación total de riesgo a cáncer para el arsénico y cadmio

Riesgo no carcinogénico

El riesgo no carcinogénico por ingestión supera en todos los aspectos, al riesgo con respecto a al contacto dérmico y la inhalación de partículas, en todos los elementos evaluados. Conforme a los máximos establecidos para estas concentraciones, habría riesgo a la salud, estando por encima de la unidad (1). El plomo y el Arsenio son los elementos que mayor riesgo representan, al llegar al límite.

El riesgo no carcinogénico por la inhalación de partículas solo está contemplado para el arsénico y el cadmio, de los elementos analizados estos dos poseen dosis de referencia avaladas, estos valores son de orden de varias unidades menores al ser comparadas con las evaluaciones dérmicas. El análisis considera el ratio de inhalación horaria, tiempos de exposición y características físicas del usuario.

Tabla.13 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías zona residencial de la Unión.

■ **SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS**
 Receptor 1:
 Child Resident - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	4,3E+00	2,8E-01	0,0E+00	2,2E-11	4,6E+00
Cadmium	7,0E-03	3,1E-04	0,0E+00	1,8E-12	7,4E-03
Copper	2,3E-02	5,1E-02	ND	ND	7,4E-02
Lead	7,8E+00	1,7E-01	ND	ND	8,0E+00
Zinc	7,2E-02	1,6E-01	ND	ND	2,3E-01
TOTAL	1,2E+01	6,6E-01	0,0E+00	2,4E-11	1,3E+01

4.3.2 Zona residencial Mazarrón

Este escenario corresponde a una evaluación de riesgo para la salud por concentración de metales pesados realizada en la zona residencial de Mazarrón.

La zona residencial de Mazarrón al igual que el primer escenario de La Unión, se analizó para un usuario en actividades propias de sus características, en la condición más desfavorable, para la correspondiente concentración de metales y metaloides.

Para este análisis consideraremos los riesgos como el producto de la ingestión, exposición dérmica, y la inhalación de partículas, así como del aire por volatilidad. Para el análisis sobre la superficie dérmica, se considera la absorción dérmica generada por una capacidad de adherencia suelo-piel, relacionándose con el tiempo y frecuencia de estos eventos.

La textura que componen los residuos en el residencial es limo arcillo arenosa, con las propiedades propuestas por el software. Por este medio el arsénico es el único elemento que es cancerígeno por las tres vías de exposición, ingestión, inhalación y contacto dérmico.

El usuario considerado para este escenario fue un niño residente de estas zonas, utilizando los parámetros más críticos propuestos por el software, considerando edad de riesgo a cáncer los 70 años. Este usuario posee los mismos parámetros del análisis anteriormente comentado para la zona residencial de La Unión.

The screenshot shows the 'Step 4b: Specify Exposure Parameters' window in the RISCS software. The window title is 'RISCS' and it has a menu bar with 'File', 'Debug', and 'Help'. Below the menu bar are 'OK' and 'Cancel' buttons, a 'Description' field, a 'File name' field, and a 'Save date: 03-27-2020 08:04:04' field. The main content area is titled 'Step 4b: Specify Exposure Parameters' and contains the following sections:

- Choose Default Profiles:** Includes 'Choose Number of Receptors' with radio buttons for 'One' (selected) and 'Two', and 'Receptor 1:' with a dropdown menu set to 'Child Resident - Upper Percentile'.
- Exposure Parameters:** Includes 'Receptor Description:' with a text field containing 'Child Resident - Upper Percentile'.
- Parameter List:** A table of exposure parameters with input fields:

Parameter	Value
Averaging time for carcinogens (yr)	70
Body weight (kg)	15
Exposure duration (yr)	6
Exposure frequency for soil (events/yr)	350
Skin surface area exposed to soil (cm ²)	2190
Soil/skin adherence factor (mg/cm ²)	0.2
Ingestion rate for soil (mg/d)	200
Exposure frequency for outdoor air (events/yr)	350
Inhalation rate outdoors (m ³ /hr)	1.2
Time outdoors (hr/d)	6

Figura 21. Parámetros de exposición de los usuarios zona residencial de Mazarrón.

Análisis de riesgo a contraer cáncer

Como se puede observar en la Tabla 14 y la Figura 22, el riesgo carcinogénico por ingestión supera en 15 unidades, al contacto dérmico. Conforme a los máximos establecidos para esta concentración habría riesgo de cáncer, al superar el límite de 10^{-5} . El Arsénico es el que más riesgo representa vía dérmica.

En comparación a la zona residencial La Unión donde la concentración de arsénico era de 106,4 mg kg⁻¹día⁻¹, con un incremento de 3 veces, 321 mg kg⁻¹-día⁻¹ el riesgo por contacto dérmico presenta una relación lineal. Los parámetros de absorción dérmica y tiempo permanecieron constantes para las concentraciones evaluadas (Anexo 2.3).

Esta relación del aporte vía la ingestión para el riesgo al cáncer prevalece en el valor total, debido a que el arsénico tiene mayor aporte en el sumatorio en relación al cadmio.

Tabla.14 Resultados de riesgo a contraer cáncer zona residencial de Mazarrón.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK
 Receptor 1:
 Child Resident - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	5,0E-04	3,3E-05	0,0E+00	3,7E-16	5,3E-04
Cadmium	ND	ND	0,0E+00	2,9E-18	2,9E-18
Copper	ND	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND	ND
TOTAL	5,0E-04	3,3E-05	0,0E+00	3,7E-16	5,3E-04



Figura 22. Resultado de la evaluación total de riesgo a cáncer para el arsénico y cadmio.

Riesgo no carcinogénico

Como se puede observar en la Tabla 15, el riesgo no carcinogénico por ingestión supera en varias unidades, para esta modalidad de exposición y concentraciones, los riesgos por inhalación de partículas. Cuyos resultados son semejantes para Pb y As, siendo estos del mismo orden de magnitud. Por otro lado, el As es el elemento que representa mayor riesgo. conforme a los máximos establecidos para estas concentraciones no habría riesgo para la salud, estando en todos los casos por debajo de la unidad.

