

EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE ZINC Y  
NÍQUEL EN SOLUCIÓN DEL CONCRETO PERMEABLE  
FABRICADO CON AGREGADOS DE CONCRETO  
RECICLADO

2023

**Autor: Daniel Escarcega Huerta**



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería



EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE ZINC Y  
NÍQUEL EN SOLUCIÓN DEL CONCRETO PERMEABLE  
FABRICADO CON AGREGADOS DE CONCRETO RECICLADO

Tesis

Que como parte de los requisitos  
para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

Ing. Daniel Escarcega Huerta

Dirigido por:

Dr. José Luis Reyes Araiza

Co-Director:

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Evaluación de eficiencia de remoción de zinc y níquel  
en solución del concreto permeable fabricado con  
agregados de concreto reciclado

**por**

Daniel Escarcega Huerta

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** IGMAC-248838



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias línea terminal Construcción

**EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE ZINC Y NÍQUEL EN  
SOLUCIÓN DEL CONCRETO PERMEABLE FABRICADO CON AGREGADOS  
DE CONCRETO RECICLADO**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de:

**Maestro en Ciencias**

Presenta:

**Ing. Daniel Escarcega Huerta**

Dirigida por:

**Dr. José Luis Reyes Araiza**

Co-dirigido por:

**Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza**

Dr. José Luis Reyes Araiza

Presidente

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza

Secretario

M.I. Rubén Ramírez Jiménez

Vocal

Dr. Alejandro Manzano Ramírez

Suplente

Dr. Saúl Obregón Biosca

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Noviembre 2023

México

El autor agradece al CONACYT por la beca otorgada para la realización de los estudios de Maestría en Ciencias.

Esta investigación se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Geotecnia Ambiental y del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, en el marco de los proyectos CONACYT 266106 y CONACYT 270161.

*“Te deseo primero que ames,  
y que, amando, también seas amado.  
Y que, de no ser así, seas breve en olvidar  
y que después de olvidar, no guardes rencores.  
Deseo, pues, que no sea así, pero que, si es,  
sepas ser sin desesperar.*

*Te deseo también que tengas amigos,  
y que, incluso malos e inconsecuentes  
sean valientes y fieles, y que por lo menos  
haya uno en quien confiar sin dudar.*

*Y porque la vida es así,  
te deseo también que tengas enemigos.  
Ni muchos ni pocos, en la medida exacta,  
para que, algunas veces, te cuestiones  
tus propias certezas. Y que entre ellos,  
haya por lo menos uno que sea justo,  
para que no te sientas demasiado seguro.*

*Te deseo además que seas útil,  
más no insustituible.*

*Y que en los momentos malos,  
cuando no quede más nada,  
esa utilidad sea suficiente  
para mantenerte en pie.*

*Igualmente, te deseo que seas tolerante,  
no con los que se equivocan poco,  
porque eso es fácil, sino con los que  
se equivocan mucho e irremediablemente  
y que haciendo buen uso de esa tolerancia,  
sirvas de ejemplo a otros.*

*Te deseo que siendo joven  
no madures demasiado de prisa,  
y que ya maduro, no insistas en rejuvenecer,  
y que siendo viejo no te dediques al desespero.  
Porque cada edad tiene su placer y su dolor  
y es necesario dejar  
que fluyan entre nosotros.*

*Te deseo de paso que seas triste.  
No todo el año sino apenas un día.  
Pero que en ese día descubras  
que la risa diaria es buena,  
que la risa habitual es sosa y  
la risa constante es malsana.*

*Te deseo que descubras,  
con urgencia máxima,  
por encima y a pesar de todo,  
que existen, y que te rodean,  
seres oprimidos,  
tratados con injusticia y personas infelices.*

*Te deseo que acaricies un perro  
alimentos a un pájaro  
y oigas a un jilguero erguir triunfante su canto matinal,  
porque de esa manera,  
sentirás bien por nada.*

*Deseo también que plantes una semilla,  
por más minúscula que sea,  
y la acompañes en su crecimiento,  
para que descubras de cuántas vidas  
está hecho un árbol.*

*Te deseo además, que tengas dinero,  
porque es necesario ser práctico,  
y que por lo menos una vez por año  
pongas algo de ese dinero frente a ti y digas  
«Esto es mío»  
sólo para que quede claro  
quien es el dueño de quien.*

*Te deseo también  
que ninguno de tus afectos muera,  
pero que si muere alguno,  
puedas llorar sin lamentarte y sufrir  
sin sentirte culpable.*

*Te deseo por fin que  
siendo hombre, tengas una buena mujer  
y que siendo mujer, tengas un buen hombre,  
mañana y al día siguiente,  
y que cuando estén exhaustos y sonrientes,  
hablen sobre amor para recomenzar.*

*Si todas estas cosas llegan a pasar  
no tengo más nada que desearte”.*

**Víctor Hugo**

# DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado:

*A los que están y a los que algún día estuvieron...*

*A mí, por mi eterna obstinación...*

*Con amor.....Daniel Escarcega Huerta*

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías que me apoyo económicamente durante el periodo que cursé la maestría, permitiéndome enfocarme y aprovechar la oportunidad de estudiar un posgrado. A la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Facultad de Ingeniería, por seguir siendo mi hogar y refugio en una nueva etapa de mi vida.

Al Dr. José Luis Reyes Araiza, por su insistente y muchas veces incomprensible afán de retornos, esperando que miremos todo con escepticismo y algún buen día en sus propias palabras “aportar”.

A mis profesores de licenciatura y posgrado, a los técnicos de los laboratorios y al personal de la universidad, por su tiempo, pasión por enseñar y desempeñar su trabajo admirablemente.

Una deuda muy grande de gratitud con el Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza, por su entusiasmo en la investigación y su apoyo al proyecto. Es destacable su disposición de ayudar a pesar de los contratiempos e inconvenientes. Los mejores deseos para su futuro.

A mis amigos, los de antes y los nuevos que encontré en el camino de la realización de este proyecto personal, que me ayudaron en el laboratorio, en la escuela y sin saberlo alegraron mis días.

A mi hermano, que no es consciente aún de su loable ejemplo de disciplina.

Les agradezco una vez más y siempre, a mi padre y a mi abuela; porque también somos lo que hemos perdido.

Mi total admiración y agradecimiento a mi madre; porque soy el resultado de lo que una gran mujer quiso hacer de mí.

## RESUMEN

Actualmente la sobreexplotación de recursos naturales destinados a la elaboración de concreto se ha vuelto alarmante. Además, el impacto ambiental causado por la generación de residuos de la construcción y demolición (RCD) ha ido en aumento. Por otro lado, en ciudades de todo el mundo la presencia de metales pesados tales como plomo (Pb), zinc (Zn), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) y cadmio (Cd) son depositados en las superficies que componen las calles, avenidas y carreteras debido al tránsito vehicular, quema de combustibles fósiles, entre otros. Al ocurrir una precipitación pluvial, el agua desprende y transporta una fracción de dichos metales hacia el suelo y los cuerpos de agua (superficiales y subterráneos). Deteriorando con ello la calidad de los ecosistemas y genera un peligro de salud para las personas y seres vivos. Una opción para valorizar los RCD consiste en utilizarlos como sustitutos de los agregados naturales (AN) los cuales se obtendrían a partir de la trituración de los elementos de concreto demolidos, generando con ello agregados de concreto reciclado (ACR). Estos residuos triturados, y previamente tratados, se podrían reutilizar en la elaboración de concreto permeable que podría aplicarse en la construcción de superficies y/o elementos no estructurales. Dichas superficies se podrían diseñar para que funcionaran como filtros de agua que permitieran la retención de algunos contaminantes presentes en el agua de escorrentía. De esta forma, se estaría contribuyendo a reducir la cantidad de RCD y se buscaría evitar que los metales pesados presentes en el agua de escorrentía llegaran directamente al suelo y a los cuerpos de agua.

Por lo tanto, en el presente trabajo, se evaluó la efectividad del concreto permeable (CP) elaborado a base de ACR para retener los metales pesados zinc y níquel disueltos en agua y se comparó contra la efectividad obtenida del CP elaborado con AN. La prueba de retención de contaminantes consistió en someter cilindros de CP a 10 eventos de precipitación pluvial en los cuales un flujo de agua contaminada a concentraciones iniciales conocidas de Zn y Ni, en el rango de 4.39 mg/l a 25.61 mg/l, pasó a través de los cilindros y se midió la concentración de los contaminantes en la solución obtenida después del décimo evento de

filtrado, mediante la técnica de absorción atómica. Posteriormente, se evaluó la resistencia a compresión de los especímenes de concreto utilizados durante los filtrados, para determinar si su exposición al Zn y Ni ocasionó un efecto negativo en su resistencia. Los resultados mostraron una clara tendencia del CP tanto de ACR como de AN de remover de manera predilecta iones de Ni sobre los iones de Zn. El concreto permeable con ACR llegó a tener una remoción máxima de 59.16%, 65.27% y 61.42% de Zn, Ni y Zn+Ni, respectivamente, sin que se afectara su resistencia a la compresión. Así también, la eficiencia de remoción de los metales pesados del CP con ACR fue hasta 82.17% mayor que la del CP con AN.

**Palabras clave:** Concreto permeable, metales pesados, residuos de la construcción, agregados de concreto reciclado, resistencia a la compresión.

## SUMMARY

The overexploitation of natural resources for concrete production has become alarming. Likewise, the environmental impact caused by the generation of construction and demolition waste (CDW) has been increasing. On the other hand, heavy metals such as lead (Pb), zinc (Zn), copper (Cu), chromium (Cr), nickel (Ni), and cadmium (Cd) are deposited on the road surfaces by vehicular traffic, burning of fossil fuels, and others. These contaminants compromise the water quality of rivers, lakes, aquifers, streams, and seas due to the runoff of rainwater through contaminated surfaces that carry these metals into the soil and water bodies, resulting in the deterioration of ecosystems. Moreover, it is a health hazard for people and living beings. An option to valorize CDW is to use it as a substitute for natural aggregates (NA), which would be obtained from shredding demolished concrete elements, thus generating recycled concrete aggregates (RCA). These crushed and previously treated residues could be reused to fabricate permeable concrete that could be applied in constructing non-structural elements. Such elements could work as water filters that allow the retention of some contaminants in runoff water. This would help reduce the amount of CDW and prevent heavy metals in runoff water from reaching the soil and water bodies. These work compared the effectiveness of removing zinc and nickel dissolved in water by pervious concrete (PC) made from RCA with that made from NA. The retention test consisted of submitting PC cylinders to 10 events in which a flow of water previously contaminated with known initial concentrations of Zn and Ni between 4.39 mg/l to 25.61 mg/l passes through the body of the cylinders and then measuring the concentration of the contaminants in the solution after filtration using the atomic absorption technique. Subsequently, the compressive strength of the concrete specimens used during the filtrations was measured to determine if their exposure to Zn and Ni affected their compressive strength. The results showed a clear tendency for both RCA and NA CP to preferentially remove Ni ions over Zn ions. The permeable concrete with RCA reached a maximum removal of Zn, Ni, and Zn+Ni of 59.16%, 65.27%, and 61.42%, respectively, without affecting its compressive strength. Likewise, the PC with RCA removed up to 82.17% more heavy metals than the PC with NA.

**Keywords:** Pervious concrete, heavy metals, construction waste, recycled concrete aggregates, compressive strength .

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
SUMMARY.....	v
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del Problema.....	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Antecedentes.....	3
1.3.1 Impacto Ambiental de la Industria de la Construcción.....	3
1.3.2 Uso de Agregados de Concreto Reciclado en la Fabricación de Concreto.....	5
1.3.3 Agregados de Concreto Reciclado en el Concreto Permeable.....	9
1.3.4 Presencia de Metales Pesados en Zonas Urbanas.....	12
1.3.5 Uso del Concreto Permeable en la Remoción de Metales Pesados.....	13
1.4 Hipótesis.....	15
1.5 Objetivos.....	15
1.5.1 Objetivo General.....	15
1.5.2 Objetivos particulares.....	15

Marco teórico.....	17
2.1    Sostenibilidad y Desarrollo.....	17
2.2    Concreto Permeable.....	18
2.2.1    Contenido de Vacíos para Concreto Permeable Endurecido.....	19
2.2.2    Permeabilidad.....	19
2.3    Resistencia a la Compresión del Concreto .....	20
2.4    Metales Pesados.....	21
2.4.1    Fuentes de Emisión de Metales Pesados .....	22
2.4.2    Efectos de los Metales Pesados en el Ambiente y su Toxicidad en los Seres Vivos	23
2.5    Mecanismos de Remoción de Metales Pesados en el Concreto Permeable .....	25
2.5.1    Adsorción .....	26
2.5.2    Superficie Específica .....	28
2.5.3    Adsorción Química e Intercambio Iónico .....	28
2.6    Cinética de Adsorción.....	30
2.6.1    Modelo Cinético de Pseudo Primer Orden o Ecuación de Lagergren .....	31
2.6.2    Modelo Cinético de Pseudo Segundo Orden.....	31
2.7    Espectrofotometría de Absorción Atómica.....	32
Metodología.....	34
3.1    Caracterización de ACR .....	35

3.1.1	Obtención de Residuos de Construcción y Demolición como Agregado Grueso	35
3.1.2	Granulometría.....	36
3.1.3	Densidad y Absorción .....	36
3.1.4	Peso Unitario Compactado .....	38
3.2	Diseño de la mezcla para concreto permeable.....	39
3.2.1	Materiales .....	39
3.2.2	Proporcionamiento .....	39
3.3	Fabricación y Caracterización de Especímenes de Concreto Permeable.....	41
3.3.1	Elaboración de la Mezcla .....	41
3.3.2	Densidad y Contenido de Vacíos .....	44
3.3.3	Permeabilidad.....	45
3.4	Experimentación de Retención de Metales Pesados por Filtrado en Concreto Permeable .....	48
3.4.1	Cálculo del Volumen de la Solución .....	48
3.4.2	Diseño Estadístico del Experimento Variando la Concentración de Níquel y Zinc	49
3.4.3	Filtrados en Concreto Permeable con ACR.....	52
3.4.4	Filtrados en Concreto Permeable con AN .....	55
3.4.5	Pruebas para la Cinética de Retención de Metales Pesados .....	56
3.5	Resistencia a la Compresión Simple.....	57

3.6	Tratamiento de Residuos .....	58
	Resultados y discusión .....	59
4.1	Caracterización de ACR .....	59
4.1.1	Granulometría.....	59
4.1.2	Densidad y Absorción .....	60
4.2	Caracterización de AN.....	61
4.2.1	Granulometría.....	61
4.2.2	Densidad y Absorción .....	63
4.3	Diseño de Mezcla de Concreto Permeable con ACR .....	63
4.3.1	Concreto Permeable con ACR.....	63
4.3.2	Concreto Permeable con AN .....	64
4.4	Propiedades Hidráulicas .....	64
4.4.1	Contenido de Vacíos.....	64
4.4.2	Coefficiente de Permeabilidad.....	66
4.5	pH de las Soluciones.....	68
4.5.1	Concreto Permeable con ACR.....	68
4.5.2	Concreto Permeable con AN .....	70
4.5.3	Relación del Porcentaje de Remoción de Ni en la Solución con el pH.....	72
4.6	Análisis Químico Elemental Inicial .....	75

4.6.1	Análisis de Elementos Traza del Agua Potable.....	75
4.7	Retención de Metales Pesados del Concreto Permeable con ACR.....	75
4.7.1	Análisis Estadístico de la Superficie de Respuesta de Zn-Ni VS Remoción de Ni	78
4.7.2	Análisis Estadístico de la Superficie de Respuesta de Zn-Ni VS Remoción de Zn	81
4.7.3	Análisis Estadístico de la Superficie de Respuesta de Zn-Ni VS Remoción de Contaminantes .....	84
4.8	Retención de Metales Pesados del Concreto Permeable con AN.....	86
4.9	Cinética de Remoción de Metales Pesados.....	89
4.9.1	Ajuste de los Modelos de Cinética de Adsorción por Evento .....	91
4.10	Contenido de Calcio en la Solución.....	94
4.11	Resistencia a la Compresión .....	97
4.11.1	Relación de Exposición Zn y Ni con la Resistencia a la Compresión.....	98
4.11.2	Relación del Porcentaje de Vacíos con la Resistencia a la Compresión .....	102
4.11.3	Relación de la Concentración Final de Ni en la Solución con la Resistencia a la Compresión.....	106
4.12	Análisis de Costos.....	107
4.13	Posibles Aplicaciones del Concreto Permeable con ACR.....	111
	Conclusiones.....	114
5.1	Líneas Futuras de Investigación .....	115

Referencias .....	116
Publicaciones Derivadas del Proyecto de Investigación .....	126

## Índice de Figuras

---

Figura 1.-Relación entre el contenido de vacíos y la permeabilidad del concreto permeable. .....	20
Figura 2.-Celda de longitud "b" que contiene la muestra absorbente "c" con una concentración de masa " $\gamma$ " de la especie absorbente, donde se hace incidir la radiación de longitud de onda " $\lambda$ ", con intensidad " $I_0$ ", para obtener en la salida la radiación transmitida. .....	33
Figura 3.-Diagrama de flujo general de la experimentación. ....	34
Figura 4.-a) Recuperación y b) trituración de escombros de concreto para obtener los ACR. .....	35
Figura 5.- Análisis granulométrico por tamizado.....	36
Figura 6.-Determinación del volumen de la muestra. ....	38
Figura 7.-Material pesado según la dosificación de la mezcla, previo al colado de las probetas. .....	41
Figura 8.-a) Mezclado de los ACR con el agua. b) Mezcla fresca de concreto permeable con agregados naturales.....	42
Figura 9.-Especímenes de concreto permeable con ACR recién colados. ....	43
Figura 10.-Curado de cilindros de concreto permeable en tanque de almacenamiento de agua. .....	43
Figura 11.-a) Determinación de la masa seca de la probeta de concreto permeable con agregados naturales. b) Determinación de la masa sumergida de la probeta de concreto permeable con ACR.....	44
Figura 12.- Diagrama de diseño de permeámetro de carga variable. ....	46

Figura 13.- Permeámetro de carga variable de elaboración propia. ....	46
Figura 14.- Muestra de concreto permeable con ACR colada para prueba de permeabilidad. .....	47
Figura 15.- Marcas de referencia de nivel h1 y h2. ....	47
Figura 16.-Isoyetas de Intensidad de Lluvia 2015 (mm/h) para un periodo de retorno de 10 años y una duración de 60 min. ....	48
Figura 17.-Diagrama del diseño central compuesto de las concentraciones. ....	51
Figura 18.- Preparación de la solución inicial con la concentración de Zn y Ni requerida..	51
Figura 19.-Ajuste del pH de la solución inicial con hidróxido de sodio. ....	52
Figura 20.-Medición del potencial de hidrogeno de la solución filtrada. ....	53
Figura 21.- Filtrado de la solución en probetas de concreto permeable con ACR. ....	54
Figura 22.- Muestra de 250 ml recolectada posterior al filtrado del evento 10. ....	55
Figura 23.-Filtrado de la solución en probetas de concreto permeable con AN. ....	56
Figura 24.- Montaje de cilindro de concreto permeable con ACR para prueba de compresión simple. ....	57
Figura 25.- Cilindro de concreto permeable con casquetes de neopreno. ....	58
Figura 26.- Residuos líquidos expuestos a insolación directa. ....	58
Figura 27.- Curva granulométrica de los ACR. ....	60
Figura 28.- Curva granulométrica de los AN. ....	62
Figura 29.- Histograma del porcentaje de vacíos de los especímenes de concreto permeable. .....	65

Figura 30.- Verificación gráfica de la relación del % de vacíos con el coeficiente de permeabilidad. ....	68
Figura 31.-Gráfica de pH de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con ACR.....	69
Figura 32.-Gráfica de pH de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con AN y ACR.....	71
Figura 33.-Gráfica de pH promedio de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con AN y ACR. ....	72
Figura 34.-Diagrama de dispersión y de correlación lineal no paramétrica de la variación máxima de pH con el porcentaje de remoción de Ni.....	74
Figura 35.-Diagrama de dispersión y de correlación lineal no paramétrica de la variación máxima de pH con el porcentaje de remoción de Zn. ....	74
Figura 36.-Histograma de los resultados de remoción de Zn del concreto permeable con ACR .....	77
Figura 37.-Histograma de los resultados de remoción de Ni del concreto permeable con ACR .....	78
Figura 38.-Curvas de contorno de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Ni.....	79
Figura 39.-Superficie de respuesta de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Ni....	79
Figura 40.-Curvas de contorno de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Zn. ....	82
Figura 41.-Superficie de respuesta de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Zn....	82
Figura 42.-Curvas de contorno de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Zn+Ni. ..	84
Figura 43.-Superficie de respuesta de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Zn+Ni. ....	85

Figura 44.-Histograma de los resultados de remoción de Zn del concreto permeable con AN VS ACR.....	87
Figura 45.-Histograma de los resultados de remoción de Ni del concreto permeable con AN VS ACR.....	88
Figura 46.-Histograma de la concentración final de calcio en la solución del concreto permeable con AN VS ACR.....	88
Figura 47.-Histograma del experimento de cinética de remoción de Zn y Ni del concreto permeable con ACR.....	90
Figura 48.-Curvas de tendencia de la capacidad de adsorción de Zn del CP con ACR y la concentración de Zn por evento y sus ajustes para el modelo de pseudo primer y segundo orden. ....	92
Figura 49.-Curvas de tendencia de la capacidad de adsorción de Ni del CP con ACR y la concentración de Ni por evento y sus ajustes para el modelo de pseudo primer y segundo orden. ....	93
Figura 50.-Eflorescencia en cilindro de concreto permeable AN-Control. ....	95
Figura 51.-Eflorescencia en cilindro de concreto permeable ACR-Control. ....	95
Figura 52.-Diagrama de dispersión y de correlación lineal no paramétrica de la concentración de calcio con el porcentaje de remoción de Zn .....	96
Figura 53.- Fragmento de cilindro de concreto permeable con ACR posterior al ensayo a compresión simple.....	98
Figura 54.- Curvas de contorno de la concentración de Zn-Ni Vs resistencia a compresión del concreto.....	99
Figura 55.-Superficie de respuesta de la concentración de Zn-Ni Vs resistencia a compresión del concreto.....	100

Figura 56.-Relación de la resistencia a la compresión VS porcentaje de vacíos del concreto permeable.....	102
Figura 57.- Gráfica de prueba de distribución normal para los resultados del porcentaje de vacíos del concreto permeable con ACR.....	104
Figura 58.-Gráfica de prueba de distribución normal para los resultados de la resistencia a compresión del concreto permeable con ACR. ....	104
Figura 59.- Diagrama de dispersión y de correlación lineal paramétrica del porcentaje de vacíos Vs resistencia a compresión del concreto permeable con ACR.....	105
Figura 60.-Diagrama de dispersión y de correlación lineal paramétrica de la concentración de Ni resultante del evento 10 Vs resistencia a compresión del concreto permeable con ACR. ....	106
Figura 61.- Gráfica del costo directo de la elaboración de concreto permeable con ACR y AN. ....	110
Figura 62.-Sección transversal de carretera con pozos de absorción. ....	112
Figura 63.-Estructura de pavimento permeable.....	113

## Índice de Tablas

---

Tabla 1.-Estrategias del plan de manejo de RCD.....	6
Tabla 2.-Límites Máximos Permisibles Para Metales Pesados.....	24
Tabla 3.-Valores efectivos de la relación b/b0 (ACI, 2010).....	40
Tabla 4.- Parámetros de la superficie de respuesta.....	50
Tabla 5.-Matriz del diseño experimental variando las concentraciones de níquel y zinc. ....	50
Tabla 6.- Granulometría del ACR. ....	59
Tabla 7.- Densidad y absorción de ACR.....	60
Tabla 8.- Granulometría de los AN. ....	61
Tabla 9.-Densidad y absorción de AN.....	63
Tabla 10.- Proporcionamiento de concreto permeable con ACR.....	63
Tabla 11.-Proporcionamiento de concreto permeable con AN. ....	64
Tabla 12.- Contenido de vacíos de los cilindros de concreto permeable. ....	65
Tabla 13.- Resultados de la prueba de permeabilidad.....	67
Tabla 14.- pH de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con ACR.....	69
Tabla 15.-pH de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con AN y ACR. ....	71
Tabla 16.- Variación máxima de pH y el porcentaje de remoción de Ni en el concreto permeable con ACR.....	73

Tabla 17.- Análisis de elementos traza del agua potable.....	75
Tabla 19.- Tabla resumen de las concentraciones iniciales y finales de Zn, Ni y Ca y su remoción en la solución del concreto permeable con ACR.....	76
Tabla 20.-Regresión lineal de los datos experimentales Zn-Ni Vs % remoción de Ni. ....	80
Tabla 21.-Análisis de la varianza Zn-Ni Vs % remoción de Ni. ....	81
Tabla 22.-Regresión lineal de los datos experimentales Zn-Ni Vs % remoción de Zn.....	83
Tabla 23.-Análisis de la varianza Zn-Ni Vs % remoción de Zn.....	83
Tabla 24.-Regresión lineal de los datos experimentales Zn-Ni Vs % remoción de Zn+Ni. ....	85
Tabla 25.-Análisis de la varianza Zn-Ni Vs % remoción de Zn+Ni. ....	86
Tabla 26.-Tabla resumen de las concentraciones iniciales y finales de Zn, Ni y Ca y su remoción en la solución del concreto permeable con AN y ACR.....	86
Tabla 27.- Resultados del experimento de cinética de remoción de Zn y Ni del concreto permeable con ACR.....	89
Tabla 28.- Parámetros de las ecuaciones cinéticas de pseudo 1er orden y pseudo 2do orden por contaminante. ....	91
Tabla 29.- Resultados de la resistencia a compresión de los cilindros de CP con ACR posterior a los filtrados. ....	97
Tabla 30.- Regresión lineal de los datos experimentales Zn-Ni Vs resistencia a la compresión. ....	100
Tabla 31.- Análisis de la varianza Zn-Ni Vs resistencia a la compresión. ....	101
Tabla 32.-Costo directo para la elaboración de concreto permeable con ACR.....	108

Tabla 33.-Costo directo para la elaboración de concreto permeable con agregados naturales.  
..... 109

### 1. Introducción

En el **Capítulo I** de esta tesis se presentan algunos antecedentes de proyectos de investigación destacados en las áreas de agregados de concreto reciclado en el concreto y la aplicación del concreto permeable en el tratamiento de aguas por contaminación de metales pesados, la hipótesis, la justificación y el objetivo general de la presente investigación.

En el **Capítulo II** se establecen los conceptos, métodos, teorías y modelos físicos y matemáticos necesarios para definir los fundamentos científicos que permitieron identificar las variables relacionadas con la remoción de metales pesados a partir de la utilización como filtro del concreto permeable con agregados de concreto reciclado y su desempeño mecánico posterior. Dentro de la información presentada, se incluye a lo largo del capítulo los aspectos ambientales de la industria de la construcción, los metales pesados, sus fuentes emisoras, así como su impacto en el ambiente. Se incluye además los aspectos generales del concreto permeable, sus características, beneficios y componentes. Por último, se presentan los mecanismos por los cuales el concreto permeable es capaz de absorber diferentes contaminantes, haciendo énfasis en los iones metálicos de Zn y Ni, además de modelos matemáticos que describen la velocidad y permanencia de estos contaminantes en la solución.

El **Capítulo III** estará basado en la descripción de los materiales, reactivos y métodos que se utilizaron para la elaboración de las probetas de concreto permeable, la preparación de la solución de los contaminantes Zn y Ni, los ensayos de filtrado y de retención de metales pesados, así como las pruebas de caracterización de la mezcla endurecida de concreto permeable.

En el **Capítulo IV** se presentan los resultados obtenidos en la experimentación y su análisis a partir de herramientas estadísticas para identificar aquellas variables significativas que toman relevancia al momento de condicionar el comportamiento del concreto permeable respecto a su eficacia para remover metales pesados, su resistencia a compresión y sus

propiedades hidráulicas. Además, durante los subcapítulos se realiza la comparativa entre los datos experimentales y la hipótesis inicial de la tesis.