El riesgo no carcinogénico a la inhalación de partículas, se mantiene presente en varios órdenes de magnitud inferiores al riesgo por contacto dérmico e ingestión. Para todos los elementos se mantiene una relación lineal entre el riesgo para la salud y los niveles de

concentración en comparación a la zona residencial de La Unión, al mantener los demás parámetros constantes.

El Arsénico para el receptor niño representa el 61% del total del riesgo para la salud por las distintas vías.

Tabla.15 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías zona residencial de Mazarrón.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS

Receptor 1:
Child Resident - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,3E+01	8,5E-01	0,0E+00	6,7E-11	1,4E+01
Cadmium	7,3E-03	3,2E-04	0,0E+00	1,9E-12	7,6E-03
Copper	1,5E-02	3,2E-02	ND	ND	4,7E-02
Lead	8,6E+00	1,9E-01	ND	ND	8,8E+00
Zinc	8,8E-02	1,9E-01	ND	ND	2,8E-01
TOTAL	2,2E+01	1,3E+00	0,0E+00	6,9E-11	2,3E+01

4.4. Análisis de riesgo para la fauna en zonas mineras

Escenario zona minera El Lirio:

Para el análisis de riesgo para la fauna se considera el residuo del depósito con las concentraciones de metales que se muestran en la (Tabla 16). Este análisis se realizará para un conejo, propio de la zona, como receptor, cuyas características se muestran en la Tabla 16. Se contemplará el peor escenario para el cálculo de riesgo.

Tabla 16. Concentraciones de metales y metaloides, características del receptor.

Concentración:	arsénico =8 mg/kg	cadmio =36mg/kg	cobre =128mg/kg	plomo =4503mg/kg	zinc =11915mg/kg
Tamaño del Área	10,000 m ²	10,000 m ²	10,000 m ²	10,000 m ²	10,000 m ²
Peso	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg
Dieta	Vegetal 100%	Vegetal 100%	Vegetal 100%	Vegetal 100%	Vegetal 100%
Porcentaje de suelo ingerido	2%	2%	2%	2%	2%
NOAEL	0,126mgkg ⁻¹	1 mgkg ⁻¹	11,7mgkg ⁻¹	8 mgkg ⁻¹	160 mgkg ⁻¹
LOAEL	1,26 mgkg ⁻¹	10 mgkg ⁻¹	15,1mgkg ⁻¹	80 mgkg ⁻¹	320 mgkg ⁻¹

Paso 1: Estimación de la máxima concentración del metal en la alimentación del receptor.

Concentración en el vegetal = $e^{(-1,992+0,564 \times \ln(X))}$

x = concentración del elemento en mgkg⁻¹

Tabla 17. Concentración de metales y metaloides en la vegetación.

Concentración vegetal mgkg ⁻¹	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,44	4,4	13,2	29,7	883,6

Paso 2: Estimación del ratio de ingestión (FIR) para un conejo utilizando el modelo alométrico de ingestión para animales mamíferos herbívoros.

Ratio de ingestión $FIR=0,235 \times Bw^{0,822}$

Bw = peso del receptor

La ratio de ingestión de contaminación que proviene vía el vegetal viene dada con referencia al peso del receptor en una concentración por día, este es el denominado FIR, para el conejo seleccionado el valor es de 0.0687 mg kg⁻¹, el porcentaje de partículas de suelo que acompañan al vegetal es un 2% de la alimentación obteniéndose 0.0137 mg kg⁻¹.

Paso 3: Ingestión de acuerdo a las concentraciones presentes

Ratio de ingestión vegetal y la concentración en el vegetal

Exposición_{veg.} = $FIR \times Ingestion$

Tabla 18. Concentraciones ingeridas vía el vegetal de metales y metaloides.

Ingestión vía vegetal mgkg ⁻¹	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,03	0,3	0,9	2,04	60,7

Exposición_{suelo.} = $SIR \times Ingestion$; Ratio de ingestión sólido y la concentración en el suelo

Tabla 19. Concentraciones ingeridas partículas de suelo de metales y metaloides.

Ingestión vía suelo mgkg ⁻¹	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,011	0,05	0,18	6,2	16,3

Tabla 20. Concentraciones totales ingeridas de metales y metaloides.

Ingestión total mgkg ⁻¹	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,041	0,35	1,07	8,64	77,0

Paso 4: Determinación del índice de peligrosidad.

Tabla 21. Niveles promedio no observados de riesgo toxico.

NOAEL	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,325	0,35	0,09	1,085	0,48

Tabla 22. Niveles mínimos promedio con riesgo toxicológico.

LOAEL	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,0325	0,035	0,071	0,1085	0,24

Paso 5: Determinación del índice de peligrosidad ajustado al área de incidencia del roedor.

Tabla 23. Niveles promedio ajustado no observados de riesgo toxico

NOAEL	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,065	0,007	0,00184	0,021	0,0096

Tabla 24. Niveles mínimos promedio ajustado con riesgo toxicológico

LOAEL	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,00065	0,0007	0,0014	0,0021	0,0048

Usando el máximo del área donde se encuentra los elementos concentrados, el receptor conejo se ve expuesto a niveles de riesgos que superan el NOAEL para el plomo, presentando un valor por encima de 1. Sin embargo, al ajustar estos valores al área de incidencia en el Lirio, con 10,000 m² de área contaminada, este decae a 0,02; siendo el mayor aporte a este nivel de riesgo aquel que es adquirido por ingestión directa de sólido, por lo que los efectos adversos son altamente improbables. (Anexo 4.1).

Escenario zona minera Santa Antonieta:

Para el análisis de riesgos para la fauna se considera el residuo del depósito con las concentraciones de metales que se muestran en la Tabla 25. Este análisis se realizará para un conejo, propio de la zona, como receptor, cuyas características se muestran en la Tabla 25. Se contemplará el peor escenario para el cálculo de riesgo.

Tabla 25. Concentraciones de metales y metaloides, características del receptor.

Concentración:	arsénico =387 mgkg ⁻¹	cadmio =3,2 mgkg ⁻¹	cobre =74,5 mgkg ⁻¹	plomo =1528,3 mgkg ⁻¹	zinc =2294,5 mgkg ⁻¹
Tamaño del Área	10,000 m ²	10,000 m ²	10,000 m ²	10,000 m ²	10,000 m ²

Peso	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg
Dieta	Vegetal 100%	Vegetal 100%	Vegetal 100%	Vegetal 100%	Vegetal 100%
Porcentaje de suelo ingerido	2%	2%	2%	2%	2%
NOAEL	0,126mgkg ⁻¹	1 mgkg ⁻¹	11,7mgkg ⁻¹	8 mgkg ⁻¹	160 mgkg ⁻¹
LOAEL	1,26 mgkg ⁻¹	10 mgkg ⁻¹	15,1mgkg ⁻¹	80 mgkg ⁻¹	320 mgkg ⁻¹

Paso 1: Estimación de la máxima concentración del metal en la alimentación del receptor.

Concentración en el vegetal = $e^{(-1,992+0,564x \ln(x))}$

x = concentración del elemento en mgkg⁻¹

Tabla 26. Concentración de metales y metaloides en la vegetación.

Concentración vegetal mgkg ⁻¹	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	3,93	1,17	10,7	16,2	354,2

Paso 2: Estimación de la ratio de ingestión (FIR) para un conejo utilizando el modelo alométrico de ingestión para animales mamíferos herbívoros.

Ratio de ingestión FIR=0,235 X Bw^{0,822}

Bw = peso del receptor

La ratio de ingestión de contaminación que proviene vía el vegetal viene dada con referencia al peso del receptor en una concentración por día, este es el denominado FIR, para el conejo seleccionado el valor es de 0,0687 mg kg⁻¹, el porcentaje de partículas de suelo que acompañan al vegetal es un 2% de la alimentación obteniéndose 0,0137 mg kg⁻¹.

Paso 3: Ingestión de acuerdo a las concentraciones presentes

Ratio de ingestión vegetal y la concentración en el vegetal

Exposición_{veg.} = FIR X Ingestion

Tabla 27. Concentraciones ingeridas vía el vegetal de metales y metaloides.

Ingestión vía vegetal mgkg ⁻¹	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,27	0,08	0,74	1,11	24,3

Exposición_{suelo} = $SIR \times Ingestion$; Ratio de ingestión sólido y la concentración en el suelo

Tabla 28. Concentraciones ingeridas partículas de suelo de metales y metaloides.

Ingestión vía el suelo mgkg ⁻¹	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,53	0,0044	0,10	2,09	3,14

Tabla 29. Concentraciones totales ingeridas de metales y metaloides.

Ingestión total mgkg ⁻¹	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,80	0,084	0,84	3,2	27,4

Paso 4: Determinación del índice de peligrosidad.

Tabla 30. Niveles promedio no observados de riesgo toxico.

NOAEL	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	6,35	0,084	0,072	0,4	0,17

Tabla 31. Niveles mínimos promedio con riesgo toxicológico

LOAEL	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,63	0,0084	0,055	0,04	0,086

Paso 5: Determinación del índice de peligrosidad ajustado al área de incidencia del roedor.

Tabla 32. Niveles promedio ajustado no observados de riesgo toxico

NOAEL	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,127	0,00168	0,00144	0,008	0,0034

Tabla 33. Niveles mínimos promedio ajustado con riesgo toxicológico

LOAEL	arsénico	cadmio	cobre	plomo	zinc
	0,0126	0,00016	0,0011	0,0008	0,00171

Usando el máximo del área donde se encuentra los elementos concentrados, el receptor conejo se ve expuesto a niveles de riesgos que superan el NOAEL para el arsénico, presentando valor por encima de 6,35. Sin embargo, al ajustar estos valores al área de incidencia en Santa Antonieta, con 10,000 m² de área contaminada, este decae a 0,127, siendo el mayor aporte a este nivel de riesgo aquel que es adquirido por ingestión directa de sólido. Con la caída del riesgo del Arsénico a 0,127 en el nivel de efecto no observado, la probabilidad de riesgo es baja. El LOAEL nivel mínimo observado aun es mucho menor al ser ajustado es de 0,0126.

4.5. Sensibilidad de los parámetros del análisis de riesgo

4.5.1. Riesgo para la salud

Depósito El Lirio

El usuario considerado para este escenario será un turista utilizando los parámetros más críticos propuestos por el software, y ya definimos en los apartados anteriores.

Este escenario evalúa al receptor recreacional del análisis correspondiente a la sección 4.1, pero considerando la mitad del tiempo de exposición, frecuencia, duración y eventos al año, los cuales se redujeron en un 50%. Manteniendo los demás parámetros constantes.

Figura 23. Parámetros de exposición del usuario zona minera de Lirio.

Como se puede apreciar en la Tabla 34 el riesgo carcinogénico por contacto dérmico supera en $3,45 \times 10^9$ unidades, al riesgo con respecto a la inhalación de partículas, sin embargo, conforme a los máximos establecidos para esta concentración no suponen un riesgo de contraer cáncer. Al comparar este resultado con el anterior análisis de depósito minero de El Lirio, no se presentan diferencias significativas.

Tabla. 34 Resultados de riesgo a contraer cáncer en depósito El Lirio.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK
 Receptor 1:
 Recreational User - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	9,3E-09	0,0E+00	9,5E-19	9,3E-09
Cadmium	ND	0,0E+00	1,8E-18	1,8E-18
Copper	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND
TOTAL	9,3E-09	0,0E+00	2,7E-18	9,3E-09

Por su parte, el riesgo no carcinogénico por contacto dérmico supera en varias unidades, al riesgo con respecto a la inhalación de partículas, sin embargo, conforme a los máximos establecidos para esta concentración no habría riesgo para la salud. (Anexo 1.2)

Al reducirse los tiempos y frecuencias de exposición a la mitad el nivel de riesgo de contraer cáncer es cuatro veces menor pasando de $3,7 \times 10^{-8}$ a $9,3 \times 10^{-9}$. Destacar que el contacto dérmico es la vía de exposición más importante, siendo el arsénico el elemento más perjudicial. De igual modo, una vez se reducen los tiempos y la frecuencia de exposición el riesgo para la salud se reduce a la mitad pasando de $5,9 \times 10^{-2}$ a $2,9 \times 10^{-2}$.