## **1.1 Descripción del Problema**

Los residuos generados por la industria de la construcción tienen potencial de reúso o reciclaje, por lo que en la actualidad la normativa ambiental de la Ciudad de México NACDMX-007-RNAT-2019 establece las especificaciones y requisitos técnicos para su manejo integral, buscando fomentar el manejo de estos residuos, así como garantizar su reciclaje, reúso y su correcta disposición final. En dicha norma se señala de manera obligatoria reutilizar el 100% de los residuos de concreto en elementos no estructurales en el sitio de generación siempre que sea factible. Asimismo, dentro de esa gama de elementos no estructurales se encuentran la utilización del concreto permeable en pavimentos en zona de estacionamiento, banquetas, pozos de absorción, cunetas, etc., donde se pueden reutilizar los residuos de la construcción y demolición (RCD) en sustitución del agregado grueso, aprovechando además sus propiedades permeables que, mediante la infiltración, facilita la gestión de la escorrentía superficial minimizando el riesgo por inundaciones y permite la recarga de los mantos freáticos. No obstante, el agua proveniente de los escurrimientos en zonas urbanas trae consigo concentraciones importantes de metales pesados, que de infiltrarse pueden ser transportados a los cuerpos de agua y al subsuelo, causando daños a los ecosistemas y a la salud de las personas. Por lo anterior, se propone añadir agregados de concreto reciclado al concreto permeable para aprovechar los RCD y al mismo tiempo darle un tratamiento de remoción de metales pesados al agua antes de infiltrarse y que estos metales queden retenidos dentro del concreto permeable.

De modo que, en este trabajo de investigación, se pretende medir la capacidad que tiene el CP con 100% ACR para retener los metales pesados zinc y níquel, cuando es utilizado como filtro, para posteriormente determinar si su resistencia a compresión simple se reduce debido a la acción de estos metales.

## **1.2 Justificación**

Actualmente se cuenta con diferentes estudios que demuestran que el concreto permeable convencional puede ser utilizado como barrera permeable activa en el tratamiento de aguas procedentes de la escorrentía pluvial. Se sabe que el CP tiene como beneficio la infiltración de escurrimientos y a su vez funciona como barrera física de primera descarga reteniendo contaminantes sólidos de tamaño superior a 25 mm (ACI, 2010). Además, se ha demostrado que el CP tiene la capacidad de retener metales pesados disueltos en el agua, llegando a reducir la concentración de los mismos. Sin embargo, la revisión bibliográfica realizada, muestra que no se cuenta con estudios relacionados con la influencia que tiene la incorporación de ACR a la mezcla de CP respecto a la efectividad que tiene para retener metales pesados, así como el efecto de dichos contaminantes en sus propiedades mecánicas del CP con ACR.

Por lo anterior, esta investigación busca generar información sobre la capacidad del CP con ACR en la retención de zinc y níquel disueltos en agua, y estudiar su resistencia a compresión simple luego de ser usado como filtro.

## **1.3 Antecedentes**

### **1.3.1 Impacto Ambiental de la Industria de la Construcción**

El sector de la construcción mantiene una relación muy estrecha con el medio ambiente, desde dos vertientes diferentes. Una positiva, ya que la industria de la construcción crea edificaciones e infraestructuras, que proveen las facilidades para las actividades humanas, proporcionando los medios físicos para mejorar o proteger el medio ambiente y al mismo tiempo contribuir al desarrollo social y económico de los países. Sin embargo, la relación también es negativa, ya que durante el proceso de construcción, mantenimiento y demolición de las edificaciones, se utilizan una gran cantidad de recursos naturales como materias primas, se consume energía proveniente de la quema de combustibles fósiles y se genera un alto volumen de residuos entrópicos que contribuyen a la contaminación del aire y el agua (Piñeiro García y García-Pintos Escuder, 2009; Rondinel-Oviedo, 2021)-

El concreto es por mucho el material de construcción de uso más extendido en todo el mundo, con una producción anual mundial de entre 13 mil millones y 21 mil millones de toneladas (Zhang et al., 2019). El concreto a base de cemento portland, a menudo es percibido como un material ambientalmente amigable, en comparación con otros materiales de construcción. No obstante, la industria del concreto precisa de muchas acciones para reducir su impacto ambiental (Arredondo Rea, 2011).

Además del impacto ambiental de las grandes cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el sector de la construcción debido a la producción del clínker, que es el material principal usado en la producción de cemento en todo el mundo (Habert & Roussel, 2009), se ha señalado también como un factor importante de contaminación a la enorme cantidad de otros materiales necesarios en el sector de las edificaciones, ya que el 49% de la piedra bruta, la grava y la arena, el 25% de la madera virgen y el 16% del agua son consumidos a nivel mundial por el sector de la construcción. La enorme demanda de concreto en el sector de la construcción conlleva una enorme necesidad de áridos (Zhang et al., 2019).

Desde otra perspectiva, en todo el mundo se genera una gran cantidad de residuos de construcción y demolición (RCD), convirtiéndose en una amenaza creciente para el medio ambiente (Zhang et al., 2019). La generación anual de RCD es de aproximadamente 850 millones de toneladas en la Unión Europea. Tan solo en China, se producen aproximadamente 200 millones de toneladas de residuos de concreto al año (Zhang et al., 2019).

A nivel mundial la industria de la construcción es responsable de (Arredondo Rea, 2011):

- Explotar el 50 % de los materiales en bruto de la naturaleza.
- Consumir el 40% del total de la energía que se produce mundialmente.
- Crear el 50% del total de desperdicios.

La gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) es un problema urgente a nivel mundial. En China casi el 50% de los vertederos municipales de residuos sólidos, están ocupados por RCD (Zhang et al., 2019). Las enormes cantidades de escombros generadas en

la demolición, la construcción y la renovación de estructuras está poniendo a prueba la capacidad de los vertederos e induciendo fugas económicas (El-Hassan et al., 2019).

El alto volumen de generación de RCD y su eliminación, que en los países en desarrollo suele hacerse en el espacio abierto disponible más cercano, es un problema ambiental importante (Rondinel-Oviedo, 2021). Su disposición, sin separación ni tratamiento, frecuentemente se realiza en sitios clandestinos y trae como consecuencias la obstrucción de arroyos, afectaciones al drenaje natural, focos de contaminación por mezcla de residuos, afectación al medio físico y medio biótico, proliferación de polvo (contaminación del aire) que provoca a su vez enfermedades respiratorias, proliferación de fauna nociva, obstrucción de zonas de recarga de agua subterránea y contaminación del suelo y el subsuelo e incluso de acuíferos (CMIC, 2013).

Estudios realizados por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), estiman que en México en el 2018 se generaron un total de 9.9 millones de toneladas de RCD. Además reporta que en el año 2013 solo el 4% de los RCD fueron aprovechados, reciclados o reutilizados (CMIC, 2013). En el año 2020, tan solo en la ciudad de México al día se generan 14 mil toneladas de RCD, según datos del inventario de residuos sólidos 2020 de la Secretaría de Medio Ambiente, de los cuales solo se procesan 6 mil toneladas al día de los mismos, en 6 plantas privadas de tratamiento en la Ciudad de México (SEDEMA-CDMX, 2020).

### **1.3.2 Uso de Agregados de Concreto Reciclado en la Fabricación de Concreto**

Dentro de la industria de la construcción se han tomado medidas en el reciclaje de residuos para llegar a tener construcciones más sustentables. Un ejemplo de ello es la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) que siendo una institución de interés público dentro del ramo de la construcción, en su plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición del 2013 (CMIC, 2013), fundamentado desde un marco regulatorio jurídico y normativo de acuerdo a lo establecido a la NOM-161-SEMARNAT-2011, NOM-083-SEMARNAT-2003 y la NOM-052-SEMARNAT-2005, establece una serie

de estrategias del manejo integral de residuos de la construcción y la demolición (RCD) en diferentes etapas dentro de la obra y fuera de la obra, las cuales se describen en la Tabla 1.

*Tabla 1.-Estrategias del plan de manejo de RCD.*

<i>Etapa</i>	<i>Planeación</i>	<i>Etapas dentro de la obra</i>		<i>Etapas fuera de la obra</i>		
<i>Actividad</i>	Identificación de residuos e indicadores de manejo	Minimización en la generación	Separación de residuos en obra	Reúso y reciclaje	Acopio y transporte	Disposición final

Fuente: adaptado del CMIC (2013)

Dentro del plan de manejo integral de RCD propuesto por la CMIC, se identifican los usos propensos de los RCD dependiendo del grupo de origen de los residuos (material de excavación, concreto, elementos mezclados prefabricados y pétreos, residuos orgánicos y otros) dentro de los cuales se propone la utilización de los agregados de concreto reciclado (ACR) en bases hidráulicas, concretos hidráulicos, camas de tuberías, acostillamientos y rellenos, rellenos de cimentaciones, pedraplenes y rellenos de azoteas y jardineras.

Diversos autores se han dado a la tarea de investigar el papel de los ACR en la elaboración de concretos más sustentables, tal es el caso de Zhang et al. (2019), quienes realizaron una investigación del estado del arte acerca del análisis del ciclo de vida de los agregados reciclados de concreto para evaluar y comparar el impacto ambiental del concreto de agregados reciclados y el concreto elaborado con agregados naturales. Como resultado de su estudio, identificó los problemas fundamentales de la aplicación de un análisis del ciclo de vida para la evaluación del impacto ambiental de los ACR desde 5 aspectos.

El primero es el efecto que tiene el método de diseño de mezcla, ya que los métodos clásicos de diseño de mezclas de ACR suelen sustituir un determinado porcentaje de los AN, ya sea una parte del volumen o masa equivalente. Sin embargo, debido al mortero adherido, los concretos a base de ACR presentan una doble zona de transición interfacial, lo que compromete y hace inferior su resistencia a compresión y módulo de elasticidad en comparación con los concretos convencionales. (Zhang et al., 2019)

Otro de los problemas para el análisis del ciclo de vida del ACR es que no se ha establecido una unidad funcional de referencia para evaluar la factibilidad económica, técnica y ambiental de su uso. De esta manera, Zhang et al. (2019), mencionan que una unidad funcional es una base importante que permite que sus posibles aplicaciones sean comparables y analizables.

Zhang et al. (2019), señalan además el efecto que tiene el almacenamiento de ACR como una fuente de incertidumbre para analizar los impactos ambientales del reciclaje de residuos de la construcción. Desde su investigación, sugieren que un análisis económico de los procesos de almacenamiento es un método óptimo y equiparable para asignar el impacto ambiental del proceso de reciclaje y almacenamiento, además recomienda que el almacenamiento debe ser evitado por la posible generación de subprocesos en la cadena de reciclaje de residuos de la construcción.

Igualmente el efecto de la captación de CO<sub>2</sub> mediante el proceso de carbonatación del concreto según Zhang et al. (2019) raramente se toma en cuenta en los balances de emisiones de CO<sub>2</sub>. Asimismo, durante su investigación indica que cuando las estructuras de concreto son demolidas y refinadas a ACR, el área superficial de los ACR se incrementa en gran medida y su tasa de absorción de CO<sub>2</sub> por unidad de masa de concreto y la cantidad total de absorción de CO<sub>2</sub> aumentan significativamente.

Por último Zhang et al., (2019) muestra que el efecto del tipo de transporte y la distancia de recorrido tiene que ser analizados para comparar el impacto ambiental entre los AN y los ACR. Destacando que en promedio los agregados naturales suelen ser transportados entre 0.3 km a 280 km, mientras que los ACR son transportados en promedio una distancia de 0 km a 40 km.

Estudios experimentales sobre concretos con ACR han sido llevados a cabo por Arredondo Rea, (2011), mediante la fabricación de concretos sustentables hechos con agregado grueso reciclado y añadiendo diferentes proporciones de materiales puzolánicos (humo de sílice y ceniza volante). En su trabajo se estudió el comportamiento fisicoquímico, la porosidad y la microestructura de las diferentes mezclas. Encontrando que la resistencia a la compresión del

concreto sustentable con el 100% de agregados gruesos reciclados es menor hasta en un 15% aproximadamente que el concreto normal, comportamiento que se le atribuye a la mayor porosidad del agregado reciclado, a su menor densidad con respecto del agregado natural y al incremento de la zona de transición interfacial por el uso de agregado reciclado. Además de reportar que añadir humo de sílice a la mezcla, mejora las propiedades químicas, físicas y microestructurales del concreto sustentable.

Wagih et al. (2013) discuten la posibilidad de remplazar los AN con ACR en el concreto estructural. Estos autores recolectaron y caracterizaron escombros de concreto en diferentes lugares y vertederos de la ciudad del Cairo, con lo cual elaboraron 8 grupos de mezclas con diferentes cantidades de ACR, dosificación de cemento, aditivo reductor de agua y humo de sílice.

Wagih et al. (2013) encontraron que los escombros de concreto, una vez triturados y caracterizados, pueden ser utilizados como como agregados reciclados en la producción concreto nuevo con propiedades adecuadas para la mayoría de las aplicaciones del concreto estructural. Sin embargo, reportan que para aquellos concretos compuestos por el 100% de ACR, se presenta una reducción de sus propiedades mecánicas en comparación con el concreto con AN, mientras que las mezclas hechas de un 75% AN y 25% ACR no mostraron cambios significativos en las propiedades del concreto.

Además de la granulometría de los ACR como variable fundamental en las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto, Joseph et al. (2015) han destacado la importancia que juega la absorción de agua de los ACR en las propiedades de una mezcla de concreto, que en muchas ocasiones debido a su naturaleza heterogénea, es difícil predecir su porcentaje de absorción, presentando variaciones importantes. La alta absorción de agua por parte de los ACR en comparación con AN, está ligado a la presencia de concreto viejo en el agregado; que, al momento de ser mezclado en la elaboración, absorbe agua como si fuera una esponja en el concreto fresco, impactando rotundamente en la relación agua/cemento y con ello en la durabilidad y resistencia que el concreto pueda desarrollar. Adicionalmente, cuando el agua absorbida se evapora en la mezcla endurecida, se incrementa la porosidad y permeabilidad, resultando en decremento de su resistencia mecánica (Joseph et al., 2015).

### **1.3.3 Agregados de Concreto Reciclado en el Concreto Permeable**

Estudios enfocados al concreto permeable fueron realizados por El-Hassan et al. (2019) quienes investigaron los efectos que tiene el uso de ACR en las propiedades del concreto permeable. Durante su experimentación, los AN fueron sustituidos por ACR en un 0, 10%, 20%, 40%, 70% y 100% en la mezcla de concreto permeable. También se incorporó escoria de alto horno para mejorar el rendimiento y la sostenibilidad de la mezcla de concreto. Posteriormente, evaluaron las propiedades como el revenimiento, densidad, contenido de vacíos, porosidad, permeabilidad, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la abrasión de cada una de las mezclas. Encontrando que la sustitución de AN por ACR provoca un ligero aumento en los contenidos de vacíos, esto debido a la forma más angular y a una textura superficial rugosa de los ACR, lo cual incrementa el ingreso de aire a la mezcla de concreto.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, encontraron que con el diseño del 10% de porosidad de la mezcla de concreto permeable sin escoria de alto horno, el reemplazo de AN por ACR en un 10%, 20%, 40%, 70% y 100% presenta una reducción en su capacidad para resistir esfuerzos de compresión en un 28%, 34%, 67%, 82% y 87% respectivamente, promediando un 12% de decremento por cada 10% de ACR utilizado como reemplazo de agregados gruesos naturales. De igual manera, reportaron que la resistencia a la abrasión del concreto permeable fue influenciada principalmente por la sustitución de ACR, ya que registró una mayor pérdida de masa a mayor cantidad de ACR utilizado, pese a ello, indican que utilizar hasta un 20% de ACR en la mezcla no afecta significativamente la resistencia a la abrasión del concreto permeable.

De manera general, El-Hassan et al. (2019) encontraron que las propiedades mecánicas del concreto permeable a los 28 días tales como su resistencia a compresión, a la tensión y a la flexión, decrecen a medida que se incremente la incorporación de ACR como reemplazo de AN en la mezcla. Los resultados experimentales de El-Hassan et al. (2019) en términos de sus propiedades mecánicas, muestran que las mezclas de concreto permeable con un 100% de ACR son aceptables. Sin embargo, para minimizar los efectos de la pérdida de resistencia a la abrasión, recomienda que el porcentaje de ACR en la mezcla se limite a un 40% y 20%.

Dejando el uso del concreto permeable con el 100% de ACR limitado a aplicaciones con requerimientos de solicitaciones bajas de fuerzas de abrasión, como pavimentos en áreas de estacionamiento, banquetas, carreteras de bajo nivel y de tráfico ligero.

Tijani et al. (2021) examinaron los efectos que tiene la ceniza “Sorgum Husk” y ACR en el CP para utilizarlo como pavimento, elaboraron mezclas de CP en los cuales sustituían el cemento Portland con 0%, 5%, 10%, 20% y 25% de ceniza y 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de AN por ACR, para posteriormente analizar su resistencia a la compresión, porcentaje de vacíos y el coeficiente de permeabilidad. Dentro de sus resultados se reportaron que a medida que se incrementa la cantidad de ACR en la mezcla; decrece su resistencia a la compresión en el orden de 10.7%, 19.8%, 32.1%, 41.8% y 47.9% con un 0%, 20%, 40 %, 60%, 80% y 100% de ACR, respecto al CP elaborado con el 100% de AN. Respecto a las propiedades hidráulicas del CP, encontraron que la presencia de ACR en la mezcla promovían el aumento del contenido de vacíos, alcanzando un aumento del 20.46% para las mezclas con un 100% de ACR; por consecuencia el coeficiente de permeabilidad se incrementó 55% respecto al concreto de control (0% ACR) cuando se utiliza el 100% de ACR en la mezcla de CP. En su investigación, (Tijani et al., 2021) señalan que la disminución de la resistencia a compresión a medida que se sustituyen los AN, se debe a la débil unión que se forma entre el mortero antiguo y la pasta de cemento nueva dentro de la mezcla. Adicionalmente, explican que el incremento del contenido de vacíos y la permeabilidad es generado por la alta porosidad de los ACR, debido a la presencia de mortero envejecido en los agregados reciclados, lo que a su vez también provoca que el CP sea menos denso.

Cai et al. (2020) evaluaron el desempeño del CP con agregados de residuos de ladrillos (ARL) en sustitución de AN como base para pavimentos. En su investigación realizaron pruebas de resistencia a compresión simple, pruebas de contracción y pruebas de permeabilidad a mezclas de CP con 0, 15%, 30% y 50% de sustitución de AN por ARL, obteniendo como resultado resistencias promedio a la compresión luego de 28 días de colado de 127 kg/cm<sup>2</sup>, 102 kg/cm<sup>2</sup>, 61 kg/cm<sup>2</sup> y 50 kg/cm<sup>2</sup> para 0, 15%, 30% y 50% de contenido de ARL respectivamente. Cai et al. (2020) identificaron que a mayor contenido de ARL en la mezcla se reducía su resistencia a la compresión; a 28 días con un contenido de 50% de

ARL la resistencia se reducía hasta en un 63% en comparación a la mezcla con 0% de ARL. Adicionalmente, estos investigadores encontraron que añadir un 15% de ARL, la mezcla lograba un 80% de la resistencia de la mezcla de CP conformado únicamente con AN. Acorde a sus resultados experimentales, Cai et al. (2020) sugieren que el contenido de ARL en el concreto permeable para aplicaciones como base para carreteras deberá limitarse a 15%.

Investigaciones enfocadas a la influencia del tamaño de ACR sobre las propiedades mecánicas del concreto permeable fueron realizadas por Singh y Singh (2020), en cuyos estudios se realizaron 5 diseños de mezclas diferentes usando 100% de ACR y variando el tamaño de los agregados. Singh y Singh (2020) utilizaron dos granulometrías diferentes con tamaños de partícula pequeños (4.75-10 mm) y grandes (10-12.5 mm) cuya proporción en la mezcla fue variando de 0, 25%, 50%, 75% y 100%. Para cada una de las mezclas se midió su resistencia a la compresión, tensión indirecta y a la flexión. Sus resultados demostraron que las mezclas con 75% de ACR con granulometría pequeña incrementa un 71.5% la resistencia a compresión de la mezcla en comparación al CP con un 100% de ACR con tamaños grandes de partícula; siendo que su resistencia a la compresión, tensión y flexión a 28 días de curado fue la mayor de las mezclas con una resistencia a la compresión de 142 kg/cm<sup>2</sup>, 17 kg/cm<sup>2</sup> a la tensión y 16 kg/cm<sup>2</sup> a la flexión.

Además de la granulometría, como variable fundamental en las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto permeable, Joseph et al. (2015) han destacado la importancia que juega la absorción de agua de los ACR en las propiedades de una mezcla de concreto, que en muchas ocasiones, debido a su naturaleza heterogénea, es difícil predecir su porcentaje de absorción, presentando variaciones importantes. La alta absorción de agua por parte de los ACR en comparación con AN, está ligado a la presencia de concreto viejo en el agregado; que al momento de ser utilizado en la mezcla absorbe agua como si fuera una esponja en el concreto fresco, impactando rotundamente en la relación agua/cemento y con ello en la durabilidad y resistencia que el concreto pueda desarrollar. Adicionalmente, cuando el agua absorbida se evapora en la mezcla endurecida, se incrementa la porosidad y permeabilidad, resultando en decremento de su resistencia mecánica (Joseph et al., 2015).

### **1.3.4 Presencia de Metales Pesados en Zonas Urbanas**

En las ciudades de los países industrializados, miles de partículas que contienen metales pesados son liberados al medio ambiente y depositados en superficies que conforman la mancha urbana (Aguilera et al., 2021). El polvo de carretera, es un importante indicador ambiental de la contaminación por metales pesados procedentes de la deposición atmosférica, que recibe aportes variables de metales procedentes de actividades antropogénicas (Suryawanshi et al., 2016).

En países de todo el mundo se han elaborado investigaciones que recolectan información sobre los niveles de concentración y las fuentes de contaminación por metales pesados. Suryawanshi et al. (2016) analizaron mediante espectroscopia de emisión atómica por plasma de acoplamiento inductivo el contenido de metales pesados presentes en muestras de polvo recolectada de en varios sitios de la ciudad de Delhi, India, encontrando que las muestras de polvo de camino en áreas urbanas contenían Cd, Cr, Cu, Ni y Pb en concentraciones promedio de 3.61 mg/kg, 299.5 mg/kg, 383.6 mg/kg, 49.9 mg/kg y 236.5 mg/kg, respectivamente.

En el caso de la Ciudad de México, con una población de 23.5 millones de habitantes y más de 4 millones de vehículos circulando a diario, se estima que más del 90% de su superficie está, por lo menos, moderadamente contaminada y se presentan en la superficie de sus calles concentraciones promedio de Cu, Ni, Pb y Zn de 99.7 mg/kg, 36.3 mg/kg, 128.2 mg/kg, 280.7 mg/kg, respectivamente (Aguilera et al., 2021). En la ciudad de Mexicali, en el estado de Baja California, México, se identificaron como los elementos más significativos el Zn y el Pb con concentraciones que oscilan entre 1 mg/kg y 15 mg/kg y 11 mg/kg a 25 mg/kg, respectivamente (Trejo Meza et al., 2013). En la ciudad de Santiago de Querétaro, en el estado de Querétaro, Díaz et al. (2013) encontraron, por metodologías semicuantitativas de bioindicadores, que la presencia de Cr, Pb, Zn y Mn tiene concentraciones importantes en la zona urbana de la ciudad, siendo el plomo el de mayor concentración debido a la densidad vehicular.

### **1.3.5 Uso del Concreto Permeable en la Remoción de Metales Pesados**

Haselbach et al. (2013) estudiaron si el concreto permeable es eficaz para eliminar zinc y cobre disueltos en agua. En su investigación, cilindros de concreto permeable fueron expuesto a una serie de escorrentías simuladas a concentraciones de 100 µg/l de Zn y 20 µg/l de Cu, simulando 10 eventos consecutivos para probar el rendimiento inicial de la remoción. Reportando que el concreto permeable tiene un porcentaje de remoción de Zn y Cu no menor de 88% en el primer evento, y un porcentaje no menor de 83% de remoción de Zn y Cu luego de ser expuesto a 10 eventos consecutivos. Además, observaron que la adsorción de dichos metales se debió a procesos físicos, como el atrapamiento de agua en los poros, y a procesos químicos como la sorción y el intercambio iónico.

Holmes et al. (2017) estudiaron el uso de ceniza volante con altos contenidos de carbono y azufre como material reactivo en el concreto permeable para la remediación de metales pesados (Cd, Pb y Zn) disueltos en agua. Al reemplazar el 25% del cemento Portland por ceniza volante con alto contenido de azufre y carbono en la mezcla de concreto permeable, obtuvieron resultados que sugieren que la ceniza volante le proporcionan una capacidad adicional al concreto permeable para remover plomo, cadmio y zinc.

Dentro de la literatura, Kim et al. (2017) investigaron la relación entre la reducción de nitrógeno y fósforo respecto a la utilización del cemento sulfoaluminato cálcico (CSAC) y un cemento Portland convencional, y la proporción de pasta de cemento y agregados en rangos desde 30% a 40%. Para ello Kim et al. (2017), llevaron a cabo pruebas de adsorción de nitrógeno y fósforo disuelto en solución, difracción de rayos-X (DRX) y prueba B.E.T (Brunauer, Emmett y Teller). Sus resultados indican que el CSAC proporciona una mayor resistencia a la compresión al concreto permeable en edades tempranas, el fósforo fue efectivamente removido de la solución por todas las mezclas de concreto. Además, los análisis de DRX indicaron la formación de fases del mineral hidroxiapatita en concreto con ambos cementos, lo que fomentó la reducción de la concentración del fósforo en la solución. Por último, en sus resultados señalan que las mezclas con CSAC presentaron una superficie específica mayor que aquellas mezclas con cemento Portland, razón por la cual se potencializó la adsorción de fósforo.

Chen et al. (2019) investigaron un concreto permeable a base de un geopolímero con metacaolín como barrera activa para la remoción de Pb y Cr. Sus resultados mostraron que el concreto permeable modificado con metacaolín tiene excelente capacidad de remoción, además, el análisis mediante difracción de rayos-X, indicaron que a una baja presencia de aluminosilicatos se mejora la capacidad del concreto para remover metales pesados en solución, debido a que se facilita la formación de natrolita en la matriz aglutinante, misma que a su vez promueve significativamente la adsorción de metales pesados. Por último, Chen et al. (2019) destacaron que al aumentar el volumen de vacíos, así como el coeficiente de permeabilidad, disminuye la capacidad para remover metales pesados del CP con metacaolín; comportamiento que se atribuye al tiempo de contacto entre la solución con concreto.

Otro estudio del uso del concreto permeable en pavimentos para el tratamiento de aguas, fue desarrollado por Rahman (2020), cuya investigación se centró en la remoción de metales pesados en el agua, mediante la infiltración de un caudal simulando los datos hidrológicos de la ciudad de Dhakata, Bangladesh, usando pavimentos a base de concreto permeables y 2 capas de malla de geotextil, encontrando que las concentraciones de Cu, Pb y Zn luego del tratamiento se redujeron en un 56%, 67% y 93% respectivamente, comparada con la concentración inicial.

Silva Juárez (2021) utilizó un concreto permeable a base de agregados basálticos para cuantificar sus propiedades de retención de contaminantes disueltos en agua tales como el arsénico (As), cadmio (Cd) y Zn. Como resultado de su trabajo se presentaron eficiencias de remoción de metales pesados de As, 55%-81%; Zn, 75%-96% y Cd, 50%-89%.

Adicionalmente, se ha reportado en la literatura que la eficiencia de remoción de metales pesados del CP está íntimamente condicionada por la concentración inicial del contaminante en la solución, siendo un factor experimental importante a analizar (Chen et al., 2019; Holmes et al., 2017; Silva et al., 2021)

## **1.4 Hipótesis**

**Hipótesis:** El uso de agregados de concreto reciclado, en sustitución del 100% de los AN, para la fabricación de concreto permeable, aumenta su capacidad para remover conjuntamente el Ni y Zn presentes en una solución infiltrada a través del concreto permeable, debido a las reacciones físico-químicas que se presentan entre los agregados del concreto y el cemento, con los contaminantes analizados; sin que esto reduzca la resistencia a la compresión del concreto.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Determinar la eficacia de remoción simultánea de zinc y níquel en solución, así como su efecto en la resistencia a compresión del concreto permeable fabricado con el 100% de ACR después de su filtración, variando la concentración de dichos contaminantes, medido a través del análisis químico de la solución resultante del filtrado y por la prueba de resistencia a la compresión de los especímenes de concreto después de los diez eventos de filtrado.

### **1.5.2 Objetivos particulares**

- Evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados del concreto permeable con ACR, para cada una de las condiciones de concentración de Zn y Ni obtenidas mediante el diseño estadístico del experimento.
- Proponer un modelo de cinética de remoción para describir la relación de la concentración de Zn y Ni con la cantidad de eventos de filtrado de la solución contaminada a la que es sometido el concreto permeable con ACR.
- Determinar el efecto que tiene la acción del Zn y Ni sobre la resistencia del concreto permeable con AN y ACR después de los diez eventos de filtrado de la solución de contaminantes, medida a través de ensayos de compresión simple.

- Determinar los costos asociados a la fabricación de concreto permeable considerando el uso del 100% de agregados reciclados provenientes de la construcción y demolición de elementos de concreto

### Marco teórico

#### 2.1 Sostenibilidad y Desarrollo

El concepto de “desarrollo sustentable” fue definido por la *World Commission on Environment and Development (WCED)* en el reporte llamado *Our common future* (nuestro futuro común) en 1987, en cual se define al desarrollo sustentable como “desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”, definición que marco las pautas del contenido y la estructura del debate actual acerca de la conservación del medio ambiente (Mebratu, 1998).

Posteriormente, en 1991 la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), la *United Nations Environmental Programme (UNEP)* y *World Wide Fund for Nature (WWF)* establecieron los nueve principios de una sociedad sostenible, los cuales son (Yip Robin & Poon, 2009):

1. Respeto y cuidado por la comunidad de vida.
2. Mejorar la calidad de la vida humana.
3. Conservar la vitalidad y diversidad de la tierra.
4. Maximizar la reducción de los recursos no renovables.
5. Obtener capacidad para el cuidado de la tierra.
6. Cambiar actitudes y prácticas.
7. Establecer comunidades para el cuidado de sus propios ambientes.
8. Proveer de una red de trabajo para la integración del desarrollo y la conservación.
9. Crear una alianza global.

El desarrollo sostenible es una búsqueda continua para el futuro desarrollo de la sociedad humana. Los cambios en una cultura sustentable son reflejos del nivel de sustentabilidad en una sociedad, las mediciones de estos cambios dan información preponderante para la toma de decisiones en los gobiernos y en el sector privado (Yip Robin & Poon, 2009).

Por las razones antes mencionadas, el desarrollo sustentable debe estar involucrado y formar parte en la toma de decisiones a diferentes niveles. En la industria de la construcción se busca la conceptualización de la “Construcción Sostenible”, el cual definida por Kibert en 1994, significa minimizar el consumo de recursos básicos (energía, agua, materiales y suelo) a través del ciclo de vida de la construcción (Arredondo Rea, 2011).

Actualmente, los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) decretados por la ONU establecen un marco institucional para que el público en general se comprometa con las problemáticas ambientales, culturales, económicas, políticas y poblacionales que afectan a nuestro planeta (Muñoz Celis, 2019). De manera que se evidencia que la ingeniería civil debe generar proyectos que vayan acorde al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, dentro de los cuales se pueden destacar aquellos en los que la ingeniería civil juega un papel más relevante, por ejemplo, el ODS no. 6 “agua limpia y saneamiento”, ODS no.9 “industria, innovación e infraestructura” y ODS no. 11 “ciudades y comunidades sostenibles”. Por consiguiente, la ingeniería civil debe estar a la vanguardia en la utilización de materiales más ecológicos, prácticas de construcción amigables con el medio ambiente y desarrollo de proyectos que aumenten el bienestar social (Muñoz Celis, 2019).

## **2.2 Concreto Permeable**

De acuerdo con la ACI-522R el concreto permeable es un término que se utiliza para describir a un material endurecido a base de cemento Portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua, cuyos poros conectados entre sí, generan una estructura abierta y un revenimiento cero; el tamaño de los poros va de 2 mm a 8 mm.

El concreto permeable es un material beneficioso para la reducción del volumen total de la escorrentía a través de su porosidad, que, de otro modo, llevaría cantidades importantes de contaminantes a ríos, arroyos, mares y cuerpos de agua (Silva et al., 2021). El concreto permeable mitiga la contaminación de primera descarga, ya que alrededor de un 90% de los contaminantes presentes en la escorrentía son retenidos en los poros de un concreto permeable convencional, debido a su tamaño superior a 25 mm (ACI, 2010).

No obstante, el concreto permeable presenta algunas desventajas y retos para su implementación, dentro de los que se destacan (ACI, 2010):

- Uso limitado en áreas de poco tráfico de vehículos pesados.
- Mano de obra especializada para su construcción.
- Control sensible al contenido de agua de la mezcla.
- Tiempo de curado prolongado.
- Atención especial en su diseño.

### 2.2.1 Contenido de Vacíos para Concreto Permeable Endurecido

La capacidad de infiltración del concreto permeable es directamente proporcional a su porosidad; es decir, a mayor porcentaje de vacíos, mayor capacidad de infiltración. Por lo tanto, el concreto permeable mejora sus capacidades hidráulicas al poseer mayor porcentaje de vacíos, (Cervantes Cárdenas, 2020). Dicho porcentaje de vacíos se puede calcular a partir de la ecuación 1.

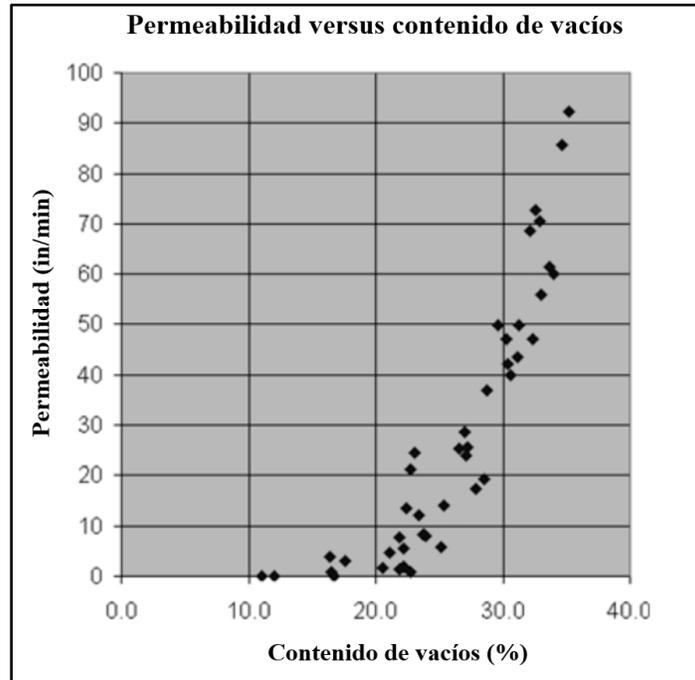
$$\text{Contenido de Vacios (\%)} = \left[ 1 - \left( \frac{A-B}{\rho_w D^2 L} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

Donde  $A$ : Masa en seco de la probeta (g).  $B$ : Masa sumergida de la probeta (g).  $D$ : Longitud promedio de la probeta (mm).  $L$ : Longitud promedio de la probeta (mm).  $\rho_w$ : Densidad del agua a temperatura ambiente ( $\text{kg/m}^3$ ).

### 2.2.2 Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad que presenta un material para permitir el paso de agua, esta propiedad se mide mediante el coeficiente de permeabilidad definido como la velocidad de la conductividad hidráulica, es decir, que tan rápido el material en cuestión permite el paso del agua a través de él. En el concreto permeable, la permeabilidad es una característica distintiva, la cual varía de forma directamente proporcional con su porosidad; es decir, a

mayor porcentaje de vacíos, mayor coeficiente de permeabilidad, tal como se muestra en la Figura 1. A su vez la porosidad de la mezcla se ve afectada por el tamaño máximo nominal del agregado (ACI, 2010; Cervantes Cárdenas, 2020).



*Figura 1.-Relación entre el contenido de vacíos y la permeabilidad del concreto permeable.*

Fuente: Adaptada de (ACI, 2010).

Según sea el caso de aplicación del concreto permeable, el diseño de mezcla puede estar regido por las solicitudes de permeabilidad necesaria del concreto permeable, posteriormente se determina el porcentaje de vacíos previsto con ayuda de la Figura 1 y se prosigue con la determinación del proporcionamiento de la mezcla.

### **2.3 Resistencia a la Compresión del Concreto**

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica más común de desempeño de un concreto, por ello, es la base fundamental del diseño de mezclas. Se puede definir como la capacidad que tiene el concreto para resistir una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, es decir, en  $\text{kg/cm}^2$ , MPa y en psi (IMCYC, 2006). La

resistencia a compresión del espécimen resulta de la división de la carga máxima obtenida durante el ensayo entre el área transversal del espécimen de concreto. El método de ensayo según el procedimiento ASTM C39 consiste en la aplicación de una carga de compresión uniaxial a cilindros de concreto de 150 mm x 300 mm o 100 mm x 200 mm de diámetro y longitud, respectivamente, a una velocidad de carga especificada ( $0.25 \text{ MPa/s} \pm 0.05 \text{ MPa/s}$ ).

En la mayoría de las normatividades de los países, la edad en la que se ensayan los especímenes, posterior a su curado, para determinar la resistencia mecánica del concreto es a los 28 días (IMCYC, 2006). En México, la norma técnica NMX-C-083-ONNCCE, establece que los especímenes para aceptación o rechazo deben ensayarse a la edad de  $14 \text{ d} \pm 14 \text{ h}$ , para aquellos concreto de resistencia rápida, o  $28 \text{ d} \pm 24 \text{ h}$  para concreto normal.

## **2.4 Metales Pesados**

Dentro de la tabla periódica algunos metales se llaman pesados, debido a que su número atómico es superior a 20 o bien su densidad es mayor a 5 g/ml, a excepción de los metales alcalinos y alcalino-térreos (Navarro Aviñó y Alonso, 2007). Dado que su presencia en la corteza terrestre es inferior a 0.1% y en la mayoría de los casos menor del 0.01%, también se les conoce como metales traza (Navarro Aviñó y Alonso, 2007).

Existen metales pesados que son esenciales para el debido funcionamiento de los organismos, requiriendo de estos en cantidades traza, pero a concentraciones elevadas o en otras formas químicas resultan tóxicas para los organismos (Calva y Torres, 2003). La Asociación Oficial de Control de Alimentos de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés AAFCO, 1996) cataloga como metales pesados al arsénico (As), aluminio (Al), cromo (Cr), cadmio (Cd), hierro (Fe), mercurio (Hg), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (V) y zinc (Zn); de los cuales los elementos tóxicos a destacar por su efecto nocivo sobre los sistemas biológicos en el agua son el As, Cd, Cr, Hg, Pb, Zn y Ni (Calva y Torres, 2007).

## **2.4.1 Fuentes de Emisión de Metales Pesados**

### **2.4.1.1 Fuentes Naturales**

La producción de metales por fuentes naturales en la biosfera, se da principalmente resultado de fenómenos geológicos como las erupciones volcánicas, además de otros fenómenos como las tormentas de arena, las tolvaneras en lugares propensos a la erosión, incendios forestales de bosques que emiten ciertas cantidades de metales, evaporación de aguas de superficies naturales y la descomposición de la materia orgánica en el suelo debida a la acción de las bacterias (Calva y Torres, 2003; Díaz et al., 2013).

### **2.4.1.2 Fuentes Antropogénicas**

La presencia de metales pesados tóxicos en el ambiente está relacionada en gran medida con fuentes antropogénicas, como la industria metalúrgica, la minería, la fabricación de productos químicos, las refinerías, la producción de plástico, la industria de la construcción entre otras actividades humanas. La complejidad del problema de la contaminación ambiental por metales pesados radica en diversos factores, siendo los principales la cantidad y la variedad de las fuentes que los emiten (Díaz et al., 2013; Mubarak et al., 2014).

Específicamente en los sistemas acuáticos, los metales pueden ingresar a través del vertido directo intencional o accidental de aguas residuales, así como por su infiltración al subsuelo contaminando los mantos subterráneos (Calva & Torres, 2003). Entre los efluentes principales se encuentran los de la extracción minera, refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de corrosiones, tanto industriales como vehiculares. En zonas de estacionamientos y vialidades, la presencia de metales pesados aportados por los vehículos se debe a la combustión y fugas de combustibles, corrosión de carrocerías, desgaste de neumáticos y frenos y accidentes vehiculares (Mejía et al., 2013).

Adicionalmente la superficie de rodamiento de las carreteras constituye una fuente importante de contaminantes, el asfalto por ejemplo, cuya composición estándar de materiales pétreos es del 90% y un 5% de materiales bituminosos; los materiales asfálticos

contienen hidrocarburos, metales traza, como el vanadio (V), hierro (Fe), níquel, magnesio (Mg) , y calcio (Ca) (Mangani et al., 2004).

#### **2.4.2 Efectos de los Metales Pesados en el Ambiente y su Toxicidad en los Seres Vivos**

Debido a la acelerada industrialización y urbanización, cerca de la mitad de la población mundial vive hoy en día en asentamientos urbanos. La aglomeración de una gran cantidad de personas en un lugar, provoca un incremento en la cantidad de contaminantes en el ambiente, en consecuencia, han surgido diversos problemas medio ambientales y la contaminación por metales pesados se ha convertido en un problema importante (Suryawanshi et al., 2016).

El tránsito de vehículos, actividades como la construcción o demolición y la quema de combustibles fósiles contribuyen en gran medida a la generación de contaminantes por metales pesados en la escorrentía en zonas urbanas sobre las superficies que constituyen nuestras vialidades, lo que genera la contaminación de cuencas acuíferas debido al escurrimiento superficial, dicho escurrimiento se llega a verter directamente en ríos, arroyos, lagos y mares, produciendo importantes daños ecológicos y de salud pública (Mandour, 2021). Los principales contaminantes de preocupación en tal escorrentía son los metales pesados (Pb, Zn, Cu, Cd) que son generados por los vehículos debido a la abrasión de neumáticos, revestimiento de frenos, corrosión de carrocerías y la combustión de combustibles y lubricantes (Chen et al., 2019; Silva-Juarez et al., 2021).

Un eje principal de daño a los ecosistemas es la contaminación del agua, la cual, de forma general, se define como la modificación de sus características naturales causada directa o indirectamente por las acciones del ser humano. La contaminación del agua provoca que la misma se vuelva peligrosa tanto para su consumo como para uso en general, ya sea a nivel personal o industrial. El agua contaminada también resulta peligrosa para el resto de las especies de animales y para las plantas y prácticamente todas las formas de vida que dependen de ella (Orta Resendiz et al., 2015). Uno de los principales contaminantes en los cuerpos de agua son la presencia de metales pesados, ya que no son biodegradables y pueden

llegar a estar presentes en la cadena alimenticia y, por lo tanto, representan un problema importante de salud pública para los seres humanos (Ammar et al., 2015).

Una vez que los metales pesados entran en un ecosistema, comienza una serie de afectaciones en el entorno, debido a sus posibles rutas de acción. Una vez en el medio, los metales pesados se pueden ligar a compuestos orgánicos con otros aniones, precipitarse como minerales, también se pueden volatilizar siendo liberados a la atmósfera, o ser adsorbidos sobre las superficies y el suelo para ser luego asimilados por la vegetación y por lo tanto entrando a la cadena trófica (Pabón et al., 2020). Cuando los metaloides son precipitados e infiltrados en el suelo los contaminantes se pueden infiltrar a los ríos y cuerpos de aguas del subsuelo, lo que implica que los metales serán transportados hacia otros ecosistemas, repitiendo el proceso indefinidamente (Pabón et al., 2020).

En México, los metales pesados como el arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc se consideran como contaminantes en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (Ávila García et al., 2018). Una vez presentes en el agua no pueden ser degradados mediante procesos biológicos ni antropogénicamente (Pabón et al., 2020). Los metales pesados son uno de los principales contaminantes que modifican la calidad natural de las corrientes de agua, afectando la flora y fauna además de comprometer el abastecimiento de agua para uso y consumo humano (Zarazúa et al., 2013). Con el fin de preservar la calidad del agua en los sistemas en México, la norma oficial NOM-127-SSA1-1994 establece los límites permisibles de la calidad del agua para uso y de consumo humano, de los cuales en la Tabla 2 se presentan los límites máximos permisibles de las concentraciones totales de metales y metaloides en el agua.

*Tabla 2.-Límites Máximos Permisibles Para Metales Pesados.*

<i>Parámetros</i>	<i>Límite permisible (mg/l)</i>
Aluminio	0.2
Arsénico	0.05
Bario	0.7
Cadmio	0.005
Cobre	2

Cromo total	0.05
Hierro	0.3
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Níquel	0.07
Plomo	0.025
Zinc	5

---

En la base de datos de monitoreo de agua superficial de la Comisión Nacional del Agua, de los 6,027 cuerpos de agua superficiales de los que se tienen registro, 5,984 de ellos rebasan en al menos un 50% los límites permitidos de la concentración de alguno de los metales pesados tales como As, Cd, Cr, Mg, Ni y Pb (Flores-Díaz, 2020). Los ríos y arroyos son la fuente principal de agua para uso y consumo humano en muchas localidades rurales y urbanas, las concentraciones excesivas de contaminantes comprometen la calidad hídrica de estos bancos de agua y con ella la salud de las personas.

Debido a la elevada toxicidad que presentan los metales pesados para los seres humanos y animales, dependiendo del tipo de metal o metaloide, se producen afecciones que van desde daños en órganos vitales hasta desarrollos cancerígenos (Reyes et al., 2016). La toxicidad de los iones metálicos en el agua causa severos padecimientos a los seres humanos, tales como, daños al sistema nervioso, insuficiencia renal, cáncer, retraso mental y anemia (Mubarak et al., 2014).

## **2.5 Mecanismos de Remoción de Metales Pesados en el Concreto Permeable**

El grado de remediación que una barrera permeable reactiva puede llegar a tener, está condicionada por el tipo de material utilizado y el contaminante en cuestión. Los mecanismos por los que una barrera permeable reactiva puede degradar un contaminante, son por el contacto físico, procesos químicos y biodegradación (Chen et al., 2019; Shabalala et al., 2017). En la actualidad, la mayoría de los sistemas utilizados en la remediación del agua por metales pesados están diseñados para promover la oxidación de los metales, lo que reduce su

toxicidad, o bien, para absorber activamente los contaminantes a fin de ser adheridos a una superficie (Holmes et al., 2017).

El concreto permeable convencional funciona como barrera reactiva ante contaminación por metales pesados disueltos en agua; ya que tiene la capacidad de removerlos mediante mecanismos similares a otros sistemas tradicionales de filtración; sorción, precipitación, difusión y formación de enlaces químicos (Mahedi et al., 2020). Su eficiencia de remoción está en función de su porcentaje de vacíos, tipo de cementante, el pH de la solución de poro y el área superficial disponible para alojar partículas de metales pesados por adsorción (Chen et al., 2019; Holmes et al., 2017; Kim et al., 2017; Shabalala et al., 2017).

### **2.5.1 Adsorción**

La adsorción es una técnica utilizada para la remoción de una gran variedad de contaminantes debido a su alta capacidad de remoción, cinética rápida y su selectividad. Es un método de conversión de masa en el cual las partículas presentes en el adsorbato son transferidos por interacciones químicas o físicas hacia los sitios activos del adsorbente utilizado (Pabón et al., 2020).

La adsorción es un fenómeno superficial el cual consiste en la retención de moléculas de un fluido (adsorbato) sobre una superficie en contacto con él (adsorbente). Es un proceso dinámico en el que se produce un choque y retención de las moléculas del fluido sobre la superficie adsorbente. Es común que este proceso se dé entre una superficie adsorbente sólida y un gas o un líquido (Iranzo, 2015). La sustancia que adsorbe se denomina adsorbato y el material sobre él que lo hace es el adsorbente. La superficie adsorbente dispone de poros, a los que se le conocen como centros activos. Estos centros activos admiten que se instalen moléculas provenientes del adsorbato en su superficie, permitiendo así su retención. La adsorción es un proceso exotérmico y se da de manera espontánea, siempre y cuando el adsorbente no se encuentre saturado (A. L. Myers, 2004). En general se distinguen dos tipos principales de adsorción: la adsorción física, también llamada fisioadsorción, y la adsorción química o quimoadsorción.

En la fisioadsorción, la unión entre átomos y moléculas a las superficies se produce por la interacción de fuerzas de Van Der Waals entre el adsorbato y el adsorbente, de donde, estas interacciones son de largo alcance y débiles (P. Atkins, 2016); de manera que esa energía es absorbida y disipada en forma de calor, de tal forma, que la partícula va rebotando sobre la superficie y pierde gradualmente su energía y finalmente es absorbida por un proceso de acomodación. En este proceso las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y la temperatura de adsorción es baja (P. Atkins, 2016).

Por otro lado, si las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie del adsorbente, se da un fenómeno de adsorción química. En la quimioadsorción, las moléculas y átomos se unen a las superficies formando un enlace químico, por lo general un enlace covalente; la formación de estos enlaces hace que el proceso de adsorción sea más selectivo, en otras palabras, que dependa estrechamente de la naturaleza de las sustancias involucradas. Bajo este fenómeno se rompen y se forman enlaces, por lo cual se genera valores de calor muy superiores a los de la fisioadsorción. Cabe destacar que la adsorción química no genera más de una monocapa en la superficie (Castellan, 1987; P. Atkins, 2016; Tubert & Talanquer, 2018).

La cantidad de material que se logra retener depende del equilibrio dinámico, el cual se define como un estado en el cual la relación entre concentración del adsorbato respecto a la cantidad de adsorbente permanece constante. Cuanto mayor sea la fracción disponible de la superficie, es decir, mayor número de centros activos, mayor será la tasa de adsorción (A. L. Myers, 2004; P. Atkins, 2016). La extensión de superficie cubierta se expresa mediante la fracción de recubrimiento ( $\theta$ ) y se puede calcular con la ecuación 2.

$$\theta = \frac{\text{número de centros activos ocupados}}{\text{número de centros activos disponibles}} \quad (2)$$

Por lo anterior, la velocidad de adsorción,  $d\theta/dt$ , es la velocidad de variación del recubrimiento superficial, que se determina midiendo la variación del recubrimiento en el tiempo (P. Atkins, 2016).

### **2.5.2 Superficie Específica**

Es una propiedad de los sólidos la cual relaciona la sumatoria de la superficie expuesta de un sólido o de todas las partículas de un material conglomerado con su masa, por lo cual se expresa en metros cuadrados por gramo ( $m^2/g$ ) (Rodríguez, 2019).

Se sabe que una superficie específica grande es favorable para el fenómeno de adsorción, es decir, a mayor superficie específica, mayor capacidad de adsorción (Holmes et al., 2017). La gran superficie específica del concreto permeable, junto con el tortuoso camino que forma la microestructura de sus poros al paso del agua, generan las condiciones para que se den reacciones de fisioadsorción y quimioadsorción (Holmes et al., 2017; Kim et al., 2017). En la literatura se asume que en aquellas soluciones con un pH adecuado (dependiendo del metal) y un absorbente con gran superficie específica (como lo son los ACR) se fomenta la adsorción/precipitación de los iones de metales pesados (Mahedi et al., 2020; Shabalala et al., 2017). En los ACR, el tamaño de las partículas juega un rol fundamental en la alcalinidad de una solución y en la superficie específica disponible. Los ACR con menor tamaño obtienen porcentajes de remoción de metales más altos, por presentar mayor superficie específica en relación a su masa, que aquellas partículas de mayor tamaño (Mahedi et al., 2020). En soluciones con Zn, a pH superiores a 10, el mecanismo de remoción predominante utilizando ACR es por adsorción (Mahedi et al., 2020).

### **2.5.3 Adsorción Química e Intercambio Iónico**

La remoción de metales pesados por parte del concreto permeable está dada principalmente por procesos químicos relacionados con la precipitación, la formación de hidróxidos y el aumento del pH de la solución que contiene a los contaminantes (Holmes et al., 2017; Mahedi et al., 2020; Shabalala et al., 2017). En términos generales, los filtros a base de cemento Portland, crean condiciones reductoras en la solución al aumentar el pH, lo que reduce la solubilidad de los metales pesados y con ello su precipitación. La Portlandita ( $Ca(OH)_2$ ) es un mineral que surge de la hidratación de los silicatos bicálcico y tricálcico presentes en el cemento Portland y se considera que es el encargado de reducir la corrosión del concreto debido a que presenta un pH muy alcalino (alrededor de 13). La Portlandita genera calcio

coloidal para reaccionar y unirse a los metales pesados generando hidróxidos y aumenta a su vez el pH de la solución de poro. La insolubilidad de los metales pesados se da en un rango de pH elevado de 9-12 (Holmes et al., 2017).

Los ACR por sí mismos, son un proveedor importante de óxidos de calcio, más del 37% de su peso está compuesto por óxidos de calcio, derivado de la Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente en el concreto viejo dentro de sus partículas. El óxido de calcio, es responsable de neutralizar los protones libres alcalinizando el pH de la solución de poro (Mahedi et al., 2020).

Es bien sabido que la composición química del cemento Portland tiene como componentes principales el silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) y el ferritoaluminato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), siendo los  $\text{C}_2\text{S}$  y  $\text{C}_3\text{S}$  los responsables de conferir al concreto su resistencia mecánica (Shabalala et al., 2017). De acuerdo con las ecuaciones 3 y 4, cuando el  $\text{C}_2\text{S}$  y  $\text{C}_3\text{S}$  reaccionan con el agua, en un proceso llamado hidratación, se forman hidróxidos de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y silicatos de calcio hidratados ( $\text{C-S-H}$ :  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) como productos principales. El hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) es el responsable de aumentar el pH del concreto (típicamente de 12 a 13) (Shabalala et al., 2017).

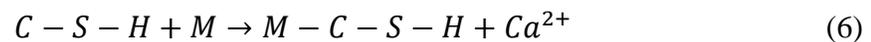
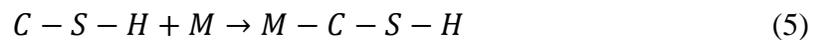


La disponibilidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  altamente alcalino en la pasta cementante, material aglutinante, recubrimiento de superficie de los áridos y revestimiento de los poros, permite la remediación del agua contaminada por metales pesados, a medida que el agua fluye a través de la red de poros interconectados del concreto permeable, debido a los procesos hidroquímicos cuando el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  suministra los iones  $\text{OH}^-$  que se combinan con los metales, formando de esta manera sus hidróxidos metálicos (Mahedi et al., 2020; Shabalala et al., 2017).

Como resultado de este proceso, el concreto permeable tiene la capacidad de retener el zinc, presente en el agua contaminada, al precipitarlo como hidróxido de  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  a valores de pH neutros. Asimismo, el concreto permeable reduce la concentración de níquel, ya que es

adsorbido fácilmente sobre la calcita en soluciones con pH entre 8 y 9 (Mahedi et al., 2020; Shabalala et al., 2017).

Otro mecanismo de intercambio iónico que se ha propuesto, con el que se logra la inmovilización de un ion metálico en el concreto permeable, es por los mecanismos de adición o de sustitución. En este caso, el silicato de calcio hidratado (C-S-H) procedente de la hidratación del cemento Portland, en presencia de metales pesados, reacciona con los iones metálicos para su agregación, tal como muestra la ecuación 5, dentro de la molécula o su sustitución por el calcio, como se indica en la ecuación 6 (Romero Esquivel et al., 2007).



## 2.6 Cinética de Adsorción

La cinética de adsorción es un estudio que se encarga de describir y determinar la velocidad con la que el adsorbato es atrapado por el adsorbente, la remoción de iones metálicos en la solución, dependerá del tipo de interacción que tenga el contaminante con el agente adsorbente (Pinzón-Bedoya & Villamizar, 2009; Salgado, 2011).

El conocimiento de la cinética de adsorción permite conocer el tiempo de residencia de un contaminante en la interfaz sólido-líquido o sólido-gas, su velocidad en la cual es retenido, además permite conocer los mecanismos en los cuales los iones metálicos interactúan con los sitios activos asociados a la matriz adsorbente, indicando la evolución de cada una de las etapas por las que la adsorción se lleva a cabo y cuáles de estos mecanismos predominan y controlan el proceso (Pinzón-Bedoya & Villamizar, 2009).

Es por ello que se han propuesto modelos matemáticos empíricos, que se utilizan para determinar aquellos parámetros que mejor describan la cinética de adsorción.

### 2.6.1 Modelo Cinético de Pseudo Primer Orden o Ecuación de Lagergren

El modelo de pseudo primer orden, de primer orden reversible o ecuación de Lagergren, fue propuesto por el mismo Lagergren S. en 1898, y fue la primera ecuación de velocidad para la descripción de un sistema de adsorción en un líquido basado en la capacidad adsorbente de un sólido (Castro et al., 2014). El modelo consiste en una ecuación que se fundamenta en una reacción superficial expresada en la ecuación 7.

$$\frac{dq_t}{dt} = K_L(q_e - q_t) \quad (7)$$

Donde:  $K_L$ = constante de velocidad de adsorción de Lagergren ( $\text{min}^{-1}$ ),  $t$ = tiempo (min),  $q_e$ = concentración en el equilibrio (mg/g),  $q_t$ = concentración del adsorbato en el adsorbente a un tiempo dado (mg/g).

La ecuación se basa en la suposición de que cada ion metálico se deposita en un solo centro activo del material adsorbente (Pinzón-Bedoya y Villamizar, 2009). Como resultado de la integración de la ecuación 7, entre los límites  $t=0, t=t, q_t=0, q_t=q_t$ , el modelo queda representado por la ecuación 8.

$$q_t = q_e(1 - e^{(-K_L t)}) \quad (8)$$

### 2.6.2 Modelo Cinético de Pseudo Segundo Orden

El modelo de pseudo segundo orden fue propuesto por Ho y Mckay, publicado en 1999. En esta representación matemática se asume que ion metálico se adsorbe en dos centros activos del sólido. La cinética de pseudo segundo orden es una ecuación modificada a partir de la ecuación de Lagergren, cuya velocidad de la cinética de adsorción queda representada como se expresa en la ecuación 9 (Pinzón-Bedoya y Villamizar, 2009; Salgado, 2011; Castro et al., 2014).