No obstante, a pesar de obtener diferencias importantes cuando se consideran distintos tiempos de exposición, la catalogación final del riesgo no presenta diferencias, ya que en ambos casos no existe potencial de riesgo tóxico para la salud.

Tabla.35 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías de exposición en el depósito El Lirio.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS
 Receptor 1:
 Recreational User - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	4,1E-04	0,0E+00	2,9E-13	4,1E-04
Cadmium	3,7E-05	0,0E+00	2,0E-12	3,7E-05
Copper	1,7E-03	ND	ND	1,7E-03
Lead	6,4E-03	ND	ND	6,4E-03
Zinc	2,0E-02	ND	ND	2,0E-02
TOTAL	2,9E-02	0,0E+00	2,3E-12	2,9E-02

Deposito minero Santa Antonieta

El usuario considerado para este escenario será un turista utilizando los parámetros más críticos propuestos por el software, y ya definimos en los apartados anteriores.

Este escenario evalúa al receptor recreacional del análisis correspondiente a la sección 4.1, pero considerando la mitad del tiempo de exposición, frecuencia, duración y eventos al año, los cuales se redujeron en un 50%. Manteniendo los demás parámetros constantes.

Figura 24. Parámetros de exposición del usuario zona minera Santa Antonieta.

Como se puede apreciar en la Tabla 36 el riesgo carcinogénico por contacto dérmico supera en $9,8 \times 10^9$ unidades, al riesgo con respecto a la inhalación de partículas, sin embargo, conforme a los máximos establecidos para esta concentración no suponen un riesgo de contraer cáncer. Al comparar este resultado con el anterior análisis del depósito minero Santa Antonieta, no se presentan diferencias.

Tabla. 36 Resultados de riesgo a contraer cáncer en depósito minero Santa Antonieta.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK

Receptor 1:
Recreational User - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	4,5E-07	0,0E+00	4,6E-17	4,5E-07
Cadmium	ND	0,0E+00	1,6E-19	1,6E-19
Copper	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND
TOTAL	4,5E-07	0,0E+00	4,6E-17	4,5E-07

El riesgo no carcinogénico por contacto dérmico supera en varias unidades, al riesgo con respecto a la inhalación de partículas, sin embargo, conforme a los máximos establecidos para esta concentración no habría riesgo para la salud. (Anexo 1.4).

Al reducirse los tiempos y frecuencias de exposición a la mitad el nivel de riesgo de contraer cáncer es cuatro veces menor pasando de $1,8 \times 10^{-6}$ a $4,5 \times 10^{-7}$. Destacar que el contacto dérmico es la vía de exposición más importante, siendo el arsénico el elemento más perjudicial. De igual modo, una vez se reducen los tiempos y la frecuencia de exposición el riesgo para la salud se reduce a la mitad pasando de $5,5 \times 10^{-2}$ a $2,7 \times 10^{-2}$.

No obstante, a pesar de obtener diferencias importantes cuando se consideran distintos tiempos de exposición, la catalogación final del riesgo no presenta diferencias, ya que en ambos casos no existe potencial de daño crónico para la salud.

Tabla.37 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías en depósito minero Santa Antonieta.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS

Receptor 1:
Recreational User - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	2,0E-02	0,0E+00	1,4E-11	2,0E-02
Cadmium	3,3E-06	0,0E+00	1,8E-13	3,3E-06
Copper	9,6E-04	ND	ND	9,6E-04
Lead	2,2E-03	ND	ND	2,2E-03
Zinc	3,9E-03	ND	ND	3,9E-03
TOTAL	2,7E-02	0,0E+00	1,4E-11	2,7E-02

Zona Industrial (Balsa 1).

Los usuarios considerados para este escenario fueron dos obreros utilizando los parámetros más críticos propuestos por el software, y ya definimos en los apartados anteriores.

Este escenario corresponde a una evaluación de riesgo por concentración de metales pesados y arsénico realizada en la Balsa 1, se ha realizado un análisis retrospectivo para evaluar con que niveles de concentración de los elementos se presentaría riesgo.

Tabla 38. Concentraciones promedio de metales pesados identificados

Summary of Original Conditions for Soil Source

Chemical	Original Source Concentration [mg/kg]	Effective Solubility [mg/l]	Saturated Soil Concentration [mg/kg]
Arsenic	158	1,8E+04	5,2E+05
Cadmium	573	0,0E+00	1,0E+06
Copper	997	0,0E+00	1,0E+06
Lead	328	0,0E+00	1,0E+06
Zinc	100458	0,0E+00	1,0E+06

Las concentraciones originales son las planteadas en la primera columna de la (Tabla 38) mientras que aquella que produce niveles de riesgo por encima del parámetro estipulado 10^{-5} viene dada por la (Tabla 39). En el caso del arsénico es una concentración 6 veces mayor a la original pasando de 158 mg kg^{-1} a 965 mg kg^{-1} .

Tabla 39. Concentraciones críticas de metales pesados.

Site-Specific Target Levels (SSTLs) for Soil Source

Chemical	SSTL [mg/kg]
Arsenic	965,4
Cadmium	48210
Copper	3857
Lead	34710
Zinc	28920

Para estos niveles de concentración, manteniendo el usuario con las características evaluadas en la sección 4.2, los niveles de riesgos son prorrateados hasta alcanzar el valor mínimo a partir de cual se considera probabilidad de cáncer 10^{-5} en la suma de todos los elementos, para las vías de exposición planteadas.