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad (9)$$

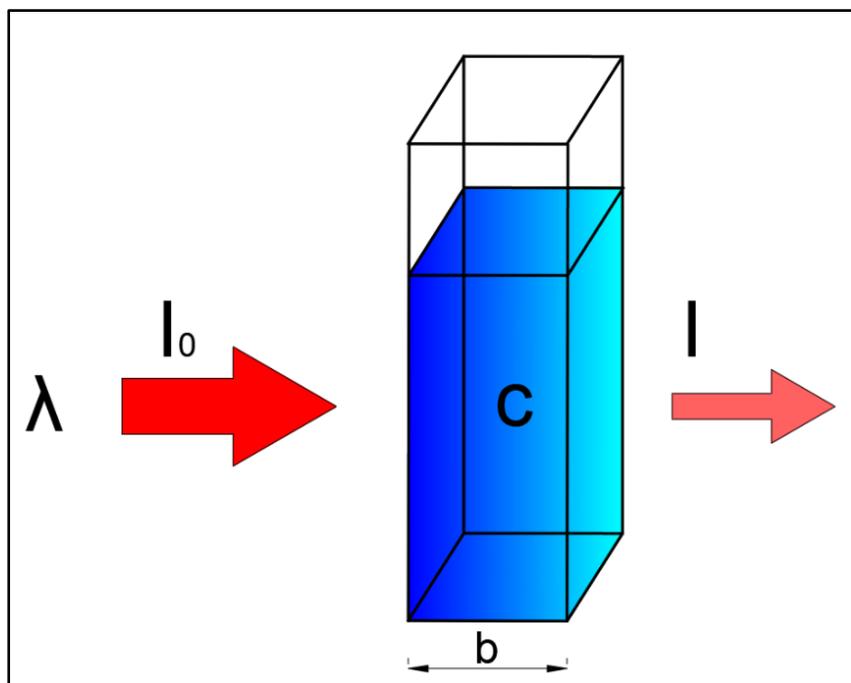
Al integrar la ecuación 9, manteniendo de igual manera las constantes y las condiciones de contorno de la ecuación de primer orden para el modelo anterior, la cinética queda expresada conforme a la ecuación 10.

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (10)$$

Donde:  $K_2$  = constante de pseudo segundo orden.

## 2.7 Espectrofotometría de Absorción Atómica

La espectrofotometría de absorción atómica (EAA) es un método de análisis instrumental, que determina la concentración de una gran variedad de elementos dentro de una solución, principalmente metales. La medición de interés de esta técnica es la cantidad de luz en la longitud de onda resonante que se absorbe cuando la luz atraviesa una nube de átomos en la trayectoria de la luz. La cantidad de luz absorbida aumenta de forma predecible, por lo tanto, al medir la cantidad de luz absorbida, se puede realizar la determinación cuantitativa de la cantidad de cada elemento presente en la solución. Las distintas fuentes de luz, así como su determinada selección de longitud de onda, permiten la cuantificación específica de elementos individuales en presencia de otros (Beaty y Kerber, 1993), la Figura 2 muestra el diagrama que describe la ley de Lambert-Beer.



*Figura 2.-Celda de longitud "b" que contiene la muestra absorbente "c" con una concentración de masa "γ" de la especie absorbente, donde se hace incidir la radiación de longitud de onda "λ", con intensidad "I₀", para obtener en la salida la radiación transmitida.*

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la medición de concentración de la masa se basa en la ley de Lambert y Beer, la cual especifica que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de masa de la especie que absorbe para las condiciones instrumentales preestablecidas. En las ecuaciones 11 y 12 se muestra las expresiones matemáticas que describe la Ley de Lambert y Beer (Beaty y Kerber, 1993; CENAM, 2012):

$$\alpha = ab\gamma \quad (11)$$

$$\alpha = \log (I_0/I) \quad (12)$$

Donde  $\alpha$ : absorbancia de elemento a medir,  $a$ : coeficiente de absortividad,  $b$ : longitud del paso óptico,  $\gamma$ : concentración de masa de la especie que absorbe,  $I_0$ : radiación incidente e  $I$ : radiación transmitida.

## Metodología

La metodología se puede resumir en el diagrama de flujo como se muestra en la Figura 3, en el cual se consideran 2 vertientes principales: la elaboración, diseño y caracterización de la mezcla de concreto permeable, así como de sus agregados, ya sea de ACR o AN y, por otro lado, las pruebas de retención de metales pesados con ACR, AN y su capacidad para remover el contaminante respecto al número de eventos.

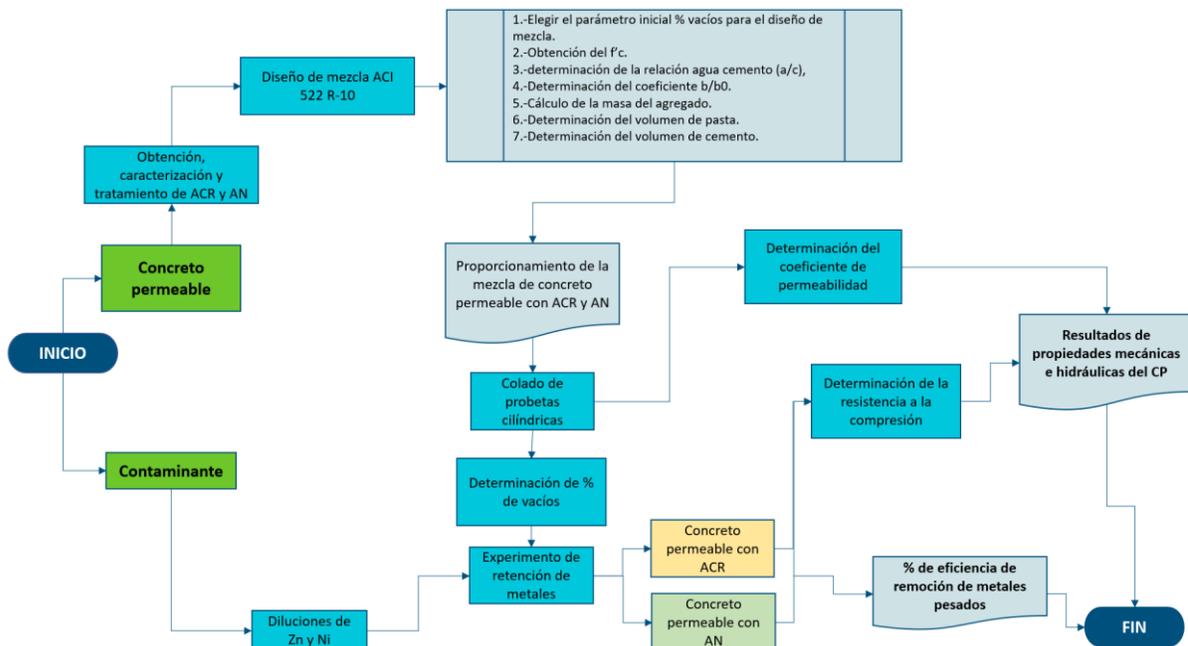


Figura 3.-Diagrama de flujo general de la experimentación.

En términos generales, el experimento consistió en la fabricación de especímenes cilíndricos de concreto permeable con ACR, para ser utilizados como filtros en la remoción de los metales pesados Zn y Ni en solución; misma que pasa a través de los especímenes, para posteriormente ser recolectada y analizada para medir el porcentaje de remoción de estos metales. La metodología se llevó a cabo en el laboratorio de Geotecnia Ambiental y el en

Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería campus Centro Universitario de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### 3.1 Caracterización de ACR

#### 3.1.1 Obtención de Residuos de Construcción y Demolición como Agregado Grueso

Se utilizó como agregado grueso, residuos de concreto reciclado, mismos que fueron procesados a partir de los desechos generados por las prácticas realizadas en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la UAQ. Del área de escombros del laboratorio de materiales, se dispusieron de elementos de concreto con dimensiones no mayores a 20 cm de diámetro (Figura 4 a)). Se procedió a la trituración de los elementos de concreto en una trituradora de mandíbula (Figura 4 b)), ajustando la abertura de la mandíbula para generar partículas con dimensiones inferiores a 1 pulgada. Para completar con la experimentación se trituraron aproximadamente 150 kg de concreto desechado para obtener los agregados requeridos para la fabricación de los especímenes de concreto permeable.

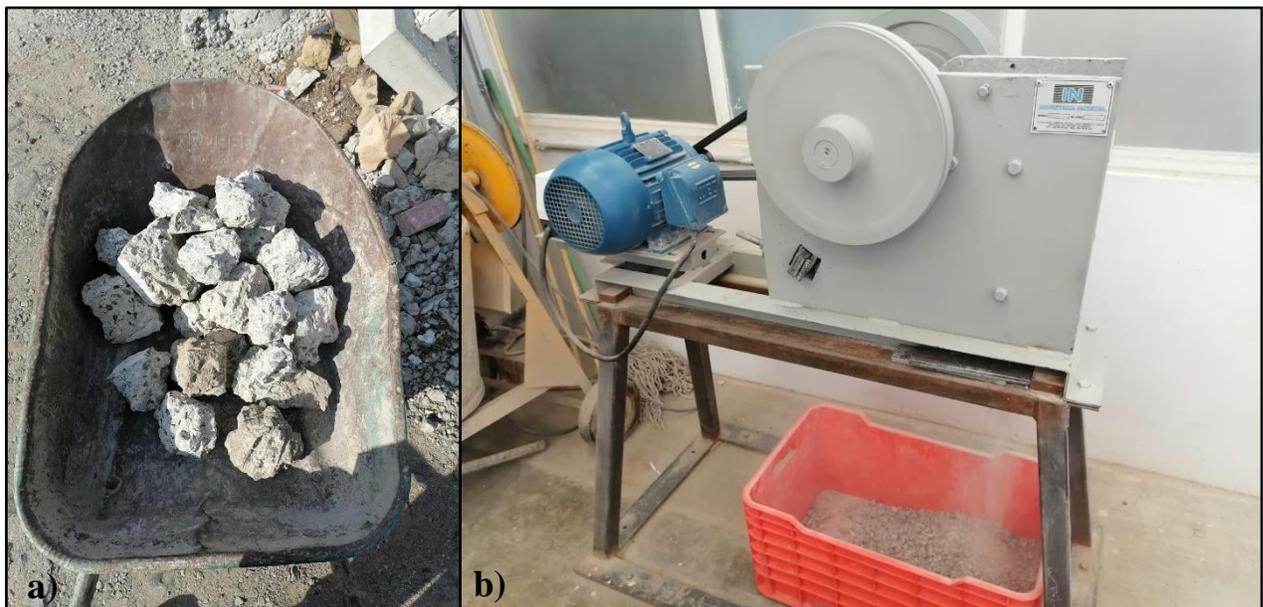
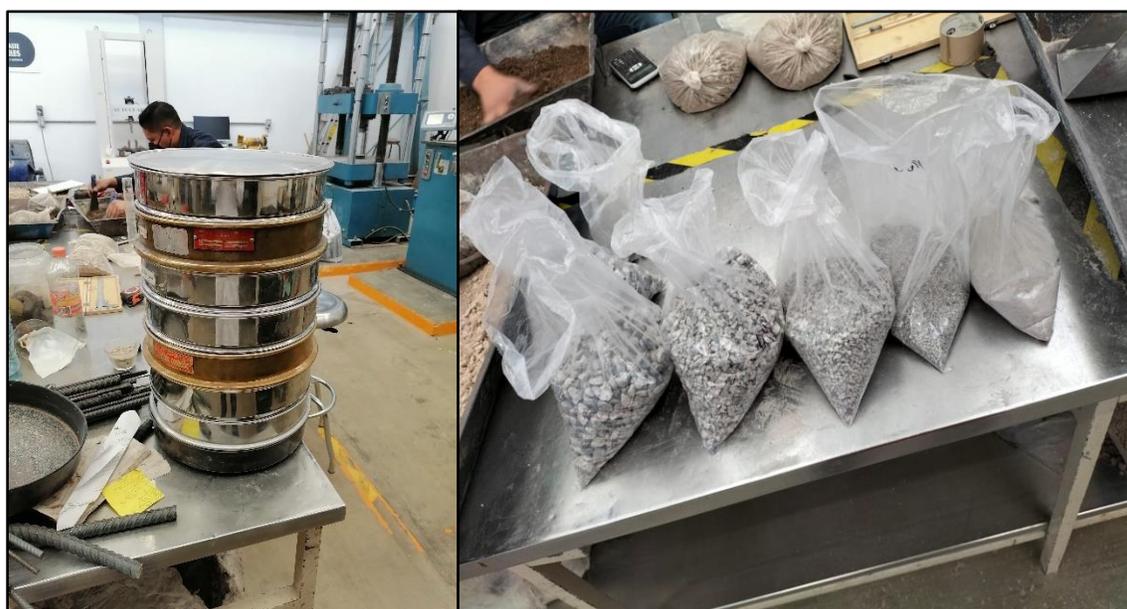


Figura 4.-a) Recuperación y b) trituración de escombros de concreto para obtener los ACR.

### 3.1.2 Granulometría

Se realizó el análisis granulométrico de una muestra representativa del material triturado con una masa de 8.77 kg conforme a la norma técnica NMX-C-077-ONNCCE 2004, para agregado grueso, previamente cuarteada según lo dispuesto en la norma NMX-C-030-ONNCCE 2004. Se dejó secando la muestra durante 24 h en un horno a  $110 \pm ^\circ\text{C}$ , se midió la masa inicial de la muestra y se procedió a hacer el cribado del agregado por las mallas desde la de 4 in hasta la No. 16, registrando la masa retenida en cada una de las mallas (Figura 5). Con los datos obtenidos se elaboró la curva granulométrica, que indica el porcentaje acumulado en cada una de las mallas vs el tamaño de partícula retenida.



*Figura 5.- Análisis granulométrico por tamizado.*

### 3.1.3 Densidad y Absorción

El cálculo de la densidad y la absorción, tanto del agregado natural como para el agregado de concreto reciclado, se realizó mediante el método de prueba estándar ASTM C 127-07. Se cuarteo el contenido de un costal con agregado obteniendo una muestra previamente lavada (sin finos mediante lavado sobre la malla No. 200). Se puso a saturar en una charola de 30 cm de diámetro, durante 22 h. Posteriormente se procedió a remover el agua de la

charola con el agregado con la precaución de no perder material. Con ayuda de una franela se le quitó el excedente de agua al agregado para generar la condición de saturada superficialmente seca del agregado y se determinó su masa. Posteriormente, el volumen de la muestra se determinó por el método de desplazamiento de agua (Figura 6). Finalmente, la muestra se secó en horno y se determinó su masa. Para el cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones descritas en el estándar ASTM C 127-07:

- Cálculo del porcentaje de absorción (% absorción):

$$\% \text{ absorción} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (13)$$

- Cálculo de la densidad relativa (*OD*):

$$OD = \frac{A}{B-C} \quad (14)$$

- Cálculo de la densidad relativa (gravedad específica) sobre la base de un agregado de superficie saturada de secado (*SSD*):

$$SSD = \frac{B}{B-C} \quad (15)$$

- Cálculo de densidad aparente relativa (gravedad aparente específica):

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{A-C} \quad (16)$$

Donde: *A*= masa de la muestra de ensayo secada al horno en aire (g), *B*= masa de la muestra de ensayo de superficie saturada seca en el aire (g), *C*= masa aparente de muestra de ensayo saturada en agua (g).



*Figura 6.-Determinación del volumen de la muestra.*

### **3.1.4 Peso Unitario Compactado**

Se determinó el peso unitario del agregado natural y los ACR, ambos en estado compactado, conforme a lo descrito en el método estándar ASTM C 29, el cual consistió en llenar una cubeta volumétrica con la muestra del agregado en 3 capas del mismo espesor, apisonando con 25 golpes distribuidos sobre la superficie con ayuda de un pisón en cada capa. Finalmente se enrasó con una regla de madera la superficie de los agregados con el borde de la cubeta, para posteriormente determinar la masa del recipiente con el contenido en una báscula (ASTM, 2017). Posteriormente se realizó el cálculo del peso unitario compactado como se describe en la ecuación 17:

$$PUC = \frac{(G-T)}{V} \quad (17)$$

Donde: *PUC*: Peso unitario compactado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), *G*: Masa del agregado más el recipiente (kg), *T*: Masa del recipiente (kg), *V*: Volumen del recipiente ( $\text{m}^3$ ).

## **3.2 Diseño de la mezcla para concreto permeable**

El diseño de la mezcla de concreto, se realizó conforme a las recomendaciones del Instituto Americano del Concreto (ACI, 2010), que ofrece en su informe sobre concreto permeable ACI 522R-10.

### **3.2.1 Materiales**

El concreto permeable resulta de la combinación de tres elementos principales: cemento, agregado grueso y agua. Se utilizó ACR para la elaboración y diseño de la mezcla como sustitución del 100% de los agregados gruesos naturales. Para el cemento se utilizó cemento Portland CP30. Del mismo modo se realizó el mismo procedimiento para el diseño del concreto permeable con agregados naturales.

Para el diseño y elaboración de la mezcla tanto para ACR y agregados naturales se utilizó una granulometría que cumple con los requerimientos de tamizado No. 67, definida en las especificaciones ASTM C 33, con un tamaño de agregado de 4.75 mm a 19 mm (ASTM, 2016). Por lo anterior se procedió a cribar el material (ACR y agregados naturales) ocupando el material que paso por la malla de 1" y el retenido por la malla No. 4.

### **3.2.2 Proporcionamiento**

Se siguió el procedimiento descrito en el reporte ACI 522r para la dosificación de la mezcla del concreto permeable, respecto a los resultados de la caracterización de cada agregado, siguiendo los siguientes pasos: elegir el parámetro inicial de porcentaje de vacíos para el diseño de mezcla, determinación de la relación agua-cemento ( $a/c$ ), determinación del coeficiente  $b/b_0$ , cálculo de la masa del agregado, determinación del volumen de pasta, determinación de la masa de agua y cemento.

1. Parámetro inicial % de vacíos para el diseño de mezcla.
2. Obtención del  $f'c$  de la mezcla respecto al % de vacíos.
3. Determinación de la relación agua-cemento ( $a/c$ ).

4. Determinación del coeficiente  $b/b_0$  empleando la Tabla 3.

Tabla 3.-Valores efectivos de la relación  $b/b_0$  (ACI, 2010).

<b>Porcentaje de agregado fino</b>	<b><math>b/b_0</math></b>	
	<i>ASTM C33-No.8</i>	<i>ASTM C33-No.67</i>
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

5. Cálculo de la masa del agregado empleando la ecuación 18.

$$Mag = PUC \times (b/b_0) \times (1 + \%Abs) \quad (18)$$

Donde  $Mag$ : Masa del agregado grueso.  $PUC$ : peso unitario compactado del agregado grueso y  $\%Abs$ : porcentaje de absorción del agregado grueso.

6. Determinación del volumen de pasta con la ecuación 19.

$$V_p = 1 - (V_{ag} + \%Vacios) \quad (19)$$

Donde  $V_p$ : volumen de la pasta ( $m^3$ ),  $V_{ag}$ : volumen del agregado grueso ( $m^3$ ).

7. Determinación de la masa de agua y cemento utilizando las ecuaciones 20 y 21.

$$V_p = V_c + V_a \quad (20)$$

$$V_p = \frac{c}{\rho_c} + \frac{\left(\frac{a}{c}\right) \times c}{\rho_a} \quad (21)$$

Donde  $V_c$ : Volumen de cemento ( $m^3$ ),  $V_a$ : volumen de agua ( $m^3$ ),  $c$ : masa de cemento (kg),  $a$ : masa del agua (kg),  $\rho_a$ : densidad del agua a temperatura ambiente ( $kg/m^3$ ) y  $\rho_c$ : densidad del cemento ( $kg/m^3$ ).

De estas ecuaciones se relaciona como única incógnita la masa del cemento “c”, de la cual se puede calcular el valor de “c” y de “a” mediante una reducción algebraica (ACI, 2010).

Como resultado del procedimiento anterior se obtienen las proporciones en kg por cada  $m^3$  de concreto de los materiales que constituyen al concreto permeable según las características de porosidad y resistencia a la compresión  $f'_c$  requeridas, mismas cantidades que se adecuaron de manera proporcional respecto al volumen requerido para cada lote de las probetas, considerando además un 10% de desperdicio en cada colado (Figura 7).



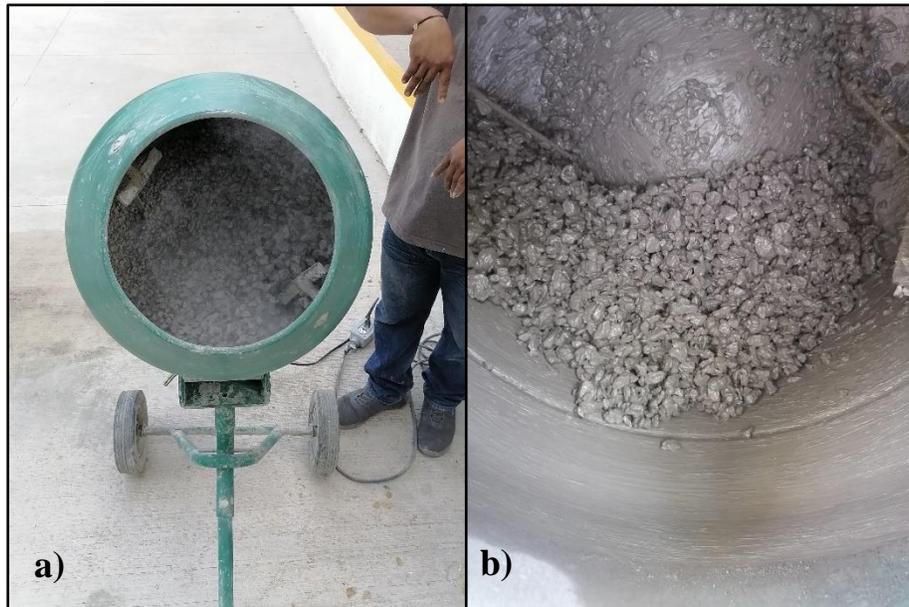
*Figura 7.-Material pesado según la dosificación de la mezcla, previo al colado de las probetas.*

### **3.3 Fabricación y Caracterización de Especímenes de Concreto Permeable**

#### **3.3.1 Elaboración de la Mezcla**

Se colaron cilindros de concreto permeable con base en la dosificación establecida previamente de cada concreto de agregados naturales y ACR, en moldes cilíndricos de acero, resultando en probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto. El proceso específico para elaborar la mezcla fue la siguiente: en una revolvedora mecánica previamente humedecida, se añadió el 100% de agregados y el 50% del agua, y se mezcló durante 1 minuto. Después, se agregó a la mezcla el 100% del cemento y el 50% restante de agua, y se dejó mezclar

durante otros 3 minutos (Figura 8). Este método permite que se limpie y humedezca la superficie del agregado, evita la formación de zonas débiles entre el árido y la pasta de cemento, adicionalmente ayuda a que el ACR absorba la humedad de antemano y garantice el rendimiento del agua en el propio diseño de la mezcla. Una vez lista la mezcla, se colaron las probetas y compactaron por el método del apisonamiento, con 25 golpes de un pisón de 25 mm de diámetro en 3 capas del mismo espesor, hasta enrasar con el borde del molde (Figura 9). Este método evita, a diferencia de la compactación por vibración, que la lechada de cemento se hunda al fondo del molde, y que el método por presión estática, que provoca que el agregado se lastime (Cai et al., 2020). Posteriormente se curaron por 28 días en un tanque de almacenamiento de agua, a temperatura de  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme a la norma NMX-C-148-ONNCCE-2010 (Figura 10).



*Figura 8.-a) Mezclado de los ACR con el agua. b) Mezcla fresca de concreto permeable con agregados naturales.*



Figura 9.-Especímenes de concreto permeable con ACR recién colados.



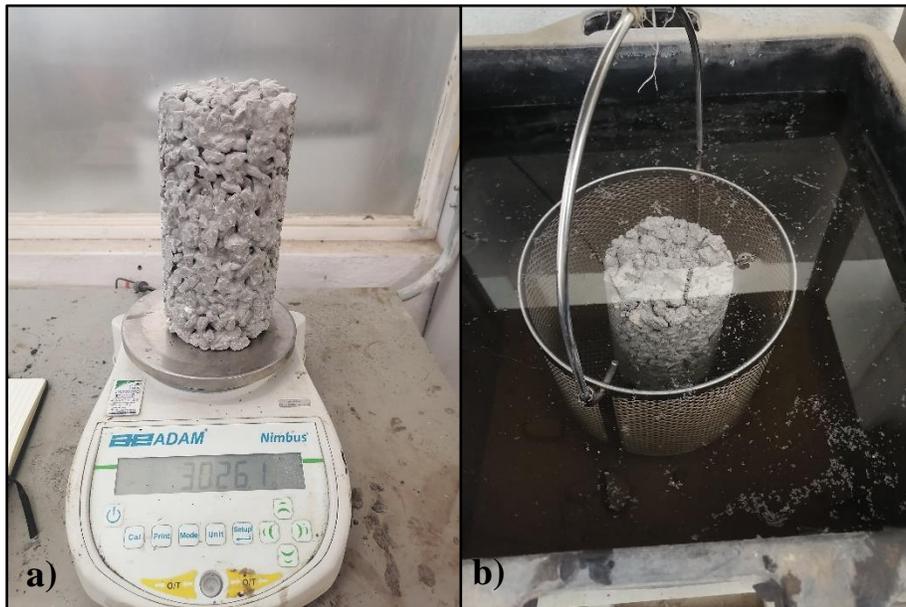
*Figura 10.-Curado de cilindros de concreto permeable en tanque de almacenamiento de agua.*

### 3.3.2 Densidad y Contenido de Vacíos

La densidad y porcentaje de vacíos de la mezcla endurecida del concreto permeable se determinó para cada cilindro utilizando la norma ASTM C 1754, para lo cual se midió la masa seca de los especímenes (Figura 11 a) ), su masa sumergida (Figura 11 b) ) y las dimensiones de su geometría. Cabe resaltar que, debido a la irregularidad de los bordes de las probetas cilíndricas, se consideró su geometría de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. El contenido de vacíos se determinó con la ecuación 22.

$$\text{Contenido de vacios} = \left(1 - \left[\frac{K \times (A - B)}{\rho_w \times D^2 \times L}\right]\right) \times 100 \quad (22)$$

Donde:  $K$ : Factor de conversión 1,273,240.00  $((\text{mm}^3 \cdot \text{kg})/(\text{m}^3 \cdot \text{g}))$ ,  $A$ : Masa seca (g).  $B$ : Masa sumergida en el agua (g),  $\rho_w$ : Densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $D$ : Diámetro del cilindro (mm),  $L$ : Altura del cilindro (mm).



*Figura 11.-a) Determinación de la masa seca de la probeta de concreto permeable con agregados naturales. b) Determinación de la masa sumergida de la probeta de concreto permeable con ACI.*

### 3.3.3 Permeabilidad

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad de las mezclas de concreto permeable con ACR se construyó un permeámetro de carga variable, con las dimensiones y geometría que se muestran en la Figura 12, tal como sugiere el reporte de la ACI 522R en su apartado 5.6. Utilizando la misma proporción del diseño de mezcla resultante, se colaron especímenes de CP dentro de tubos de PVC de 4" de diámetro, 20 cm de altura como se muestra en la Figura 14. Se colaron 3 especímenes, para cada muestra el procedimiento consistió en montar la probeta en el permeámetro hasta toparse con el borde de la "Tee", abrir la válvula, llenar totalmente con agua la muestra hasta desbordar por el tubo de salida, tal como se ve en la Figura 13, cerrar la llave, llenar hasta el punto de referencia marcado en el tubo para la toma del nivel  $h_1$ , por último, se abrió la válvula y se midió el tiempo que se tardó el agua para bajar a la marca de nivel  $h_2$ , como se muestran en la Figura 15. Para cada muestra el procedimiento se realizó por triplicado registrando los tiempos y dimensiones resultantes de cada una.

Finalmente se utilizó la ecuación 23 para el cálculo del coeficiente de permeabilidad (ACI, 2010):

$$K = \frac{L \times a}{t \times A} \times \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad (23)$$

Donde  $K$ : Coeficiente de permeabilidad (cm/s),  $t$ : tiempo de transición de  $h_1$  a  $h_2$  (s),  $L$ : Longitud de la probeta (cm),  $a$ : Área de tubería de carga (cm<sup>2</sup>),  $A$ : Área de la muestra (cm<sup>2</sup>),  $h_1$ : Altura de carga superior antes del drenaje (cm),  $h_2$ : Altura de carga superior después del drenaje (cm).

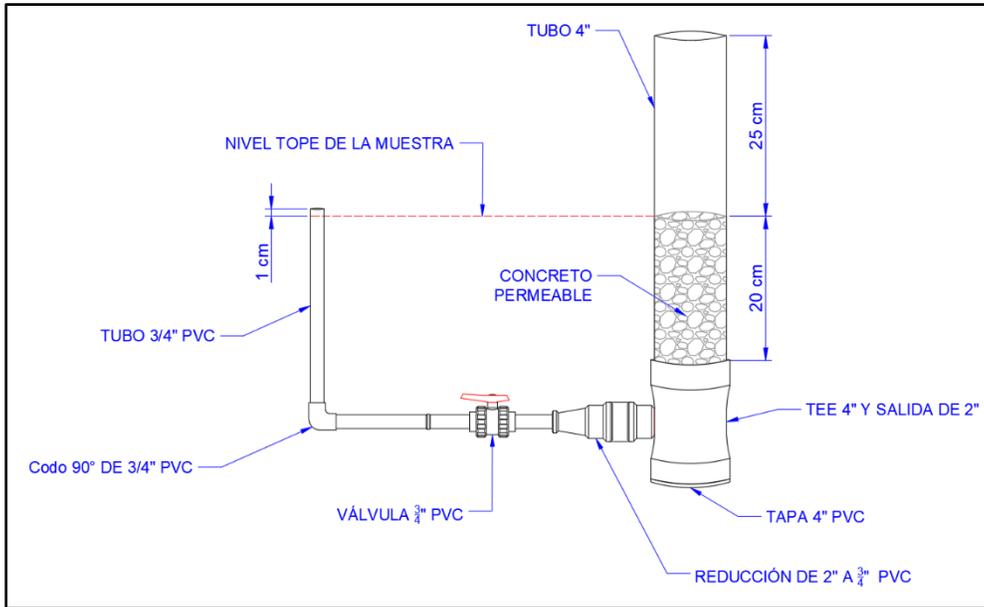


Figura 12.- Diagrama de diseño de permeámetro de carga variable.



Figura 13.- Permeámetro de carga variable de elaboración propia.



*Figura 14.- Muestra de concreto permeable con ACR colada para prueba de permeabilidad.*



*Figura 15.- Marcas de referencia de nivel  $h_1$  y  $h_2$ .*



Con la intensidad de lluvia y el área transversal de las probetas de concreto se definió, con la ecuación 24, el volumen total de solución por cada evento de filtrado.

$$\text{Volumen solución} = (A) \times (I) \times (t) \quad (24)$$

Donde:  $A$ : Área transversal de las probetas de concreto permeable ( $\text{cm}^2$ ),  $I$ : Intensidad de lluvia ( $\text{cm/h}$ ),  $t$ : Duración ( $\text{h}$ ).

Realizando la sustitución de la ecuación 24

$$\text{Volumen solución} = (78.54 \text{ cm}^2) \times (3.7 \text{ cm/h}) \times (1 \text{ h}) = 290.598 \text{ cm}^3$$

Para facilitar el cálculo de la concentración de las soluciones se resolvió redondear a 300 ml el volumen de la solución.

### **3.4.2 Diseño Estadístico del Experimento Variando la Concentración de Níquel y Zinc**

El diseño del experimento se efectuó conforme a la metodología de diseño central compuesto (CCD por sus siglas en inglés). Los factores de entrada (Zn y Ni) se estudiaron en los niveles alto (+1) y bajo (-1) (R. H. Myers, 2009) Se incluyeron tres tipos de puntos experimentales: 4 aristas, 4 centrales y 4 axiales (R. H. Myers, 2009). Cabe mencionar que, en la metodología del CCD, los puntos centrales se utilizan para evaluar el error estadístico, mientras que los puntos axiales permiten extrapolar el diseño del experimento realizado (R. H. Myers, 2009). Asimismo, la distancia entre el punto central y los puntos axiales se fijó en 1.414 tal como se indica en Myers et al. (2009) (Figura 17).

La preparación de la solución de infiltración (Figura 18) se realizó considerando las concentraciones de zinc y níquel de cada corrida conforme a las condiciones obtenidas mediante el diseño central compuesto con los parámetros mostrados en la . Las soluciones se realizaron con agua destilada y se realizaron a partir de soluciones patrón de Zn y Ni a 1000 ppm conforme a lo indicado en la Tabla 5. Luego de preparar las concentraciones de zinc y

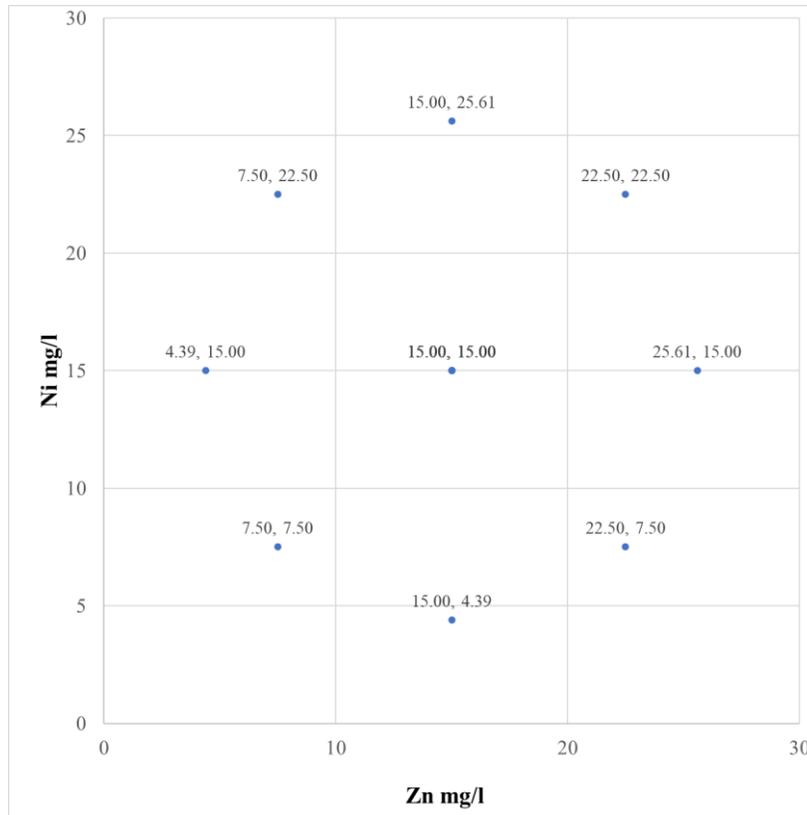
níquel, se ajustó el potencial de hidrógeno de las mezclas iniciales con perlas de hidróxido de sodio hasta obtener un pH=  $8 \pm 0.5$  (Figura 19).

*Tabla 4.- Parámetros de la superficie de respuesta.*

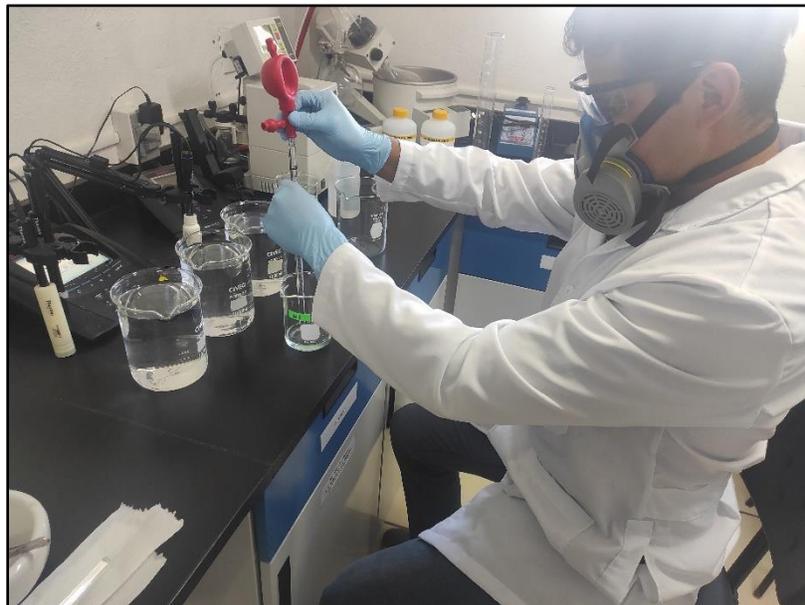
<b>Factores</b>	<b>Rango y Nivel</b>				
	<b>- <math>\alpha</math></b>	<b>Bajo (-1)</b>	<b>Medio (0)</b>	<b>Alto (1)</b>	<b><math>\alpha</math></b>
Zn	4.39	7.50	15.00	22.50	25.60
Ni	4.39	7.50	15.00	22.50	25.60

*Tabla 5.-Matriz del diseño experimental variando las concentraciones de níquel y zinc.*

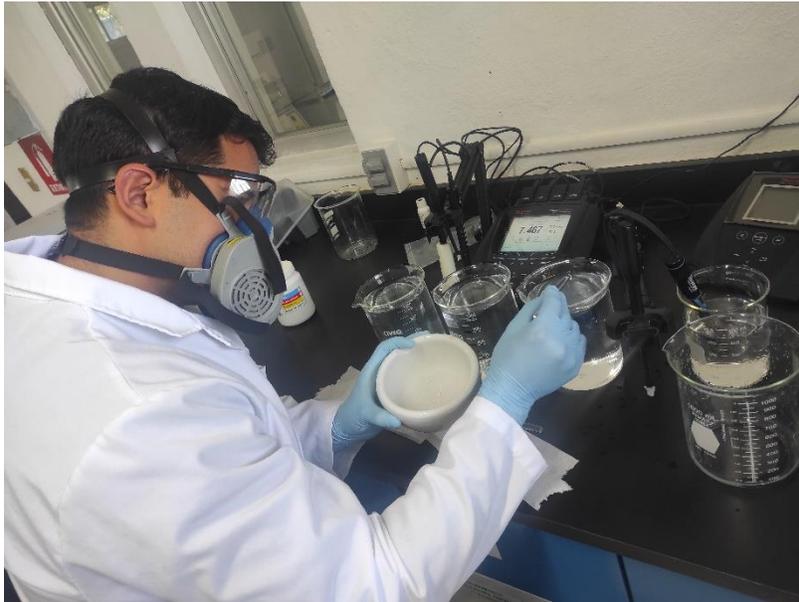
<b>No. de corrida</b>	<b>Factor</b>		<b>Concentración mg/L</b>	
	<b>Zinc (<math>X_1</math>)</b>	<b>Níquel (<math>X_2</math>)</b>	<b>Zinc</b>	<b>Níquel</b>
1	-1	-1	7.50	7.50
2	1	-1	22.50	7.50
3	-1	1	7.50	22.50
4	1	1	22.50	22.50
5	0	0	15.00	15.00
6	0	0	15.00	15.00
7	-1.414	0	4.39	15.00
8	1.414	0	25.61	15.00
9	0	-1.414	15.00	4.39
10	0	1.414	15.00	25.61
11	0	0	15.00	15.00
12	0	0	15.00	15.00



*Figura 17.-Diagrama del diseño central compuesto de las concentraciones.*



*Figura 18.- Preparación de la solución inicial con la concentración de Zn y Ni requerida.*



*Figura 19.-Ajuste del pH de la solución inicial con hidróxido de sodio.*

### **3.4.3 Filtrados en Concreto Permeable con ACR**

Para cada cilindro elaborado con ACR después de 28 días de haber sido colados, se efectuaron infiltraciones o simulaciones de escurrimiento. Para cada corrida de la Tabla 5 se realizaron 10 eventos de simulación de escurrimiento de una lluvia. De esta manera el procedimiento consistió, en términos generales, en hacer pasar a través de los cilindros de concreto permeable 300 ml de una solución de agua destilada con Ni y Zn a las concentraciones reportadas en la Tabla 5, midiendo el pH resultante de una muestra de 50 ml después de cada filtrado con un medidor multiparamétrico Orion VersaStar marca Thermo Scientific (Figura 20).



*Figura 20.-Medición del potencial de hidrogeno de la solución filtrada.*

Para cada evento, la solución a infiltrar en los especímenes de concreto permeable se depositó en un vaso de polipropileno montado en un soporte universal. Dicho vaso contaba con 9 orificios de 2 mm de diámetro, distribuidos en forma de estrella, de donde la solución escurría con un gasto promedio de 11.45 ml/s hacia el espécimen de concreto que también estaba montada sobre un anillo sujetado a el soporte universal. La solución pasaba a través del cilindro de concreto y se precipitaba hasta un vaso de precipitado colocado en la parte inferior del espécimen, tal como muestra la Figura 21.



*Figura 21.- Filtrado de la solución en probetas de concreto permeable con ACR.*

El experimento se realizó de manera puntual, es decir, 1 corrida de 10 eventos por cada cilindro, dando un total de 15 cilindros: 12 con solución zinc y níquel (ACR-C#) con las concentraciones mostradas en la Tabla 5, 1 corrida con agua destilada (ACR-AD), 1 corrida con agua potable (ACR-AP) y 1 corrida de control, es decir, sin filtración.

Después de que el flujo de solución pasó a través del cilindro de concreto permeable, se recolectó 250 ml de la solución procedente del evento 10 en frascos ámbar de cada corrida de cada espécimen, etiquetando cada muestra con el código correspondiente.

Después de la recolección de la solución infiltrada se realizó un análisis multi elemental empleando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF por sus siglas en inglés) tal como se describe en Hernández-Mendoza et al., 2021. De esta primera aproximación se detectó la presencia de níquel y zinc residuales, así como de calcio. Sin embargo, no se pudo concluir con el análisis de todas las muestras debido a que el personal

encargado de la operación del TXRF fue removido de su puesto, por lo que se optó por repetir todo el experimento y las muestras recolectadas (Figura 22) se analizaron en un laboratorio externo empleando el método de espectroscopia de absorción atómica con llama conforme a la norma técnica mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016.

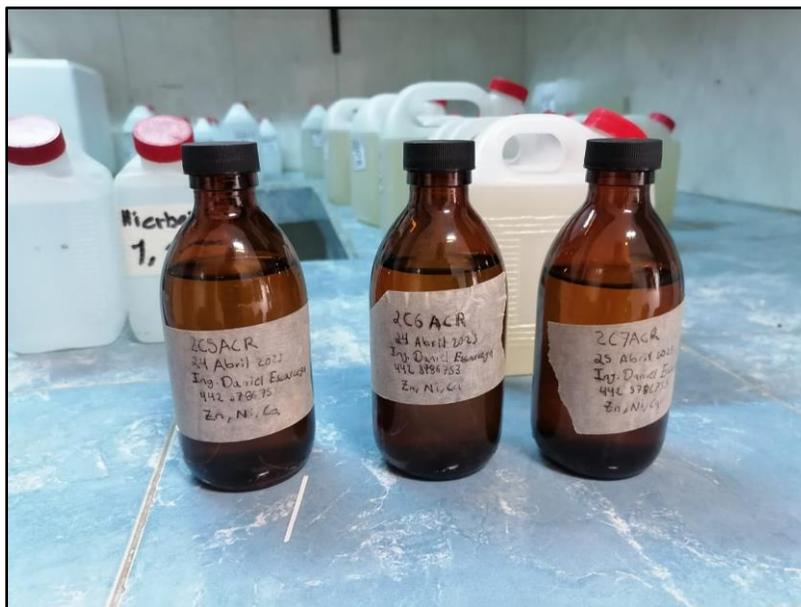


Figura 22.- Muestra de 250 ml recolectada posterior al filtrado del evento 10.

#### 3.4.4 Filtrados en Concreto Permeable con AN

Teniendo los resultados de la experimentación descritos en la sección anterior, de los filtrados con concreto permeable con ACR, se identificaron las corridas con las concentraciones de Zn y Ni en las que el concreto permeable con ACR presentó una mayor, menor y una retención más cercana al promedio de Zn y Ni total; para este efecto fueron las corridas C8, C4 y C3 respectivamente.

Con las concentraciones C8, C4 y C3 se repitió el procedimiento de filtración, ajustando el pH inicial, tomando lectura del pH del resultante de cada evento y recuperando 250 ml posterior al evento 10 de cada corrida, utilizando ahora las probetas de agregados naturales a 28 días de coladas, con los códigos AN-C# para aquellas corridas con Zn y Ni, AN-AD para

la corrida con agua destilada, AN-AP para la corrida con agua potable y ANControl para la probeta de control.



*Figura 23.-Filtrado de la solución en probetas de concreto permeable con AN.*

De igual manera, las concentraciones resultantes de zinc, níquel y calcio en las muestras recuperadas se analizaron por medio de un laboratorio externo con el método de espectroscopía de absorción atómica. Con esto se comparó la retención de de Zn y Ni del CP fabricado con ACR respecto al CP con AN.

### **3.4.5 Pruebas para la Cinética de Retención de Metales Pesados**

Con el fin de observar la variación de la concentración de Zn y Ni respecto al tiempo (número de eventos) y su concentración en el equilibrio dinámico, se realizó un ensayo cíclico que consistió en la repetición del procedimiento descrito en la Sección 3.4.3 , con la combinación de Zn y Ni que presentó mayor porcentaje de retención, es decir, la concentración C8, reutilizando la solución residual de cada evento y muestreando 250 ml en el evento 1, 3, 5, 10, 15 y 20 para su posterior determinación de la cantidad de Zn, Ni y Ca presentes en la solución. El código de la probeta para esta prueba está definido como “ACR cinética”.

### 3.5 Resistencia a la Compresión Simple

Posterior a la experimentación de retención de metales pesados, se determinó la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto utilizados, conforme a la norma ASTM C 39 (Figura 24). Cabe mencionar que, debido a las irregularidades en todo el cuerpo de los cilindros dado la naturaleza misma del concreto permeable, se consideró que los cilindros contaban con un diámetro de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, por lo anterior, para la determinación de la resistencia a compresión se utilizó una relación altura-diámetro de los especímenes igual a 2, por lo cual el factor de corrección a la resistencia utilizada fue de 1.0. Asimismo, para el ensayo fue necesario el uso de casquetes de neopreno en la cara inferior y superior, debido nuevamente a las irregularidades en las caras transversales de los cilindros (Figura 25).



*Figura 24.- Montaje de cilindro de concreto permeable con ACR para prueba de compresión simple.*



*Figura 25.- Cilindro de concreto permeable con casquetes de neopreno.*

### **3.6 Tratamiento de Residuos**

Los residuos líquidos se trataron con el método de evaporación, dejándolos a insolación directa en un perímetro acordonado (Figura 26). Los residuos mineralizados, luego de la evaporación, fueron encapsulados en una matriz sólida, utilizando como matriz sólida cemento portland con agregado pétreo (Vera, 2014). Los residuos sólidos se encapsularon en una matriz de cemento portland para prevenir que se dispersaran en la zona de trabajo. Posteriormente, los residuos fueron entregados para su disposición final a una empresa autorizada por la autoridad para tal efecto.



*Figura 26.- Residuos líquidos expuestos a insolación directa*

## Resultados y discusión

### 4.1 Caracterización de ACR

#### 4.1.1 Granulometría

Los resultados del análisis granulométrico de los agregados de concreto reciclado como producto de la trituración se presentan en la Tabla 6 y su curva correspondiente se muestra en la Figura 27.

Tabla 6.- Granulometría del ACR.

<i>Malla</i>	<i>Abertura (mm)</i>	<i>Retenido parcial (g)</i>	<i>Retenido acumulado (g)</i>	<i>% Retenido parcial</i>	<i>% Retenido acumulado</i>	<i>% Pasa</i>
<b>1 ½"</b>	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>1"</b>	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>¾"</b>	19.00	86.20	86.20	0.98	0.98	99.02
<b>½"</b>	12.50	2144.40	2230.60	24.44	25.42	74.58
<b>3/8"</b>	9.50	2124.50	4355.10	24.21	49.63	50.37
<b>No.4</b>	4.75	1888.90	6244.00	21.53	71.16	28.84
<b>No.8</b>	2.36	1198.30	7442.30	13.66	84.82	15.18
<b>N.16</b>	1.18	487.40	7929.70	5.55	90.37	9.63
<b>Fondo</b>	-	844.70	8774.40	9.63	100.00	0.00
	Σ	8774.40	Σ	100		

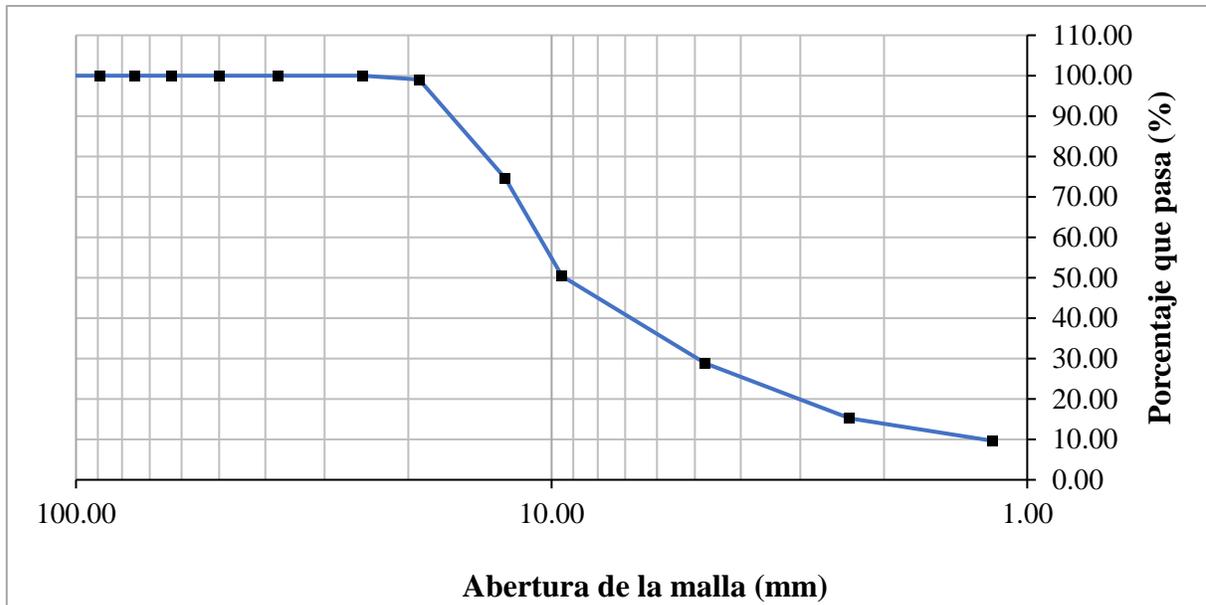


Figura 27.- Curva granulométrica de los ACR.

Tamaño máximo nominal del agregado = 1 pulgada.

Para cumplir con los requerimientos dispuestos en las especificaciones ASTM C33/ C33M para una granulometría No. 67, que fue la que se tomó a consideración para el diseño de mezcla, de los agregados de concreto reciclado se desecharon aquellas partículas con tamaño superior a ¾ de pulgada e inferiores a la malla No. 4 (4.75 mm).

#### 4.1.2 Densidad y Absorción

Las densidades resultantes y propiedades de absorción del agregado de concreto reciclado se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7.- Densidad y absorción de ACR.

<i>Propiedad</i>	<i>(ton/m<sup>3</sup>)</i>
Densidad compacta seca	1.24
Densidad relativa	2.087
Densidad relativa SSS	2.26
Densidad aparente relativa	2.53
% de absorción	8.46

Las especificaciones en la normativa de varios países para los requerimientos mínimos del uso de los ACR para la elaboración de concreto para uso estructural y no estructural, se debe cumplir con una densidad mínima de 2000 kg/m<sup>3</sup> a 2200 kg/m<sup>3</sup> y un porcentaje máximo de absorción de 7% a 10% dependiendo del país (Gonçalves y De Brito, 2010). Para los resultados mostrados en la Tabla 7, observamos que se cumple con la densidad mínima y presenta una absorción superior a los que se restringe su uso en países como Brasil y Portugal con una absorción máxima del 7% (Gonçalves y De Brito, 2010). Adicionalmente los valores de densidad coincidan con la caracterización realizadas por Martínez y Mendoza, 2006.

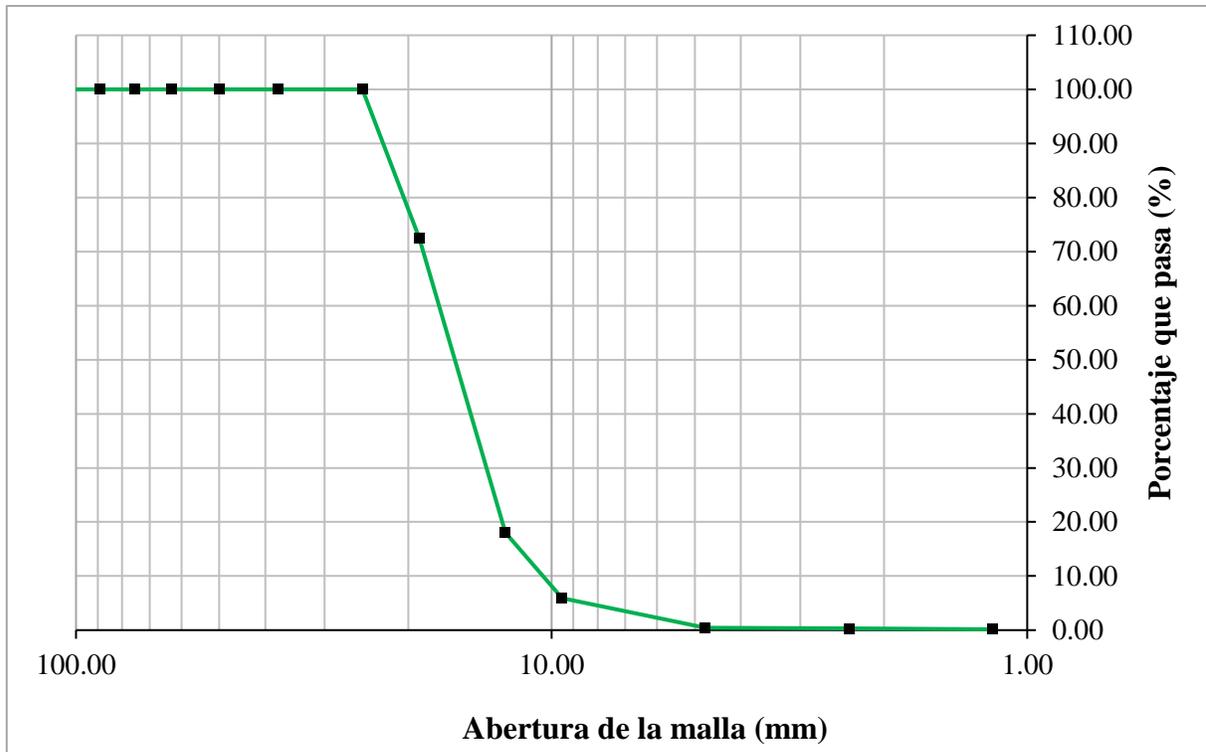
## 4.2 Caracterización de AN

### 4.2.1 Granulometría

Los resultados del análisis granulométrico de los agregados de concreto reciclado (Tabla 8), como producto de la trituración, se muestran en su curva correspondiente en la Figura 28.

*Tabla 8.- Granulometría de los AN.*

<b>Malla</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Retenido parcial (gr)</b>	<b>Retenido acumulado (gr)</b>	<b>% Retenido parcial</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
<b>1 ½ "</b>	37.50	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>1"</b>	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>¾"</b>	19.00	2960.00	2960.00	27.41	27.41	72.59
<b>½"</b>	12.50	5890.00	8850.00	54.54	81.94	18.06
<b>3/8"</b>	9.50	1310.00	10160.00	12.13	94.07	5.93
<b>No.4</b>	4.75	590.00	10750.00	5.46	99.54	0.46
<b>No.8</b>	2.36	18.00	10768.00	0.17	99.70	0.30
<b>N.16</b>	1.18	16.00	10784.00	0.15	99.85	0.15
<b>Fondo</b>	-	16.00	10800.00	0.15	100.00	0.00
	Σ	10800.00	Σ	100		



*Figura 28.- Curva granulométrica de los AN.*

Tamaño máximo nominal del agregado = 1 pulgada.

De la granulometría se analizó que el 28.4% del agregado ACR contiene partículas de diámetro inferior que 4.75 mm (arenas y finos), en comparación con el agregado natural que obtuvo un 0.46 %, es muy superior; característica que se le atribuye al proceso de trituración que desgasta el concreto viejo dentro del agregado, generando partículas más finas a lo que consideramos propiamente como gravas. La granulometría más fina del ACR en comparación a los AN es un factor importante para considerar en las diferentes aplicaciones que estos pudieran tener y que ya fueron descritos en los antecedentes.