Tabla. 40 Resultados de riesgo a contraer cáncer por las distintas vías zona Industrial Balsa 1.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK

Receptor 1:
Construction Worker - Upper Percentile

Chemical	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,2E-05	0,0E+00	6,4E-16	1,2E-05
Cadmium	ND	0,0E+00	1,3E-14	1,3E-14
Copper	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND
TOTAL	1,2E-05	0,0E+00	1,4E-14	1,2E-05

Zona Industrial (Balsa 2).

Los usuarios considerados para este escenario fueron dos obreros utilizando los parámetros más críticos propuestos por el software, y ya definimos en los apartados anteriores.

Este escenario corresponde a una evaluación de riesgo por concentración de metales pesados realizada en la Balsa 2, se ha realizado un análisis retrospectivo para evaluar con que niveles de concentración de los elementos se presentaría riesgo, así como evaluar la vulnerabilidad de uno frente al otro.

Tabla 41. Concentraciones promedio de metales pesados identificados y potenciales críticos.

Summary of Original Conditions for Soil Source

Chemical	Original Source Concentration [mg/kg]	Effective Solubility [mg/l]	Saturated Soil Concentration [mg/kg]
Arsenic	1409	1,8E+04	5,2E+05
Cadmium	486	0,0E+00	1,0E+06
Copper	908	0,0E+00	1,0E+06
Lead	16540	0,0E+00	1,0E+06
Zinc	60427	0,0E+00	1,0E+06

Site-Specific Target Levels (SSTLs) for Soil Source

Chemical	SSTL [mg/kg]
Arsenic	84,85
Cadmium	2910
Copper	2941
Lead	1080
Zinc	22060

Las concentraciones originales son las planteadas en la primera columna de la Tabla 41 mientras que aquella que produce niveles de riesgo por encima del parámetro estipulado 10^{-5} viene dada en el caso del arsénico, por ejemplo, es una concentración que podría ser 16 veces menor pasando de una concentración original de 1409 mg kg^{-1} a 85 mg kg^{-1} .

Tabla. 42 Resultados de riesgo a contraer cáncer por las distintas vías zona Industrial Balsa 2.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK

Receptor 1:
Construction Worker - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,1E-05	1,1E-06	0,0E+00	2,8E-17	1,2E-05
Cadmium	ND	ND	0,0E+00	4,0E-16	4,0E-16
Copper	ND	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND	ND
TOTAL	1,1E-05	1,1E-06	0,0E+00	4,3E-16	1,2E-05

Receptor 2:
Construction Worker - Mean

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	7,2E-07	1,4E-07	0,0E+00	2,0E-18	8,6E-07
Cadmium	ND	ND	0,0E+00	2,8E-17	2,8E-17
Copper	ND	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND	ND
TOTAL	7,2E-07	1,4E-07	0,0E+00	3,0E-17	8,6E-07

Este análisis retrospectivo evidencia que el usuario #1 al llegar al nivel a partir de cual se presenta riesgo al cancer, el usuario #2 esta en un orden de mas de 10 unidades de separacion, para las concentraciones propuestas, obteniedose una estimacion total de riesgo para el primer usuario de $1,2 \times 10^{-5}$, mientras que de forma paralela el segundo usuario presenta $8,6 \times 10^{-7}$, siendo el impato unas 14 veces menos. Aun asi, en ambos casos si se presentan afecciones a la salud en terminos acumulados, aunque en el caso del usuario #1 por separado cada elemeto cumple con la condición. Estos parametro se pueden ver en la Tabla 40.

Tabla.43 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías zona Industrial Balsa 2.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS

Receptor 1:
Construction Worker - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	8,7E-01	8,4E-02	0,0E+00	1,5E-11	9,5E-01
Cadmium	9,0E-01	5,8E-02	0,0E+00	7,8E-10	9,5E-01
Copper	2,3E-01	7,3E-01	ND	ND	9,5E-01
Lead	9,2E-01	3,0E-02	ND	ND	9,5E-01
Zinc	2,3E-01	7,3E-01	ND	ND	9,5E-01
TOTAL	3,1E+00	1,6E+00	0,0E+00	8,0E-10	4,8E+00

Receptor 2:
Construction Worker - Mean

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	2,3E-01	4,2E-02	0,0E+00	4,3E-12	2,7E-01
Cadmium	2,3E-01	2,9E-02	0,0E+00	2,2E-10	2,6E-01
Copper	5,8E-02	3,7E-01	ND	ND	4,2E-01
Lead	2,4E-01	1,5E-02	ND	ND	2,5E-01
Zinc	5,8E-02	3,7E-01	ND	ND	4,2E-01
TOTAL	8,1E-01	8,2E-01	0,0E+00	2,3E-10	1,6E+00

Escenario Residencial de La Unión.

Para este análisis se verán las diferencias entre el riesgo potencial del niño evaluado en la sección 4.3, de manera paralela se evaluará el riesgo de un niño con características medias para las mismas concentraciones a fin de analizar los rangos de variaciones. Las variaciones en los factores son significativas en cuanto a la superficie de la piel, factores de adherencia, tiempos de exposición y ratios de ingestión. (Anexo 2.2).

Tabla.44 Resultados de riesgo a contraer cáncer por las distintas vías zona residencial La Unión.

Receptor 2:
Child Resident - Mean

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,9E-05	4,2E-07	0,0E+00	8,5E-17	2,0E-05
Cadmium	ND	ND	0,0E+00	1,9E-18	1,9E-18
Copper	ND	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND	ND
TOTAL	1,9E-05	4,2E-07	0,0E+00	8,7E-17	2,0E-05

Al comparar los resultados totales de riesgo a contraer cáncer existe una diferencia de 10 unidades, al pasar de $1,8 \times 10^{-4}$ a $2,0 \times 10^{-5}$. Los cambios más significativos se presentan en la vía dérmica, ya que, la diferencia es de unas 25 veces más reducido en el análisis.

Tabla.45 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías zona residencial La Unión.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS

Receptor 1:
Child Resident - Mean

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	5,0E-01	1,1E-02	0,0E+00	1,5E-11	5,1E-01
Cadmium	8,3E-04	1,2E-05	0,0E+00	1,3E-12	8,4E-04
Copper	2,7E-03	2,0E-03	ND	ND	4,7E-03
Lead	9,1E-01	6,7E-03	ND	ND	9,2E-01
Zinc	8,5E-03	6,2E-03	ND	ND	1,5E-02
TOTAL	1,4E+00	2,6E-02	0,0E+00	1,7E-11	1,5E+00

Las diferencias también son significativas en el caso de la evaluación a la salud en sentido general (riesgo tóxico) presentándose reducciones entre 10 y 25 veces, confrontadas con un niño con las condiciones más desfavorables de la sección 4.3.

Escenario Residencial de Mazarrón

Para este análisis se verán las diferencias entre el riesgo potencial del niño evaluado en la sección 4.3.1, de manera paralela se evaluará el riesgo de un adulto con características de tiempos de exposición igual a las de niño. Las variaciones en los factores son significativas en cuanto a la superficie de la piel, factores de adherencia, peso corporal y ratios de ingestión. (Anexo 2.4).

Tabla.46 Resultados de riesgo a contraer cáncer en la zona Residencial Mazarrón.

SUMMARY OF CARCINOGENIC RISK

Receptor 1:
Adult Resident - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	5,0E-05	5,6E-06	0,0E+00	9,9E-17	5,6E-05
Cadmium	ND	ND	0,0E+00	7,8E-19	7,8E-19
Copper	ND	ND	ND	ND	ND
Lead	ND	ND	ND	ND	ND
Zinc	ND	ND	ND	ND	ND
TOTAL	5,0E-05	5,6E-06	0,0E+00	1,0E-16	5,6E-05

Al comparar los resultados totales de riesgo a cáncer existe una diferencia de 10 unidades, al pasar de $5,3 \times 10^{-4}$ a $5,6 \times 10^{-5}$. Los cambios más significativos se presentan en la vía de la ingestión.

Tabla.47 Resultados de riesgo a la salud por las distintas vías zona Residencial Mazarrón.

SUMMARY OF HAZARD QUOTIENTS
 Receptor 1:
 Adult Resident - Upper Percentile

Chemical	Ingestion of Soil	Dermal Contact with Soil	Inhalation of Outdoor Air	Inhalation of Particulates	TOTAL
Arsenic	1,3E+00	1,4E-01	0,0E+00	1,8E-11	1,4E+00
Cadmium	7,3E-04	5,4E-05	0,0E+00	5,0E-13	7,8E-04
Copper	1,5E-03	5,5E-03	ND	ND	7,0E-03
Lead	8,6E-01	3,2E-02	ND	ND	8,9E-01
Zinc	8,8E-03	3,3E-02	ND	ND	4,2E-02
TOTAL	2,2E+00	2,1E-01	0,0E+00	1,8E-11	2,4E+00

Las diferencias también son significativas en el caso de la evaluación a la salud en sentido general (riesgo tóxico) presentándose reducciones entre 5 y 10 veces, confrontadas con un niño con las condiciones más desfavorables de la sección 4.3.

4.5.2. Riesgo para la Fauna

Depósito minero de El Lirio

Se realizó un análisis de riesgo ambiental con la herramienta RISC5 (Figura 25), para depósito minero El Lirio con las concentraciones evaluadas en la sección 4.4. El análisis se realizó para un conejo, con las consideraciones de ingestión y área de incidencia ya mencionado anteriormente.

Las concentraciones de metales y metaloides son las propuestas en la Tabla 1 de depósito minero El Lirio. Este análisis consideró concentración del metal, parámetros que discrepan ligeramente de los utilizados en la sección 4.4, estipulados en las ecuaciones de estimación de concentración de metal en el vegetal. Estos parámetros están previamente predeterminados para el cálculo de riesgo ecológico en RISC5.

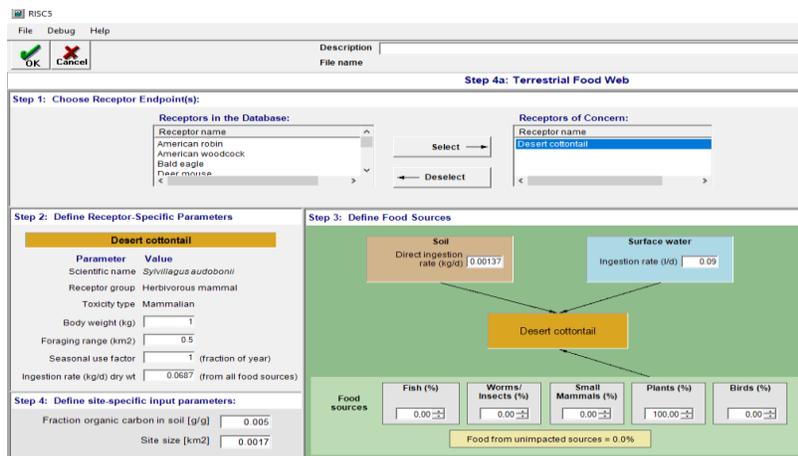


Figura 25. Características del receptor y parámetros de exposición por ingestión.

Resultados de la concentración de arsénico por las vías del vegetal y partículas de suelo.

Al ser confrontados los resultados obtenidos con los niveles con efecto adverso no observados (NOAEL) y niveles con efecto mínimos observados (LOAEL), la concentración de arsénico no presenta repercusiones con efectos tóxicos para la fauna evaluada. De igual modo, al comparar este análisis con el realizado y presentado en la sección 4.4 para este elemento, no se presentan diferencias significativas. (Anexo 4.1).

Tabla. 48 Resultado de niveles de toxicidad de arsénico en el receptor.

Risk Results for Desert cottontail and Arsenic		
NOAEL Hazard Quotient	(-)	3,3E-01
LOAEL Hazard Quotient	(-)	3,3E-02

Resultados de la concentración de cadmio por las vías del vegetal y partículas de suelo.

Al ser confrontadas con los niveles con efecto adversos no observados NOAEL y niveles con efecto mínimos observados LOAEL, esta concentración no presenta repercusiones con efectos tóxicas. Al comparar este análisis con la sección 4.4 no se presentan diferencias significativas, para este elemento.