De igual manera que con los ACR, para cumplir con los requerimientos dispuestos en las especificaciones ASTM C33/ C33M para una granulometría No.67, de los agregados naturales se desecharon aquellas partículas con tamaño superior a  $\frac{3}{4}$  de pulgada e inferiores a la malla No.4 (4.75 mm).

## 4.2.2 Densidad y Absorción

Las densidades resultantes y propiedades de absorción del agregado de concreto reciclado se resumen en la Tabla 9.

*Tabla 9.-Densidad y absorción de AN.*

<b><i>Propiedad</i></b>	<b><i>(ton/m<sup>3</sup>)</i></b>
Densidad compacta seca	1.577
Densidad relativa	2.67
Densidad relativa SSS	2.734
Densidad aparente relativa	2.83
% de absorción	2.14

El porcentaje de absorción del agregado fue de 2.14%, muy inferior comparado con el porcentaje de absorción del agregado reciclado que fue de 8.46%. La densidad relativa SSS fue de 2.26 ton/m<sup>3</sup>; valores típicos reportados en la caracterización de agregados de piedra caliza (SCT, 2006).

## 4.3 Diseño de Mezcla de Concreto Permeable con ACR

### 4.3.1 Concreto Permeable con ACR

Con base en la caracterización de los ACR, dado un volumen de vacíos de diseño del 20%, un tamaño granulométrico No.67 (19 mm a 4.75 mm ) y un correspondiente  $f'c=154$  kg/cm<sup>2</sup> de diseño respecto al contenido de vacíos establecido, se determinó el proporcionamiento de mezcla que se presenta en la Tabla 10:

*Tabla 10.- Proporcionamiento de concreto permeable con ACR.*

<b><i>Material</i></b>	<b><i>Cantidad (kg/m<sup>3</sup>)</i></b>
Cemento Portland	304.46
Agua	121.7
ACR	1331.93

### 4.3.2 Concreto Permeable con AN

Utilizando los resultados de la caracterización de los AN, y al igual que con los ACR se consideró un volumen de vacíos de diseño de un 20%, un tamaño granulométrico No.67 (19 mm a 4.75 mm) y un correspondiente  $f'c = 154 \text{ kg/cm}^2$  de diseño respecto al contenido de vacíos establecido, dando un proporcionamiento definido en la Tabla 11.

*Tabla 11.-Proporcionamiento de concreto permeable con AN.*

<i>Material</i>	<i>Cantidad (kg/m<sup>3</sup>)</i>
Cemento Portland	304.46
Agua	121.79
AN	1595.04

Se puede observar una diferencia importante en la cantidad de masa de agregado por metro cúbico de mezcla cuando se utiliza AN respecto a los ACR, esto se debe esencialmente a que el agregado natural es más denso, comparando su peso unitario compactado, mismo que se calculó en 21.36% más denso el AN que el ACR ;esto se explica debido a que los ACR en sus partículas contienen mortero adherido a los áridos, siendo el mortero menos denso que el árido natural utilizado en el concreto viejo (Tijani et al., 2021).

## 4.4 Propiedades Hidráulicas

### 4.4.1 Contenido de Vacíos

Los resultados de la determinación de los contenidos de vacíos de las probetas de la mezcla de concreto permeable se reportan en la Tabla 12.

Tabla 12.- Contenido de vacíos de los cilindros de concreto permeable.

<i>Probeta</i>	<i>Contenido de vacíos (%)</i>	
	<i>Individual</i>	<i>Promedio</i>
ACR C1	29.53	
ACR C2	26.92	
ACR C3	27.71	
ACR C4	29.95	
ACR C5	33.74	
ACR C6	32.55	
ACR C7	34.33	
ACR C8	31.12	32.32
ACR C9	30.16	
ACR C10	35.78	
ACR C11	33.52	
ACR C12	34.42	
ACR AD	34.00	
ACR AP	33.47	
ACR Cinética	34.42	
ACR Control	35.47	
AN C3	21.55	
AN C4	22.44	
AN C8	24.34	
AN AD	22.08	22.73
AN AP	23.92	
AN Control	22.03	

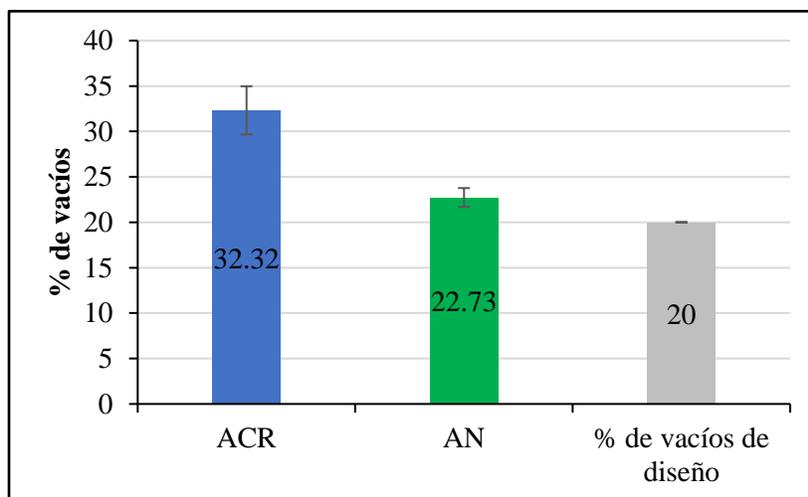


Figura 29.- Histograma del porcentaje de vacíos de los especímenes de concreto permeable.

- Desviación estándar del porcentaje de vacíos para CP ACR=  $\sigma_{ACR}= 2.64$ .
- Desviación estándar del porcentaje de vacíos para CP AN=  $\sigma_{AN}= 1.03$ .

Los resultados del cálculo del contenido de vacíos de las probetas de concreto permeable con ACR, presentan en promedio 32.32% de contenido de vacíos y una desviación estándar de 2.64%. Por otro lado, el concreto permeable con AN presentaron un 22.27% de vacíos y una desviación estándar de 1.3%. De lo anterior, podemos afirmar que la variabilidad del porcentaje de vacíos del CP con ACR respecto a su promedio comparado con el CP con AN fue el doble. Este comportamiento que se le atribuye a la naturaleza misma del ACR, ya que, dependiendo del concreto de origen de estos agregados, estos pueden tener diferentes características como su densidad y porcentaje de absorción; ya que los ACR se componen de áridos naturales y mortero adherido, sus propiedades físicas dependerán de la calidad y cantidad de los áridos y del mortero adherido a ellos, que dicho sea de paso estas características están sujetas al uso al que fue destinado el concreto fuente de donde fueron obtenidos los ACR (Cordeiro et al., 2015).

Adicionalmente, el diseño de mezcla se realizó considerando un 20% de contenido de vacíos, al obtener un promedio de 32.32% de vacíos de los cilindros de ACR es claro que hay un aumento de un 38.11% del contenido de vacíos respecto al diseño de la mezcla y un 29.67 % de aumento respecto al contenido de vacíos promedio de los cilindros con AN. Por lo anterior se hace evidente que la sustitución total de agregados naturales por ACR provocó un aumento en el contenido de vacíos en la mezcla, lo que es consistente con lo que se reporta en la literatura. Con una forma más angular y una textura superficial rugosa de los ACR se pudo haber introducido más aire a la mezcla (El-Hassan et al., 2019). Por otro lado, este aumento pudo deberse a que el mortero adherido al ACR es menos sólido, produciendo una estructura de concreto más porosa (El-Hassan et al., 2019; Tijani et al., 2021).

#### **4.4.2 Coeficiente de Permeabilidad**

Los resultados del registro de las dimensiones, lecturas de carga hidráulica y tiempos de escurrimiento se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13.- Resultados de la prueba de permeabilidad.

<i>Probeta</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Longitud probeta (cm)</i>	<i>Diámetro probeta (cm)</i>	<i>Área probeta (cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Área tubería (cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Tiempo (s)</i>	<i>h1 (cm)</i>	<i>h2 (cm)</i>	<i>K (cm/s)</i>	<i>K prom (cm/s)</i>	
P1	1	22.73	10.43	85.44	85.44	17.21	24.5	4.5	2.238	<b>2.229</b>	<b>2.363</b>
	2					17.21	24.5	4.5	2.238		
	3					17.65	24.5	4.5	2.182		
	4					17.05	24.5	4.5	2.259		
P2	1	23.03	10.53	87.09	87.09	17.55	24	4	2.351	<b>2.385</b>	
	2					17.16	24	4	2.405		
	3					17.32	24	4	2.382		
	4					17.18	24	4	2.402		
P3	1	21.43	10.46	85.93	85.93	15.88	24	4	2.418	<b>2.475</b>	
	2					15.35	24	4	2.501		
	3					15.43	24	4	2.488		
	4					15.4	24	4	2.493		

Se puede observar un coeficiente de permeabilidad  $k = 2.363 \text{ cm/s} = 55.98 \text{ in/min}$ , lo que corresponde a un material granular de tamaño nominal de 1 pulgada con una capacidad drenante alta (Boroumnad y Hassan Baziar, 2005). Tomando en cuenta que el porcentaje de vacíos promedio de los cilindros con ACR fue de 32.32%, podemos verificar, como se muestra en la Figura 30, que este coeficiente de permeabilidad obtenido (55.98 in/min) concuerda de manera correcta con la gráfica que reporta el ACI 522-R, que relaciona el porcentaje de vacíos con la capacidad drenante de la mezcla endurecida (ACI, 2010).

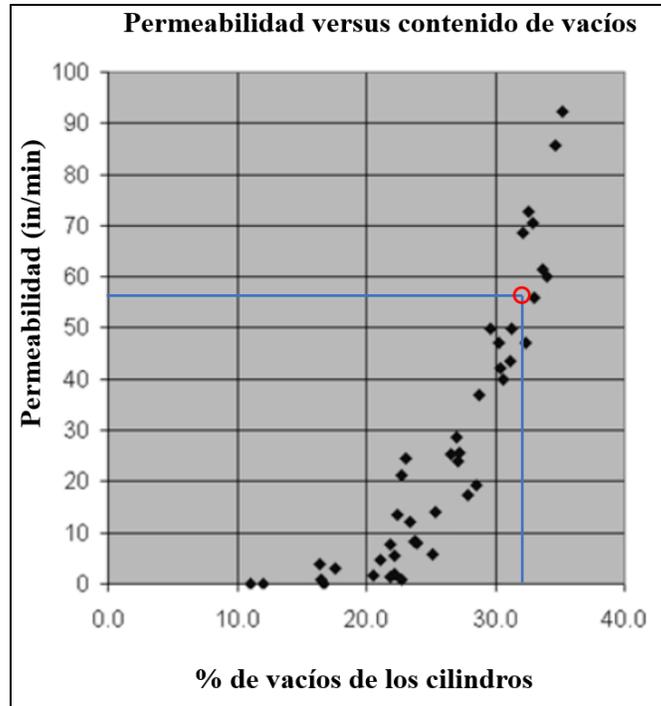


Figura 30.- Verificación gráfica de la relación del % de vacíos con el coeficiente de permeabilidad.

Fuente: Adaptado de ACI, 2010.

## 4.5 pH de las Soluciones

### 4.5.1 Concreto Permeable con ACR

En la Tabla 14 se muestra el registro del pH de cada una de las soluciones resultantes de los filtrados de cada evento utilizando el concreto permeable con ACR como filtro; de la cual se observa que la solución inicial tiene un pH de  $8.0 \pm 0.50$ .

Tabla 14.- pH de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con ACR.

Código de probeta	Concentración (mg/l)		pH Evento										
	Zn	Ni	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ACR-C1	7.50	7.50	8.016	9.364	9.485	9.369	9.319	9.300	9.266	9.255	9.237	9.227	9.200
ACR-C2	22.50	7.50	8.577	9.345	9.482	9.410	9.407	9.352	9.293	9.313	9.297	9.269	9.228
ACR-C3	7.50	22.50	8.016	9.170	9.263	9.205	9.158	9.089	9.105	9.045	9.033	9.017	9.049
ACR-C4	22.50	22.50	8.274	9.275	9.284	9.290	9.208	9.276	9.211	9.166	9.135	9.130	9.172
ACR-C5	15.00	15.00	8.026	9.296	9.447	9.421	9.317	9.264	9.222	9.276	9.246	9.249	9.221
ACR-C6	15.00	15.00	8.490	9.548	9.667	9.595	9.489	9.482	9.431	9.222	9.333	9.331	9.318
ACR-C7	4.39	15.00	8.272	8.974	9.009	8.982	8.985	8.921	8.917	8.903	8.872	8.863	8.935
ACR-C8	25.61	15.00	8.146	9.311	9.415	9.317	9.275	9.289	9.259	9.161	9.212	9.186	9.180
ACR-C9	15.00	4.39	8.024	8.863	9.173	8.924	8.897	8.887	8.756	8.882	8.736	8.797	8.914
ACR-C10	15.00	25.61	8.094	8.432	8.477	8.567	8.466	8.538	8.515	8.524	8.444	8.435	8.461
ACR-C11	15.00	15.00	8.005	8.337	8.348	8.491	8.423	8.454	8.387	8.459	8.484	8.432	8.450
ACR-C12	15.00	15.00	8.051	9.163	9.466	9.369	9.241	9.113	9.068	9.026	8.992	9.032	8.834

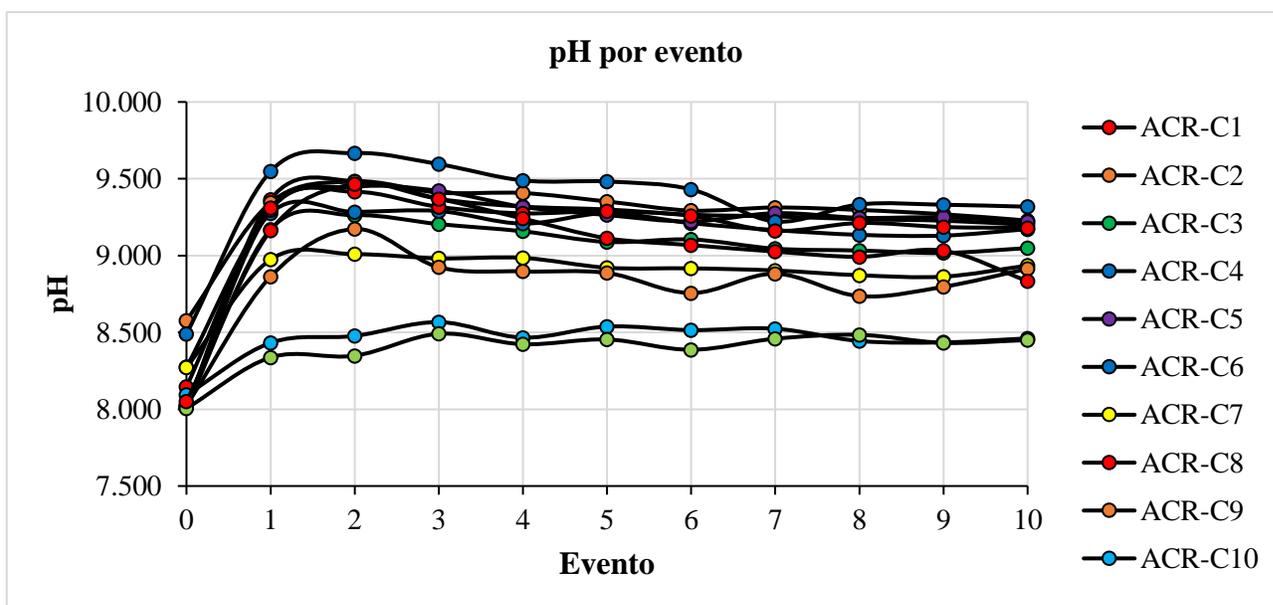


Figura 31.-Gráfica de pH de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con ACR.

De la Figura 31 se observan de manera gráfica las mediciones del pH respecto al número de evento de filtrado, de donde se puede apreciar como tendencia general que el pH alcanza su máximo punto entre el evento 2 y 3 con un valor máximo promedio de 9.230, posteriormente su valor de pH comienza a decrecer hasta estabilizarse en un pH promedio de 9.004 posterior al evento 7 sin presentar cambios significativos en eventos posteriores. Adicionalmente se produjo un máximo de 9.667 en el evento 2 de la probeta ACR-C6 y un mínimo de 8.337 en el evento 1 de la probeta ACR-11.

Podemos decir que dentro de las soluciones resultantes se generaron condiciones de pH (8-9.667) que dentro de la literatura se describen como las ideales para que los metales pesados sean absorbidos por el carbonato de calcio del concreto, se genere la insolubilidad de los metales pesados a un pH superior a 9 y se precipiten, se produzca la formación de hidróxidos de Zn y se dé la inmovilización de iones metálicos por reacciones químicas de adición o sustitución (Romero Esquivel et al., 2007; Holmes et al., 2017; Kim et al., 2017; Shabalala et al., 2017; Mahedi et al., 2020)

#### 4.5.2 Concreto Permeable con AN

En la

<i>Código de probeta</i>	<i>Concentración (mg/l)</i>		<i>pH Evento</i>										
	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<b>ACR-C3</b>	7.50	22.50	8.016	9.170	9.263	9.205	9.158	9.089	9.105	9.045	9.033	9.017	9.049
<b>ACR-C4</b>	22.50	22.50	8.274	9.275	9.284	9.290	9.208	9.276	9.211	9.166	9.135	9.130	9.172
<b>ACR-C8</b>	25.61	15.00	8.146	9.311	9.415	9.317	9.275	9.289	9.259	9.161	9.212	9.186	9.180
<b>ANC3</b>	7.50	22.50	8.103	9.151	9.268	9.23	9.179	9.094	9.102	9.007	9.087	8.945	8.811
<b>ANC4</b>	22.50	22.50	8.046	8.432	8.619	8.549	8.56	8.513	8.472	8.492	8.624	8.492	8.446
<b>ANC8</b>	25.61	15.00	8.008	8.257	8.38	8.364	8.326	8.322	8.335	8.328	8.348	8.284	8.293

se muestra la comparación de los resultados obtenidos de la medición del pH inicial y el resultante de cada uno de los eventos para los cilindros de CP con ACR y AN para las concentraciones C3, C4 y C8. Obteniendo un pH promedio de 9.101 para el CP con ACR y de 8.589 para los cilindros de AN.

Tabla 15.-pH de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con AN y ACR.

Código de probeta	Concentración (mg/l)		pH Evento										
	Zn	Ni	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ACR-C3	7.50	22.50	8.016	9.170	9.263	9.205	9.158	9.089	9.105	9.045	9.033	9.017	9.049
ACR-C4	22.50	22.50	8.274	9.275	9.284	9.290	9.208	9.276	9.211	9.166	9.135	9.130	9.172
ACR-C8	25.61	15.00	8.146	9.311	9.415	9.317	9.275	9.289	9.259	9.161	9.212	9.186	9.180
ANC3	7.50	22.50	8.103	9.151	9.268	9.23	9.179	9.094	9.102	9.007	9.087	8.945	8.811
ANC4	22.50	22.50	8.046	8.432	8.619	8.549	8.56	8.513	8.472	8.492	8.624	8.492	8.446
ANC8	25.61	15.00	8.008	8.257	8.38	8.364	8.326	8.322	8.335	8.328	8.348	8.284	8.293

En la Figura 32 es evidente que el concreto permeable con AN presentó un pH por evento menor para las concentraciones C4 y C8 en comparación con su homólogo de agregados reciclado, así también, sigue la tendencia general de presentar sus mayores niveles de pH durante el evento 2 para posteriormente disminuir y estabilizarse hasta el evento 10.

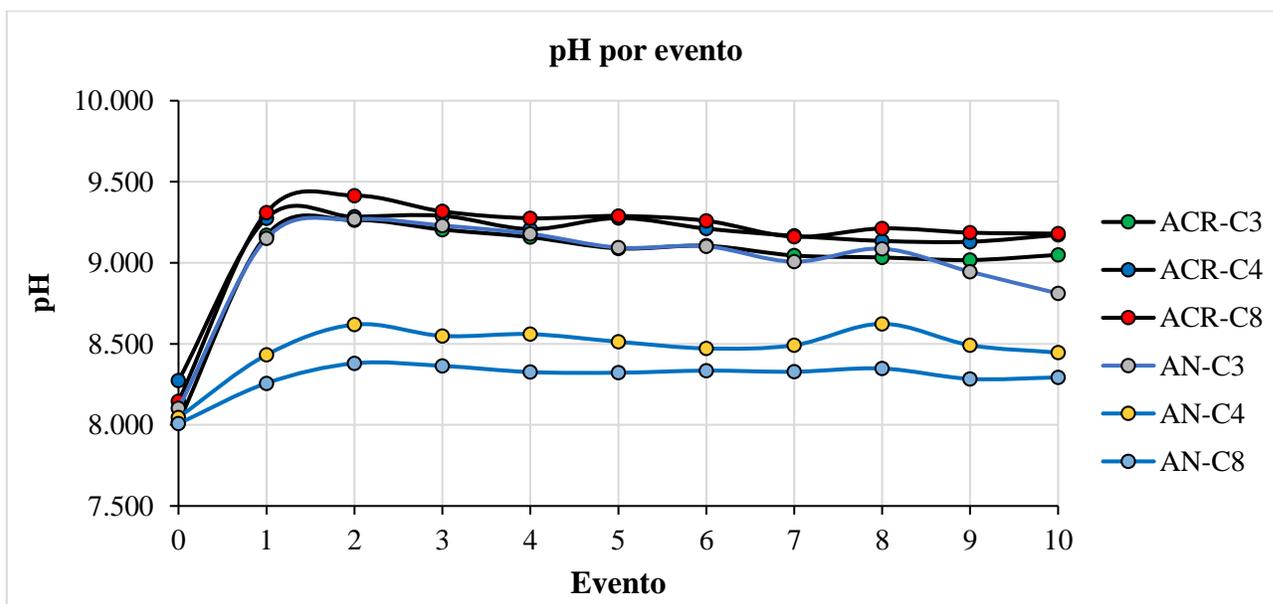


Figura 32.-Gráfica de pH de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con AN y ACR.

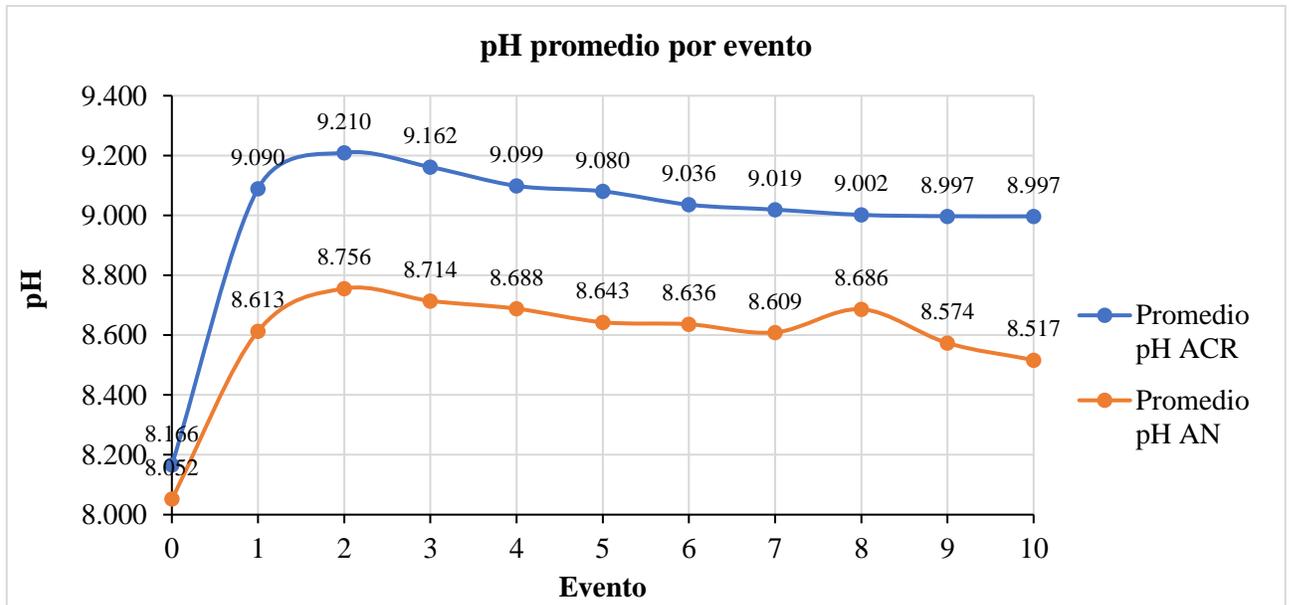


Figura 33.-Gráfica de pH promedio de las soluciones iniciales y resultantes por evento del concreto permeable con AN y ACR.

El aumento en el pH de las soluciones filtradas en el CP con ACR en comparación con aquellos cilindros con AN es notable. En la literatura, el incremento del pH del agua en contacto con el concreto, es atribuido a la composición de la pasta de cemento, rico en hidróxido de calcio y óxido de calcio, los cuales son los principales agentes que propician un pH alcalino; los ACR al contener más pasta de cemento por el concreto viejo, potencializan el efecto, haciendo que la presencia de agregados de concreto reciclado neutralice los protones libres, convirtiendo más alcalina la solución (Mahedi et al., 2020; Monroe et al., 2019).

#### 4.5.3 Relación del Porcentaje de Remoción de Ni en la Solución con el pH

Al calcular y analizar la variación más grande de la medición del pH de cada uno de los eventos de cada probeta de concreto con ACR, como se muestra en la Tabla 16, se encontró que la variación máxima de pH de las mediciones de cada evento, es decir el valor más alto de pH medido menos el valor más bajo (sirva la ecuación 25 como ejemplo), está relacionado con el porcentaje de remoción de níquel obtenido de los filtrados.

$$\Delta pH \text{ de "ACR - C1"} = pH_{m\acute{a}x} - pH_{m\acute{i}n} = 9.485 - 8.016 = 1.469 \quad (25)$$

Tabla 16.- Variación máxima de pH y el porcentaje de remoción de Ni en el concreto permeable con ACR.

Código de probeta	Concentración inicial (mg/l)		$\Delta$ pH (Máx- Min)	Remoción de Zn (%)	Remoción de Ni (%)
	Zn	Ni			
ACR-C1	7.50	7.50	1.469	30.84	33.80
ACR-C2	22.50	7.50	0.905	15.58	26.52
ACR-C3	7.50	22.50	1.247	27.01	32.73
ACR-C4	22.50	22.50	1.016	-83.37	14.07
ACR-C5	15.00	15.00	1.421	20.26	32.05
ACR-C6	15.00	15.00	1.177	-8.36	17.39
ACR-C7	4.39	15.00	0.737	37.09	28.09
ACR-C8	25.61	15.00	1.269	59.16	65.27
ACR-C9	15.00	4.39	1.149	38.31	29.42
ACR-C10	15.00	25.61	0.473	30.30	30.50
ACR-C11	15.00	15.00	0.486	33.70	30.85
ACR-C12	15.00	15.00	1.415	34.65	51.37

La Figura 34, representa el diagrama de dispersión y de correlación lineal no paramétrica de Spearman, ya que los datos no presentan una distribución normal, según la prueba de Shapiro previamente realizada a los datos. Dado un p-valor de 0.049 inferior a nuestro nivel de significancia  $\alpha= 0.05$  y un coeficiente R de 0.59, se asume que la variación del pH entre cada filtrado estimula la remoción de Ni en la solución del concreto permeable con ACR, dicho de otra forma y en términos generales, un pH alcalino es favorable para la remoción de Ni. Cabe señalar que, con los resultados de esta experimentación, como se muestra en la Figura 35, este fenómeno no se presenta al menos no de manera significativa en la remoción de Zn durante los filtrados.

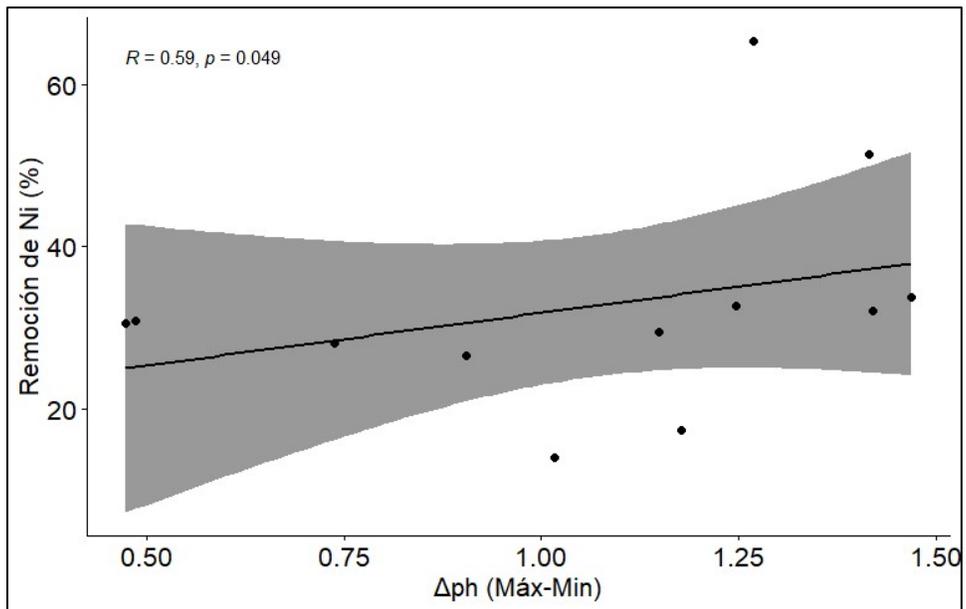


Figura 34.-Diagrama de dispersión y de correlación lineal no paramétrica de la variación máxima de pH con el porcentaje de remoción de Ni.