Tabla .49 Resultado de niveles de toxicidad de cadmio en el receptor.

Risk Results for Desert cottontail and Cadmium		
NOAEL Hazard Quotient	(-)	4,5E-01
LOAEL Hazard Quotient	(-)	4,5E-02

Resultados de la concentración de cobre por las vías del vegetal y partículas de suelo.

Al ser confrontadas con los niveles con efecto adversos no observados NOAEL y niveles con efecto mínimos observados LOAEL, esta concentración no presenta repercusiones con efectos tóxicas. Al comparar este análisis con la sección 4.4 se presentan diferencias significativas, para este elemento siendo esta un 55% menor que la considerada en la sección 4.4. Siendo la ingestión vía el vegetal la diferencia al considerar solo 0.27 mg kg⁻¹día⁻¹. (Anexo 4.1). Esta variación es producto de los exponentes en la ecuación de logaritmo neperiano de la concentración.

Tabla .50 Resultado de niveles de toxicidad de cobre en el receptor.

Risk Results for Desert cottontail and Copper		
NOAEL Hazard Quotient	(-)	3,8E-02
LOAEL Hazard Quotient	(-)	3,0E-02

Resultados de la concentración de plomo por las vías del vegetal y partículas de suelo.

Al ser confrontadas con los niveles con efecto adversos no observados NOAEL y niveles con efecto mínimos observados LOAEL, esta concentración presenta repercusiones con efectos tóxicas al pasar el valor de la unidad (1). Al comparar este análisis con el de la sección 4.4 se

presentan diferencias significativas, para este elemento siendo esta un 47% mayor que la considerada en la sección 4.4. Siendo la ingestión vía el vegetal la diferencia al considerar solo $7.2 \text{ mg kg}^{-1}\text{día}^{-1}$, cuando antes era $2.04 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Esta variación es producto de los exponentes en la ecuación de logaritmo neperiano de la concentración.

Tabla. 51 Resultado de niveles de toxicidad de plomo en el receptor.

Risk Results for Desert cottontail and Lead		
NOAEL Hazard Quotient	(-)	1,7E+00
LOAEL Hazard Quotient	(-)	1,7E-01

Resultados de la concentración de zinc por las vías del vegetal y partículas de suelo.

Al ser confrontadas con los niveles con efecto adversos no observados NOAEL y niveles con efecto mínimos observados LOAEL, esta concentración no presenta repercusiones con efectos tóxicas. Al comparar este análisis con la sección 4.4 no se presentan diferencias significativas, para este elemento.

Tabla. 52 Resultado de niveles de toxicidad de zinc en el receptor.

Risk Results for Desert cottontail and Zinc		
NOAEL Hazard Quotient	(-)	5,6E-01
LOAEL Hazard Quotient	(-)	2,8E-01

5. CONCLUSIONES

Este trabajo analizó y caracterizó el impacto para la salud de las personas y receptores ecológicos, producido por la contaminación de metales pesados y metaloides en suelos de zonas residenciales, industriales y mineras de la Región de Murcia. Para ello se realizó un análisis de riesgos para la salud, el cual incluía el riesgo de contraer cáncer y el riesgo tóxico (no carcinogénico), así como el riesgo que pudieran estar sufriendo receptores ecológicos (fauna silvestre).

Para establecer parámetros de probabilidad de riesgo de contraer cáncer se utilizó la dosis diaria promedio de por vida (LADD), en el caso de la afección a la salud (riesgo tóxico) se hizo uso de la denominada dosis diaria promedio crónico (CADD).

Para establecer la probabilidad de contraer cáncer se estableció un mínimo de 10^{-5} , mientras que para la salud (riesgo tóxico) el umbral se marcó a partir de la unidad, es decir un HQ (Hazard Quotient) igual o mayor a “1” habría riesgo a la salud. Los elementos cancerígenos evaluados fueron el arsénico y cadmio, presentando el cobre, plomo y zinc solo afección para la salud de modo general (riesgo tóxico).

Para los receptores ecológicos, su nivel de toxicidad es el mínimo observado promedio (LOAEL) el cual estadísticamente representa afección toxicológica, además, el análisis de riesgo en receptores hace uso de un nivel no observado (NOAEL), para contemplar referencias inferiores y hacer análisis más seguro.

En las zonas mineras analizadas, El Lirio y Santa Antonieta, se utilizó como usuario aquel con características recreacionales, estimando impacto por la vía dérmica e inhalación. Los resultados mostraron que las concentraciones evaluadas no representan un riesgo para este usuario, el contacto dérmico para el arsénico en la mina Santa Antonieta es el de mayor potencial de contraer cáncer, ya que para una concentración de 387 mg kg^{-1} se tiene un riesgo de $1,8 \times 10^{-6}$. En relación a la salud, la concentración de zinc en la mina el Lirio, 11915 mg kg^{-1} , fue el que más riesgo tóxico generó por la vía dérmica. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se tiene un resultado que represente un probable peligro.

En las zonas industriales, se evaluó el riesgo para dos usuarios con características de obreros. En la Balsa 2 se evaluaron las tres vías de exposición, ingestión, contacto dérmico e inhalación de partículas, para un receptor (obrero) con las condiciones más críticas, y otro obrero con superficie de piel y tiempo de exposición inferiores. Para el de mayor vulnerabilidad, se obtuvieron valores superiores a 10^{-5} por la vía de la ingestión y el contacto dérmico, para una concentración de arsénico de 1409 mg kg^{-1} . Por el contrario, el usuario con menos exposición solo presentó potencial de contraer cáncer por la vía de la ingestión. Por su parte, para la Balsa 1 de la zona industrial, evaluando el contacto dérmico y la inhalación, las concentraciones no presentaron peligro de contraer cáncer para los obreros, sin embargo, el zinc por vía dérmica, presentó riesgo afección para la salud (riesgo tóxico).