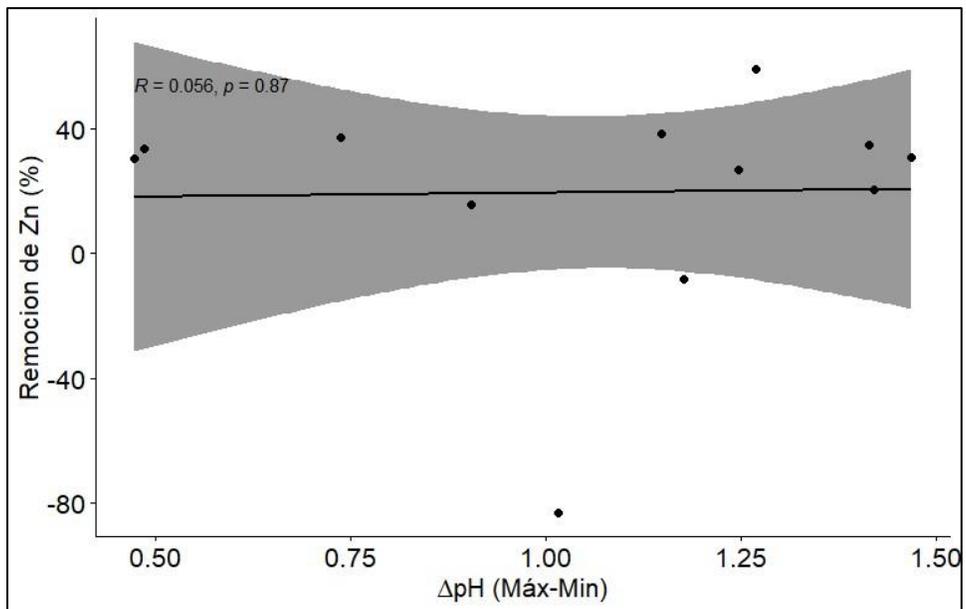


Figura 35.-Diagrama de dispersión y de correlación lineal no paramétrica de la variación máxima de pH con el porcentaje de remoción de Zn.

## 4.6 Análisis Químico Elemental Inicial

### 4.6.1 Análisis de Elementos Traza del Agua Potable

En esta sección, se muestran las concentraciones iniciales obtenidas a partir del análisis por fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF) de las muestras de agua potable para la identificación de distintos elementos químicos presentes en el agua potable utilizada en los cilindros ACR-AP y AN-AP (Tabla 17).

*Tabla 17.- Análisis de elementos traza del agua potable.*

<i>Elemento</i>	<i>Concentración (mg/l)</i>
Mg	No detectable
Cl	11.569
K	10.601
Ca	40.793
Mn	0.028
Fe	0.14
Ni	No detectable
Cu	0.03
Zn	0.074

## 4.7 Retención de Metales Pesados del Concreto Permeable con ACR

En la Tabla 18 se reportan las concentraciones iniciales de Zn y Ni en la solución inicial correspondiente al diseño central compuesto, la concentración final de Zn, Ni, Ca de la solución posterior al filtrado del evento 10 y la remoción porcentual y en miligramos del Zn y Ni que se obtuvo al filtrar la solución a través de los cilindros de concreto permeable con ACR.

Tabla 18.- Tabla resumen de las concentraciones iniciales y finales de Zn, Ni y Ca y su remoción en la solución del concreto permeable con ACR.

Código de probeta	Concentración inicial (mg/l)		Concentración final (mg/l)			% Remoción		Remoción (mg/l)	
	Zn	Ni	Ca	Zn	Ni	Zn	Ni	Zn	Ni
ACR-C1	7.50	7.50	6.30	5.19	4.97	30.84	33.80	2.31	2.54
ACR-C2	22.50	7.50	5.60	18.99	5.51	15.58	26.52	3.51	1.99
ACR-C3	7.50	22.50	8.22	5.47	15.14	27.01	32.73	2.03	7.37
ACR-C4	22.50	22.50	8.55	41.26	19.34	-83.37	14.07	-18.76	3.17
ACR-C5	15.00	15.00	12.33	11.96	10.19	20.26	32.05	3.04	4.81
ACR-C6	15.00	15.00	10.02	16.25	12.39	-8.36	17.39	-1.25	2.61
ACR-C7	4.39	15.00	9.89	2.76	10.79	37.09	28.09	1.63	4.21
ACR-C8	25.61	15.00	16.53	10.46	5.21	59.16	65.27	15.15	9.79
ACR-C9	15.00	4.39	14.37	9.25	3.1	38.31	29.42	5.75	1.29
ACR-C10	15.00	25.61	8.74	10.46	17.8	30.30	30.50	4.55	7.81
ACR-C11	15.00	15.00	10.49	9.95	10.37	33.70	30.85	5.06	4.63
ACR-C12	15.00	15.00	9.42	9.8	7.29	34.65	51.37	5.20	7.71

De la tabla anterior se analiza que la remoción promedio de la concentración de contaminantes en la solución fue de 19.6% y 32.67% para el Zn y Ni, respectivamente, lo cual marca una tendencia del concreto permeable con ACR a retener predominantemente los iones de Ni sobre los iones de Zn.

Se encontró que la máxima eficiencia de remoción tuvo lugar para la probeta con la concentración ACR-C8 con un 59.16% y 65.27% de remoción de Zn y Ni, respectivamente. Es de resaltar que, para esta solución resultante, se obtuvo la mayor concentración de Ca con 16.53 mg/l sugiriendo de manera parcial que la presencia de calcio en la solución promueve la remoción de los metales.

De manera análoga, se identificó que en la solución inicial ACR-C4 se obtuvieron los resultados menos favorables en cuanto a la remoción de los metales, que es preciso señalar, también es aquella cuya carga de contaminantes tuvo la mayor concentración inicial dentro del diseño central compuesto, con 22.5 mg/l de Zn y 22.5 mg/l de Ni. Los resultados de la concentración final de Zn en la solución fueron superiores a la concentración inicial, lo cual indica que lejos de remover este metal, la superficie se saturó, desprendiendo iones de Zn

con el filtrado del evento 10, dando lugar a un porcentaje de remoción negativo de -83.37% (desorción del contaminante) y un incremento de la concentración de Zn en la solución de 18.76 mg/l respecto a la concentración inicial (Figura 36).

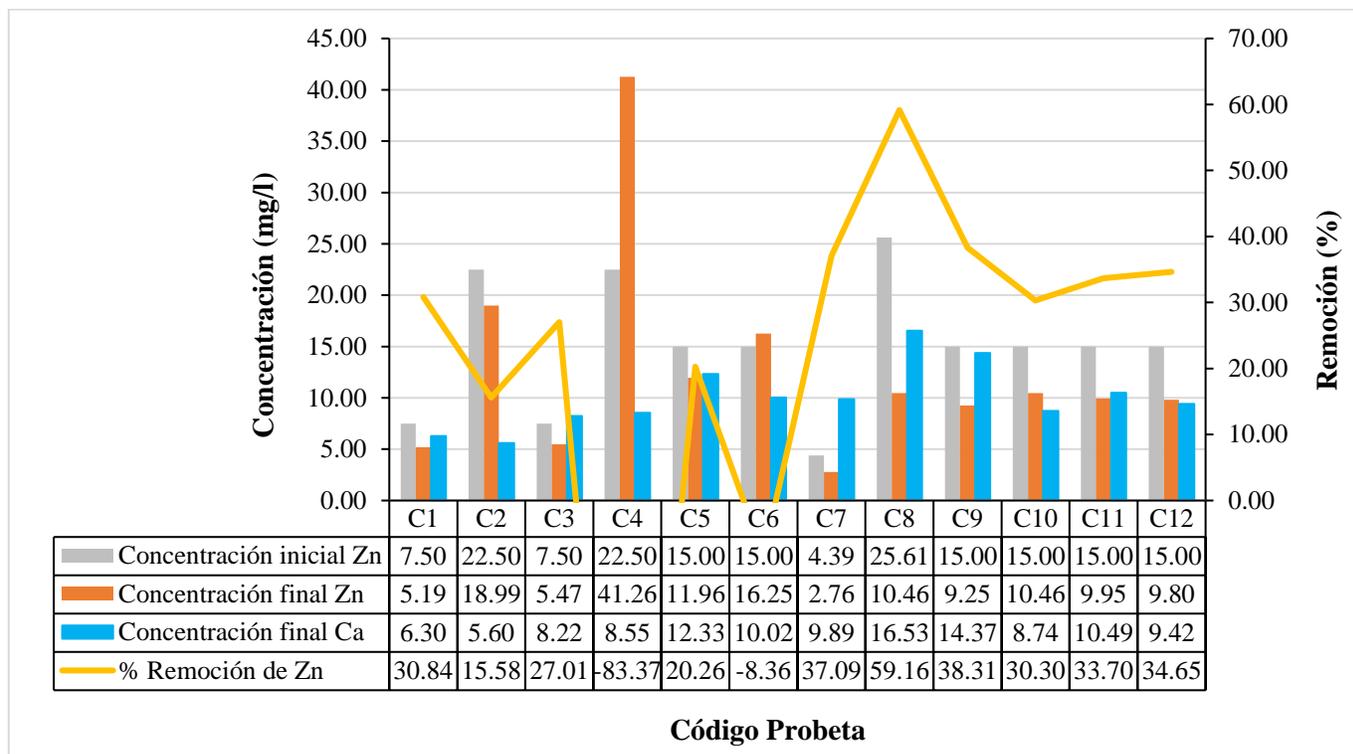


Figura 36.-Histograma de los resultados de remoción de Zn del concreto permeable con ACR

De manera similar, la remoción de Ni para ese ensayo fue la menor de todas (Figura 37), con un porcentaje de remoción del 14.07%, llegando a retener solo 3.17 mg/l de los 22.5 mg/l presentes en la solución inicial. Sin embargo, la concentración de calcio de 8.55 mg/l en la solución resultante no fue la menor de todos los resultados, pero sí se es la cuarta más baja dentro de la tabla, lo cual sigue proponiendo que la concentración de calcio en la solución influye en la remoción de Zn y Ni del concreto permeable, relación que se abordará más adelante.

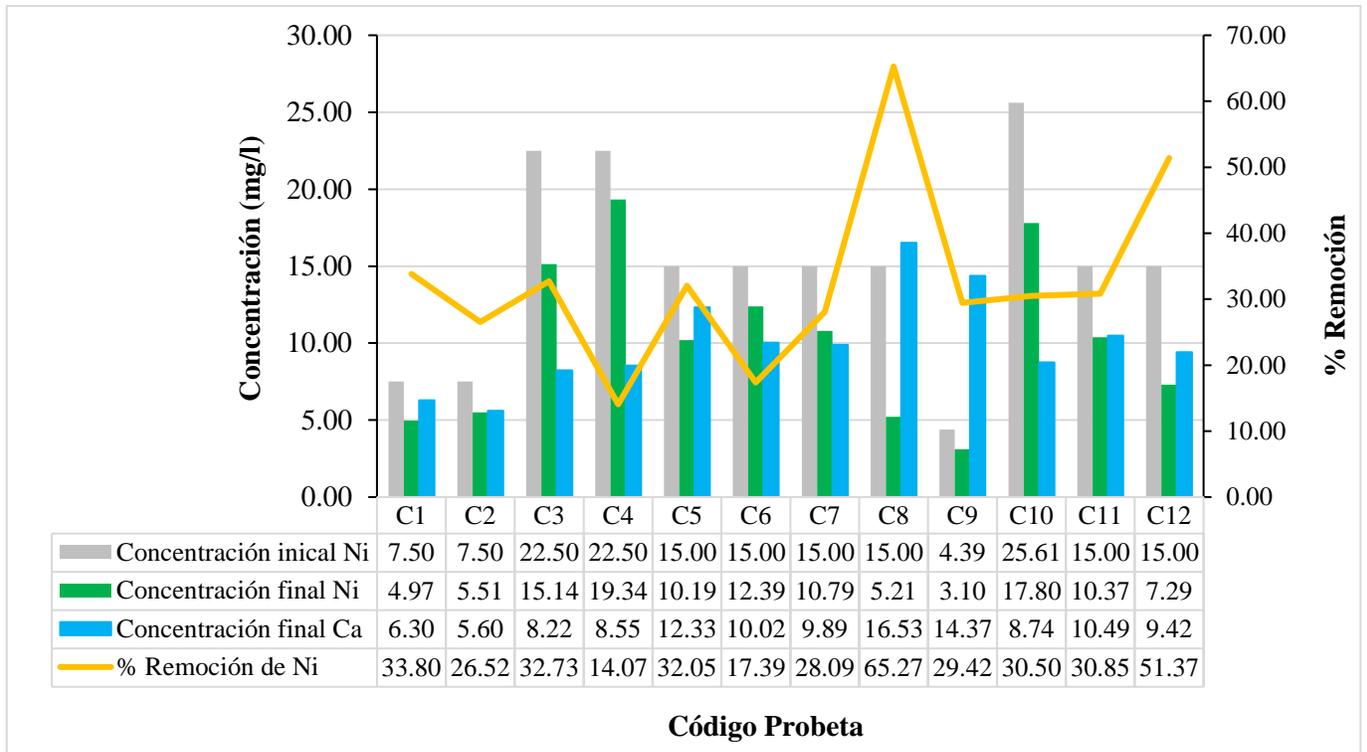


Figura 37.-Histograma de los resultados de remoción de Ni del concreto permeable con ACR

#### 4.7.1 Análisis Estadístico de la Superficie de Respuesta de Zn-Ni VS Remoción de Ni

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis de la superficie de respuesta con el diseño central compuesto realizado con el programa Rstudio, donde se estudió la influencia que tuvo la concentración inicial de Zn y Ni sobre el porcentaje de remoción de Ni en la solución final resultante posterior al filtrado del evento 10, así como sus relaciones de primer y segundo orden.

De la gráfica de curva de contornos de la Figura 38 y la superficie de respuesta de la Figura 39 se observa un comportamiento que aparentemente sugiere que a una concentración inicial de 15 mg/l de Ni, a mayor concentración de Zn se obtiene una mayor remoción del níquel, comportamiento que se atenúa al disminuir la concentración de Zn, y al aumentar o disminuir la de Ni, con relaciones de segundo orden observables en la curvatura de la superficie de

respuesta para ambos metales pesados. Siendo la concentración inicial de Ni de 15 mg/l la que obtuvo mejores resultados.

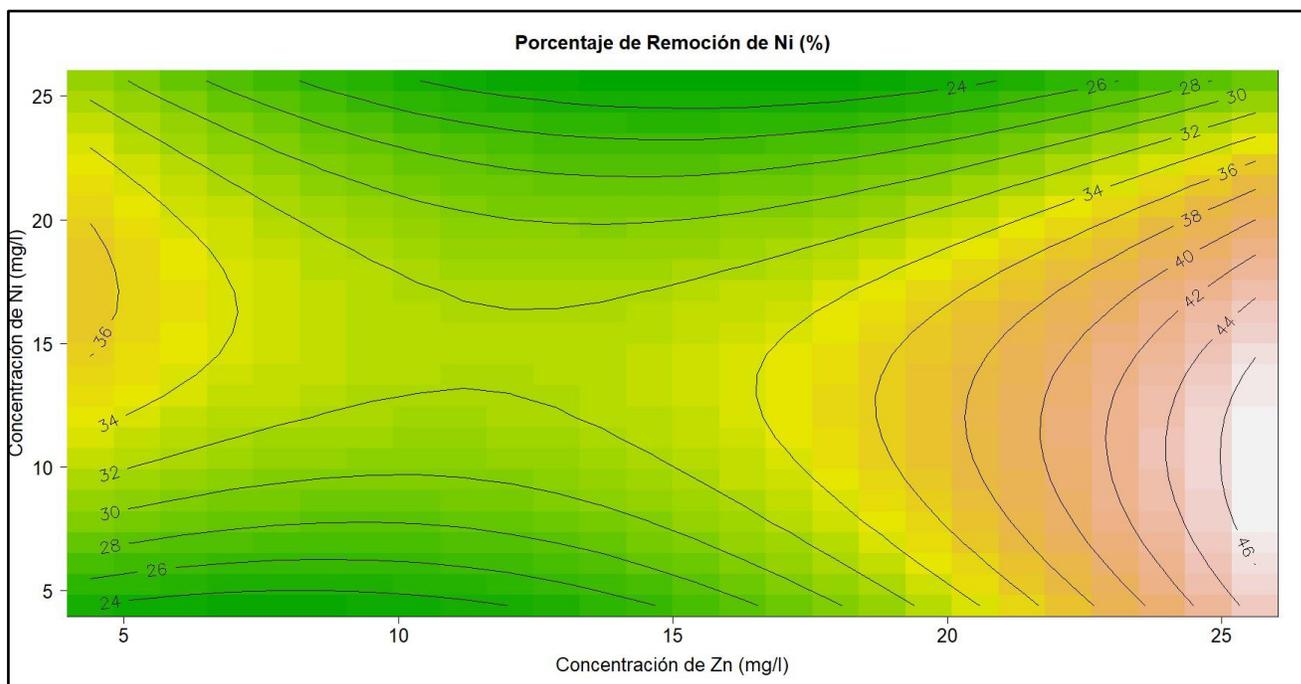


Figura 38.-Curvas de contorno de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Ni.

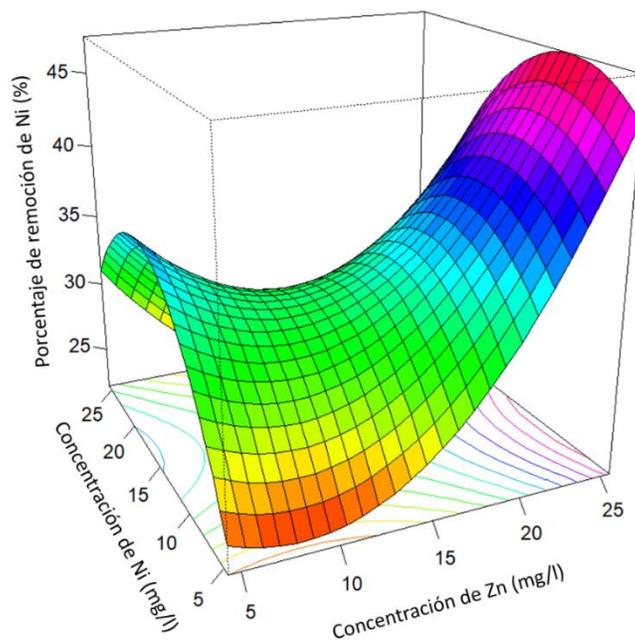


Figura 39.-Superficie de respuesta de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Ni.

Los resultados del análisis estadístico de la superficie de respuesta que se presentan en la Tabla 19, sugieren que la concentración de Zn y Ni en la solución no son estadísticamente significativos al momento de condicionar el porcentaje de remoción de Ni del CP con ACR, dado que el p-valor de los factores de control son muy superiores al nivel de significación de  $\alpha= 0.05$ .

Adicionalmente el p-valor = 0.89 de la regresión lineal respalda lo antes mencionado, ya que al ser mayor de 0.05, nos indica que los efectos de los coeficientes no influyeron en la cantidad de Ni removido por el concreto permeable.

*Tabla 19.-Regresión lineal de los datos experimentales Zn-Ni Vs % remoción de Ni.*

	<b>Coef. Estimado</b>	<b>Error</b>	<b>t valor</b>	<b>P valor</b>	
(Intercept)	32.915	8.2965	3.9673	0.007389	**
x1 (Zn)	3.3301	5.8665	0.5676	0.59087	
x2 (Ni)	-1.4991	5.8665	-0.2555	0.806846	
x1:x2	-2.845	8.2965	-0.3429	0.743356	
x1^2	3.9975	6.5589	0.6095	0.564561	
x2^2	-4.3625	6.5589	-0.6651	0.530692	

Multiple R-cuadrada: 0.2023, R-cuadrada ajustada : -0.4624, Estadístico-F: 0.3044 sobre 5 y 6 GL, p-valor: 0.8936.

A pesar de que las variables de la concentración inicial de Zn y Ni no son significativos, los coeficientes estimados de las relaciones de segundo orden de las variables (3.99 y -4.36 para el Zn y Ni, respectivamente), respaldan lo que gráficamente se describió con anterioridad; la concentración Zn aumenta la remoción de Ni con una tendencia cuadrática y la concentración inicial de Ni provoca una afectación negativa de segundo orden al momento de condicionar su remoción de Ni en la solución.

Tabla 20.-Análisis de la varianza Zn-Ni Vs % remoción de Ni.

	<i>GL</i>	<i>Suma cuad.</i>	<i>Med. cuad</i>	<i>F valor</i>	<i>P valor</i>
FO(x1,x2)	2	106.69	53.35	0.1938	0.8288
TWI(x1,x2)	1	32.38	32.38	0.1176	0.7434
PQ(x1,x2)	2	279.91	139.96	0.5083	0.6253
Residual	6	1651.95	275.33		
Lack of fit	3	1065.33	355.11	1.816	0.3181
Error Puro	3	586.63	195.54		

Como se expresa la Tabla 20, el valor de la varianza es de  $\sigma = \sqrt{195.54} = 13.98$ , esto nos indica la variación natural del experimento o del fenómeno, y por lo tanto aquellos valores absolutos de los coeficientes estimados de la Tabla 19 de cada factor superiores a la varianza ponderada se notará su influencia sobre el resultado, por lo que se comprueba estadísticamente que no hay evidencia de que las concentraciones iniciales utilizadas de Zn y Ni tengan un efecto notorio en la capacidad del concreto permeable con ACR para remover Ni de la solución de los filtrados en el evento 10.

#### **4.7.2 Análisis Estadístico de la Superficie de Respuesta de Zn-Ni VS Remoción de Zn**

De manera análoga se realizó el mismo procedimiento de superficie de respuesta analizando ahora la influencia de la concentración inicial de Zn y Ni en el porcentaje de remoción de Zn de los filtrados utilizando los cilindros de concreto permeable con ACR.

De las gráficas de curvas de contorno y superficie de respuesta de la Figura 40 y Figura 41 respectivamente, se observa una influencia más lineal que tiene las concentraciones iniciales del Zn y Ni en la remoción del Zn. Aunado a esto, se observa que la remoción de Zn es más sensible a la carga de contaminantes, es decir, que a mayor cantidad de Zn y Ni, menor será la capacidad del concreto para remover el Zn, inclusive hasta llegar a valores negativos en los cuales el concreto comienza a desapropiarse de los iones de Zn que retuvo en eventos anteriores.

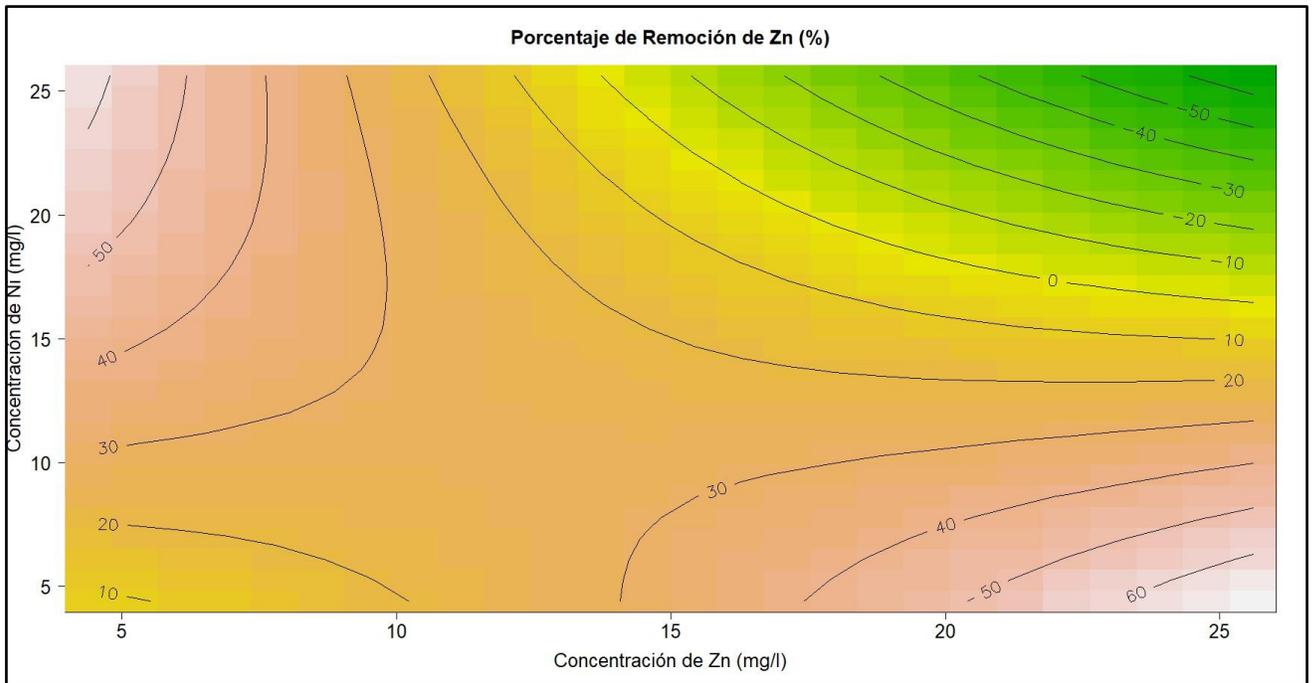


Figura 40.-Curvas de contorno de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Zn.

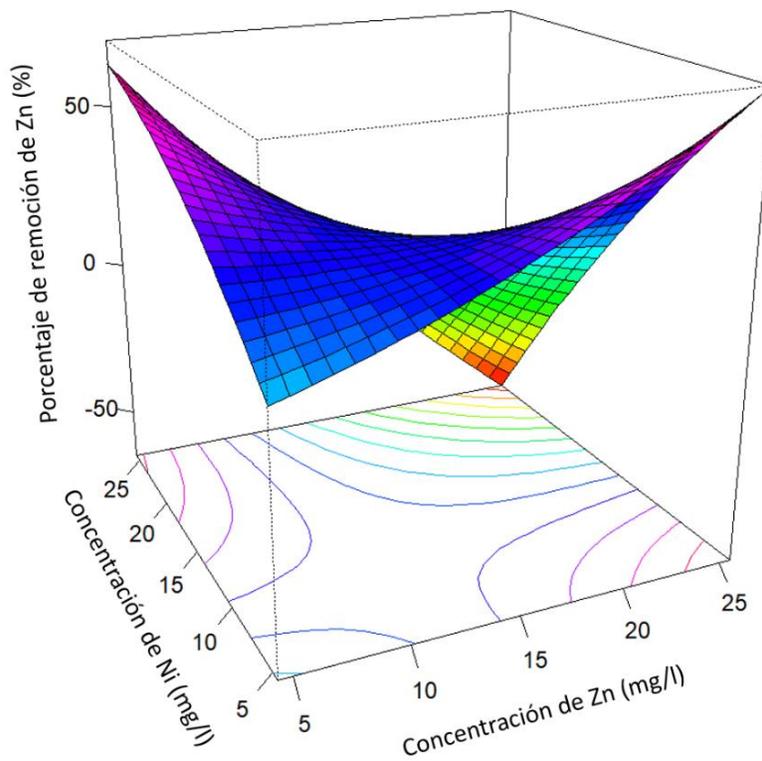


Figura 41.-Superficie de respuesta de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Zn.

Al igual que la superficie de respuesta del porcentaje de remoción de Ni, las variables de concentración inicial de metales pesados no condicionan de manera estadísticamente significativa la remoción de Zn, debido que el p-valor de los factores de control presentados en la Tabla 21 son superiores al nivel de significación de  $\alpha= 0.05$ .