En los análisis de las zonas residenciales de La Unión y Mazarrón se evaluaron las tres posibles vías de exposición, siendo la ingestión la que mayor aporte realiza al riesgo total. En el caso de La Unión, se simuló un niño el cual ingería de forma inadvertida 200 mg día^{-1} , de un suelo con concentración de arsénico de $106,4 \text{ mg kg}^{-1}$, representando un riesgo de contraer cáncer de 17 veces más que el mínimo a partir del cual existe riesgo, y esto solo por la vía de la ingestión. Para la zona residencial de Mazarrón es notable la posible afección a la salud por ingestión de plomo, alcanzando una estimación de 8,6, para una biodisponibilidad de 1 mg mg^{-1} .

Con los análisis de sensibilidad en la zona minera de El Lirio, y reduciendo los tiempos de exposición para contacto dérmico, los cambios no resultaron ser significativos, para reducciones de tiempo de un 50%, los cambios son del orden unas cuatro veces. En la zona industrial de la Balsa 1 donde ninguna concentración promedio presento peligro para las vías consideradas, un área puntual con 965 mg kg de arsénico la convierte en zona de riesgo.

Para las zonas Mineras se analizó el nivel probable de afección de un receptor tipo conejo, considerando la vía de la ingestión, cuya concentración viene dada por el vegetal y las partículas de suelo asociadas. Para la mina de El Lirio, la concentración de plomo arroja un nivel que al ser contrastado con el nivel no observado promedio (NOAEL), representaba riesgo toxicológico, con valor de 1,085. Sin embargo, al ajustar al área de incidencia del receptor, este valor se reduce a 0,0216. Por su parte, la zona minera de Santa Antonieta; no presenta potencial de riesgo al considerar el ajuste del área.

Los resultados indicaron que al realizar estimaciones de análisis de riesgo por la presencia de metales pesados en suelo con la herramienta RISC5, esta no presenta diferencia significativa cuando se varían el tipo de suelo, el espesor donde está la contaminación ni la velocidad del viento. Las variables que afectan en mayor medida al análisis se limitan a características del receptor, el comportamiento del mismo en cuanto a tiempos de exposición y los niveles de concentración de los contaminantes. De igual modo, el área contaminada juega un papel importante en la estimación del riesgo ecológico.

Finalmente, se puede decir que el análisis de riesgo por contaminación de metales pesados y arsénico en suelos, representan una herramienta útil al momento de diseñar planes de intervención en zonas con concentraciones elevadas de estos elementos, lo que permite minimizar los impactos al establecer restricciones de permanencia y frecuencia en una zona afectada. Como se ha visto en las distintas evaluaciones, las vías de exposición resultan ser el parámetro más relevante, es por ello que al momento de simular un escenario estas deben relacionarse con el comportamiento del usuario en la zona de estudio.

6. REFERENCIAS

- Ballabio, C., Panagos, P., Lugato, E., Huang, J. H., Orgiazzi, A., Jones, A., ... & Montanarella, L., 2018. Copper distribution in European topsoils: An assessment based on LUCAS soil survey. *Science of the Total Environment*, 636, 282-298.
- Barrón, G. S. 2016. Eco toxicología del Cadmio. España: Facultad de Farmacia Universidad Complutense. Capitulo Fundamentos Básicos sobre Corrosión
- Díaz de Alba, M., 2013. Avances en el control de la contaminación por metales: nuevas metodologías de análisis y especiación metálica en sistemas acuáticos. *Estudios en la Bahía de Algeciras*.
- Dorne, J. L., Kass, G. E., Bordajandi, L. R., Amzal, B., Bertelsen, U., Castoldi, A. F., ... & Scaravelli, E., 2011. Human risk assessment of heavy metals: principles and applications. *Met Ions Life Sci*, 8(4), 27- 60.
- Eisler, R. (2007). *Eisler's encyclopedia of environmentally hazardous priority chemicals*. Elsevier.
- Guerra, F., Trevizam, A. R., Muraoka, T., Marcante, N. C., & Canniatti-Brazaca, S. G., 2012. Heavy metals in vegetables and potential risk for human health. *Scientia Agrícola*, 69(1), 54-60.
- Jensen, J., & Pedersen, M. B., 2006. Ecological risk assessment of contaminated soil. In *Reviews of environmental contamination and toxicology* (pp. 73-105). Springer, New York, NY.
- Jerup, L., 2003 . Assessment of chemical and bacteriological quality of pipe-borne water from various locations in Delta State University, Abraka, Nigeria. *African Journal of Microbiology Research*, 8(21), 2137-2143.
- Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C., 2018. Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35, 93- 102.
- Mínguez, I. P. ,2015. Ecotoxicología del arsénico en suelos de la comunidad de Madrid.
- Molnárová, M., & Fargašová, A., 2016. Se (IV), Se (VI), Cu and Zn phytotoxicity in correlation to their accumulation in *Sinapis alba* L. seedlings. *Plant Root*, 10, 11-20.
- Montoya, R., Airam, E., Montañez Hernández, L. E., Luévanos Escareño, M. P., & Balagurusamy, N. ,2015. Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118.
- Osman, K. T. ,2018. Polluted soils. In *Management of Soil Problems* (pp. 333-408). Springer, Cham.
- Pandey, G., & Madhuri, S. 2014. Heavy metals causing toxicity in animals and fishes. *Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences*, 2(2), 17-23.
- Rodríguez Heredia, D., 2017. Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MediSan*, 21(12), 3372- 3385.
- Sardar, K., Ali, S., Hameed, S., Afzal, S., Fatima, S., Shakoor, M. B., ... & Tauqeer, H. M., 2013. Heavy metals contamination and what are the impacts on living organisms. *Greener Journal of Environmental management and public safety*, 2(4), 172-179
- US-EPA, 2020a. In: <https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment> (acceso Mayo 2020).
- Wang X, Sun Y, Li S, Wang H, 2019. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil from the Raoyanghe Wetland, China. *PLoS One*. 2019;14(8)
- Wu, Y., Bartell, S. M., Orr, J., Ragland, J., & Anderson, D., 2010. A risk-based decision model and risk assessment of invasive mussels. *Ecological complexity*, 7(2), 243-255.
-