*Tabla 21.-Regresión lineal de los datos experimentales Zn-Ni Vs % remoción de Zn.*

	<b><i>Coef. Estimado</i></b>	<b><i>Error</i></b>	<b><i>t valor</i></b>	<b><i>P valor</i></b>
(Intercept)	20.0625	19.5222	1.0277	0.3437
x1(Zn)	-11.8035	13.8043	-0.8551	0.4253
x2 (Ni)	-14.2635	13.8043	-1.0333	0.3413
x1:x2	-23.78	19.5222	-1.2181	0.2689
x1^2	3.1063	15.4336	0.2013	0.8471
x2^2	-3.8037	15.4336	-0.2465	0.8135

Multiple R-cuadrada: 0.3623, R-cuadrada ajustada: -0.1691, Estadístico-F: 0.6817 sobre 5 y 6 GL, p-valor: 0.6545

Cabe resaltar que dentro de las Tabla 20 y Tabla 22, la prueba de ajuste del modelo, lack of fit, para la superficie de respuesta, tanto para la remoción de Ni como para la remoción de Zn es superior a  $\alpha= 0.05$ , por lo que se podría afirmar que ambos modelos ajustan de manera adecuada con los datos obtenidos de las concentraciones finales de los metales en cuestión.

*Tabla 22.-Análisis de la varianza Zn-Ni Vs % remoción de Zn.*

	<b><i>GL</i></b>	<b><i>Suma cuad.</i></b>	<b><i>Med. cuad</i></b>	<b><i>F valor</i></b>	<b><i>P valor</i></b>
FO(x1,x2)	2	2742.2	1371.08	0.8994	0.45538
TWI(x1,x2)	1	2262	2261.95	1.4838	0.26891
PQ(x1,x2)	2	192.3	96.14	0.0631	0.93949
Residual	6	9146.8	1524.46		
Lack of fit	3	7940.1	2646.71	6.5803	0.07804
Error Puro	3	1206.7	402.22		

### 4.7.3 Análisis Estadístico de la Superficie de Respuesta de Zn-Ni VS Remoción de Contaminantes

Se repitió el análisis de superficie de respuesta, en que ahora se relaciona la concentración inicial de los metales como variables, con la remoción total del Zn y Ni dentro de la solución posterior a haber sido filtrada en el evento 10. En términos generales, las gráficas de superficie de respuesta y curvas de contornos exhiben un comportamiento muy similar a la remoción particular de Zn, en la influencia de las variables de carácter lineal, y por tener una tendencia que a bajas concentraciones conjuntas de Zn y Ni genera baja remoción total de los mismos. Sin embargo, a concentraciones superiores a 20 mg/l de cada contaminante, su remoción comienza a ser negativa, siendo incapaz el concreto permeable de remover de la solución los metales pesados, lo cual se ejemplifica con la concentración C4 (22.5 mg/l de Zn y 22.5 mg/l de Ni).

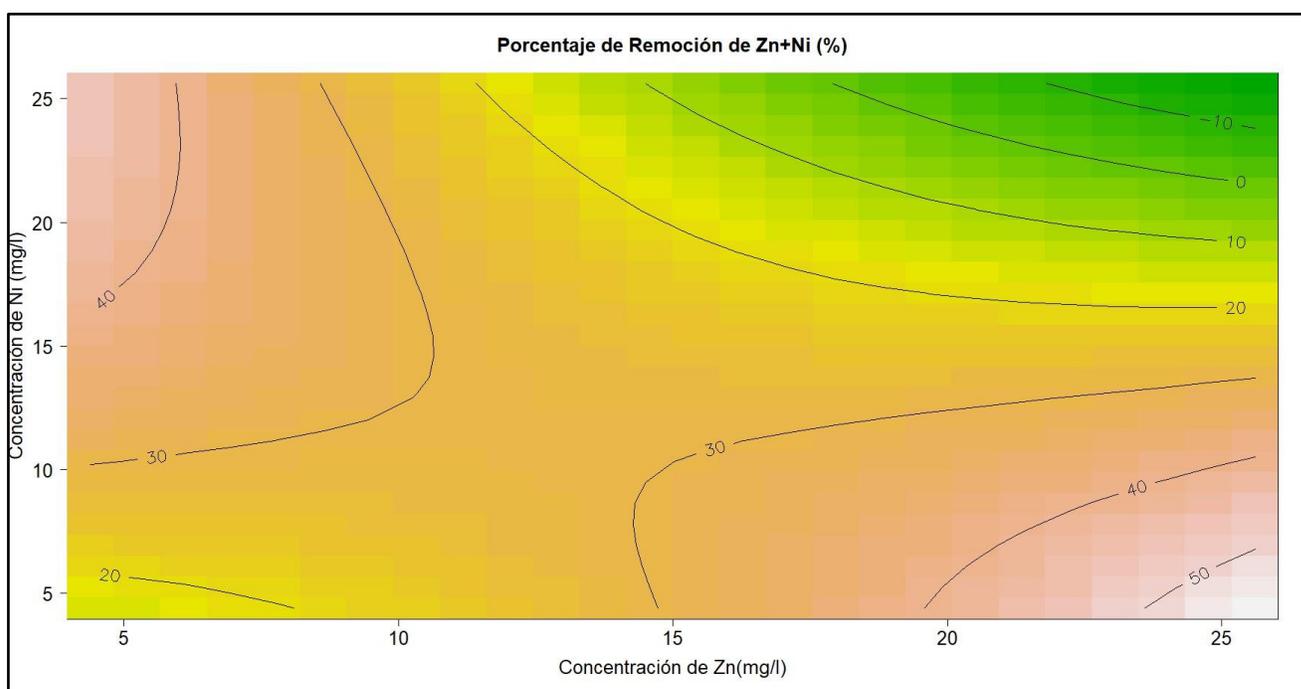


Figura 42.-Curvas de contorno de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Zn+Ni.

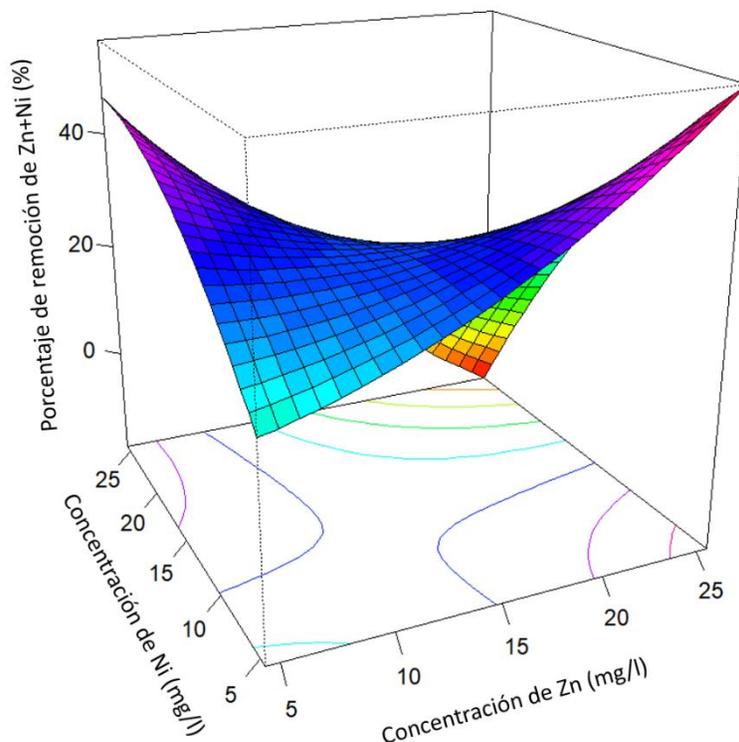


Figura 43.-Superficie de respuesta de la concentración de Zn-Ni Vs % remoción de Zn+Ni.

Tabla 23.-Regresión lineal de los datos experimentales Zn-Ni Vs % remoción de Zn+Ni.

	<b>Coef. Estimado</b>	<b>Error</b>	<b>t valor</b>	<b>P valor</b>
(Intercept)	26.4875	13.7215	1.9304	0.1018
x1 (Zn)	-4.4624	9.7025	-0.4599	0.6618
x2 (Ni)	-7.7864	9.7025	-0.8025	0.4529
x1:x2	-12.9875	13.7215	-0.9465	0.3804
x1^2	2.7069	10.8478	0.2495	0.8113
x2^2	-3.4981	10.8478	-0.3225	0.758

Analizando los resultados de las Tabla 23 y Tabla 24, no es de extrañar, que de igual manera los valores de p de los factores de control no son menores a 0.05, ni los valores absolutos de los coeficientes estimados de cada factor son superiores a la varianza ( $\sigma = 16.21$ ), por lo que para las concentraciones iniciales usadas en el diseño central compuesto no son significativas al condicionar la remoción total de los metales pesados en la solución, y que la variabilidad de los resultados corresponde a la variación natural del experimento.

Tabla 24.-Análisis de la varianza Zn-Ni Vs % remoción de Zn+Ni.

	<i>GL</i>	<i>Suma cuad.</i>	<i>Med. cuad</i>	<i>F valor</i>	<i>P valor</i>
FO(x1,x2)	2	644.3	322.17	0.4278	0.6704
TWI(x1,x2)	1	674.7	674.7	0.8959	0.3804
PQ(x1,x2)	2	155.7	77.84	0.1034	0.9034
Residual	6	4518.7	753.11		
Lack of fit	3	3729	1243	4.7222	0.1173
Error puro	3	789.7	263.22		

## 4.8 Retención de Metales Pesados del Concreto Permeable con AN

En la Tabla 25 se indican las concentraciones finales de la solución filtrada posterior al evento 10 para las concentraciones C3, C4 y C8 de los cilindros de AN y ACR, para comparar si el concreto permeable con ACR presenta una mejor retención de los metales pesados de estudio, en comparación con el concreto permeable con AN.

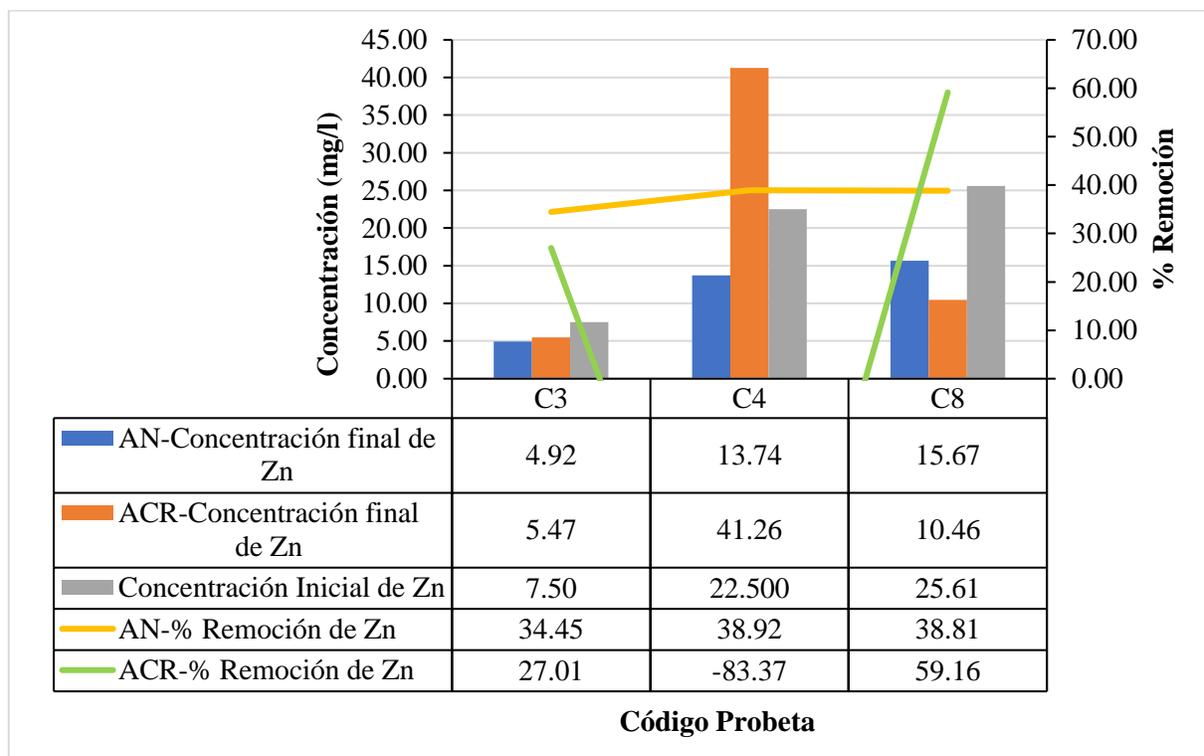
Tabla 25.-Tabla resumen de las concentraciones iniciales y finales de Zn, Ni y Ca y su remoción en la solución del concreto permeable con AN y ACR.

<i>Código de probeta</i>	<i>Concentración inicial (mg/l)</i>		<i>Concentración final (mg/l)</i>			<i>% Remoción</i>		<i>Remoción (mg/l)</i>	
	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Ca</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>
AN-C3	7.50	22.50	9.02	4.92	18.32	34.45	18.60	2.58	4.19
AN-C4	22.50	22.50	23.19	13.74	16.71	38.92	25.72	8.76	5.79
AN-C8	25.61	15.00	22.47	15.67	11.24	38.81	25.04	9.94	3.76
ACR-C3	7.50	22.50	8.22	5.47	15.14	27.01	32.73	2.03	7.37
ACR-C4	22.50	22.50	8.55	41.26	19.34	-83.37	14.07	-18.76	3.17
ACR-C8	25.61	15.00	16.53	10.46	5.21	59.16	65.27	15.15	9.79

Es importante recordar, que las concentraciones C3, C4 y C8 fueron aquellas en las cuales el concreto permeable con ACR obtuvieron una retención promedio, menor y mayor, respectivamente.

La Figura 44 muestra como la concentración final del Zn para los cilindros con AN es menor para las concentraciones C3 y C8, posicionando al concreto permeable con ACR con mejores

propiedades para la remoción del Zn. Sin embargo, para la concentración C4, la remoción del cilindro con AN obtuvo una remoción superior del Zn, respecto al concreto con ACR.



*Figura 44.-Histograma de los resultados de remoción de Zn del concreto permeable con AN VS ACR.*

Un comportamiento similar se presentó en la remoción del Ni al hacer la comparativa de los AN con ACR, para las concentraciones C3 y C8 el concreto con ACR obtuvieron una remoción superior de hasta un 75.9% y 160.37%, respectivamente, en comparación a su homólogo de AN. De igual manera el cilindro C4 de ACR presentó una menor retención de Ni en hasta un 82.64% con respecto al cilindro con AN, pero sin llegar a presentar concentraciones finales de Ni superiores a la concentración inicial, es decir, sin aumentar la presencia de Ni en la solución como paso en el Zn.

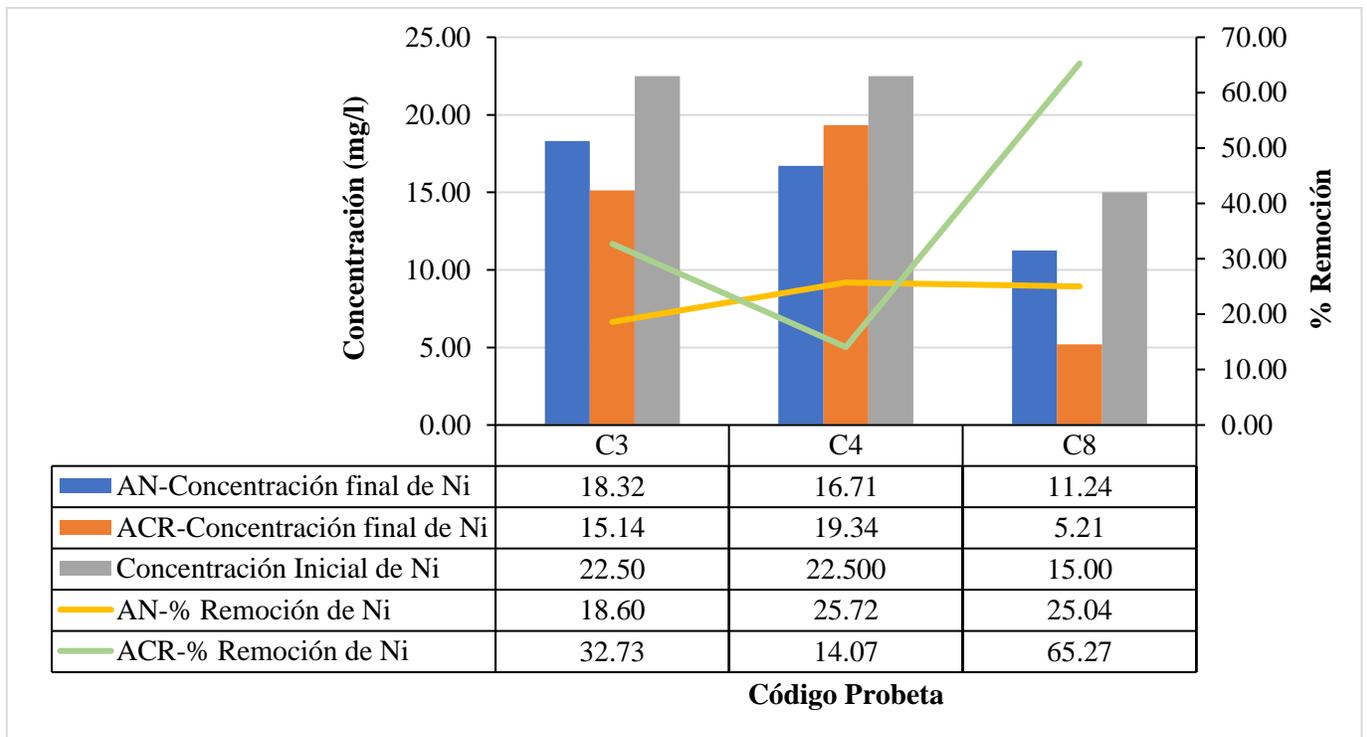


Figura 45.-Histograma de los resultados de remoción de Ni del concreto permeable con AN VS ACR.

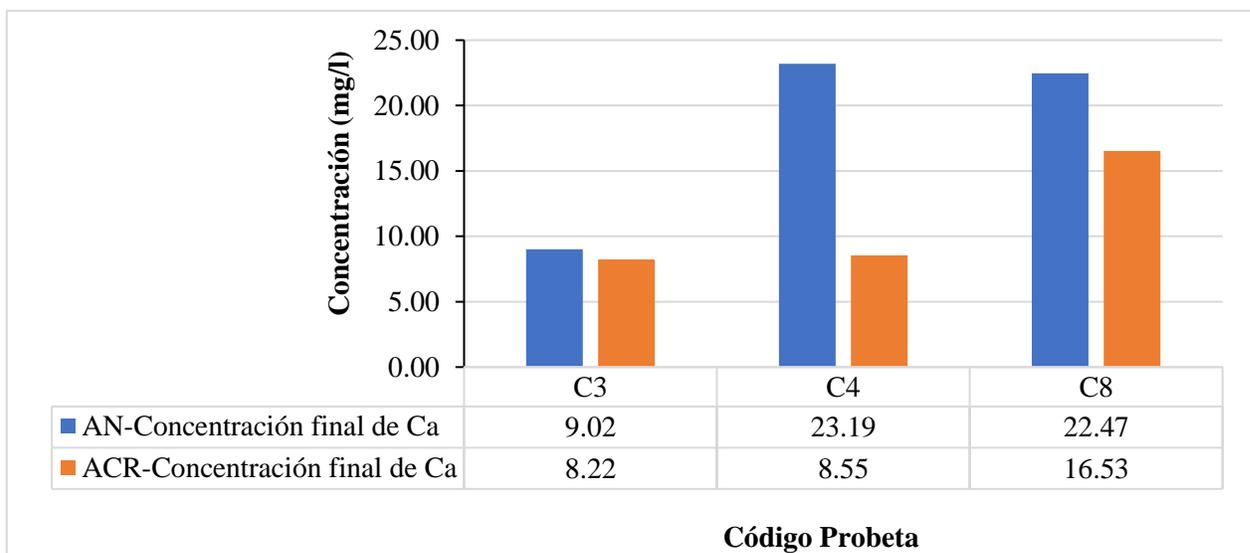


Figura 46.-Histograma de la concentración final de calcio en la solución del concreto permeable con AN VS ACR.

En la Figura 46 se muestra la concentración de calcio en la solución posterior al filtrado del evento 10 para el concreto con ACR y AN. Es evidente que la concentración de calcio fue superior en la solución resultante del concreto con AN en un 9.73%, 171.22% y 35.93% para las concentraciones C3, C4 y C8, respectivamente, en comparación a la del concreto con ACR. Este aumento de calcio se le atribuye al tipo de agregados utilizado, ya que se utilizó la misma cantidad de cemento Portland por m<sup>3</sup> de concreto en el diseño de mezcla con ACR y AN, además de haber sido curado en igualdad de condiciones.

Es de recalcar que a mayor cantidad de Ca en la solución resultante del concreto de AN, mayor el desempeño de remoción de la concentración total de contaminantes, lo que sugiere que su capacidad de remover estos metales a tales concentraciones está regida de manera parcial por la cantidad de iones de calcio que lixivia el concreto permeable; comportamiento que no comparte el concreto con ACR, que pudiera estar regido principalmente su capacidad por otras variables o combinación de las mismas.

#### 4.9 Cinética de Remoción de Metales Pesados

Para la identificación de la cinética de adsorción de Zn y Ni sobre la superficie del concreto permeable con ACR, se estudió la evolución de la concentración de Zn, Ni y Ca respecto a cada uno de los eventos de filtrado. Las condiciones iniciales, fueron dadas por la concentración C8, la cual dicta una concentración inicial de 25.61 mg/l y 15 mg/l de Zn y Ni, respectivamente. En la Tabla 26 se muestran los resultados de dichas concentraciones.

*Tabla 26.- Resultados del experimento de cinética de remoción de Zn y Ni del concreto permeable con ACR.*

<i>Evento</i>	<i>Concentración (mg/l)</i>			<i>Remoción (%)</i>		<i>Remoción (mg/l)</i>	
	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Ca</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>	<b>Zn</b>	<b>Ni</b>
Inicial	25.61	15		0.0	0.0	0.0	0.0
E1	19.003	12.025	28.866	25.8	19.8	6.6	3.0
E3	15.223	9.693	34.576	40.6	35.4	10.4	5.3
E5	15.149	8.24	34.537	40.8	45.1	10.5	6.8
E10	15.112	6.29	41.09	41.0	58.1	10.5	8.7
E15	14.472	4.647	43.543	43.5	69.0	11.1	10.4
E20	15.063	3.748	43.543	41.2	75.0	10.5	11.3

Al observar las concentraciones resultantes de cada uno de los eventos de filtrado, los resultados sugieren una vez más que el concreto remueve con mejor desempeño el Ni que el Zn, ya que alcanzó a remover hasta un 75% del Ni, en comparación a un 41.2% de remoción de Zn; habiendo removido al final del experimento (evento 20) el 53.7% de los contaminantes, es decir, 21.8 mg/l de Zn y Ni de la solución inicial.

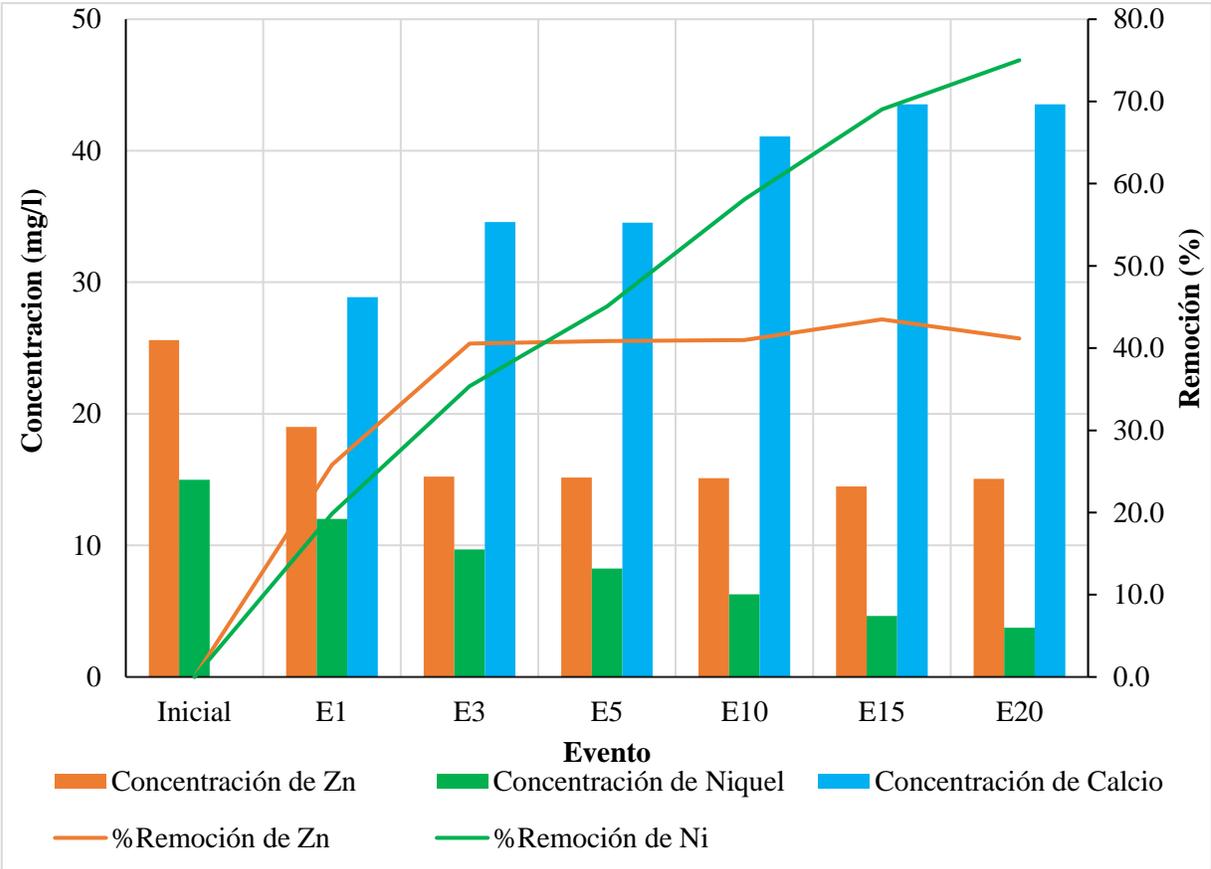


Figura 47.-Histograma del experimento de cinética de remoción de Zn y Ni del concreto permeable con ACR.

De manera visual en la Figura 47 se puede observar que prácticamente a partir del evento 5, la curva de concentración de Zn en la solución logra estabilizarse a valores cercanos a 15 mg/l hasta el final del experimento. Para el caso del Ni, los resultados de las concentraciones indican que aún en el evento 20, el concreto continúa removiendo de manera sustancial el Ni dentro de la solución no logrando llegar a la concentración en el equilibrio.

Adicionalmente, se observa un aumento paulatino en la concentración de Ca entre cada uno de los filtrados hasta llegar a una concentración constante en el evento de filtrado 15 y 20 de 43.54 mg/l dentro de la solución, lo que sugeriría que la lixiviación de calcio para este experimento se detuvo en el evento de filtrado 15. El origen de la presencia de calcio en la solución se explica a mayor detalle en subcapítulos posteriores.

#### 4.9.1 Ajuste de los Modelos de Cinética de Adsorción por Evento

Dado los resultados de la evolución de la concentración de los metales pesados, se procedió a ajustar el modelo matemático de Lagergren y el de pseudo segundo orden, calculando las variables de la capacidad en el equilibrio (se tomó en cuenta la masa del cilindro de 2.426 kg) y la constante de cinética de primer y segundo orden para el Zn y Ni, que mejor describan los resultados experimentales, obteniendo su coeficiente de determinación  $R^2$  para medir el ajuste entre las proyecciones del modelo y los datos experimentales.

Los parámetros de las ecuaciones de cinética calculadas con mejor ajuste se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27.- Parámetros de las ecuaciones cinéticas de pseudo 1er orden y pseudo 2do orden por contaminante.

Contaminante	Concentración inicial (mg/l)	Pseudo 1er orden			Pseudo 2do orden		
		$q_e$ (mg/l)/kg	$K_1$ (evento <sup>-1</sup> )	$R^2$	$q_e$ (mg/l)/kg	$K_2$ (evento <sup>-1</sup> )	$R^2$
Zn	25.61	4.420	0.977	0.996	4.708	0.353	0.984
Ni	15	4.482	0.206	0.980	5.553	0.0386	0.992

Es importante mencionar que la modelación de estas ecuaciones comúnmente es aplicada en función del tiempo de contacto del contaminante con el sólido adsorbente. Sin embargo, dado que durante la experimentación no se tomó en cuenta el tiempo de contacto de la solución con el concreto permeable, el ajuste de los modelos cinéticos se realizó respecto al número de eventos, dando como resultado proyecciones por número de eventos de filtrado que el concreto puede desempeñar respecto a su efecto de remoción de los metales y no en función al tiempo de contacto con ellos.

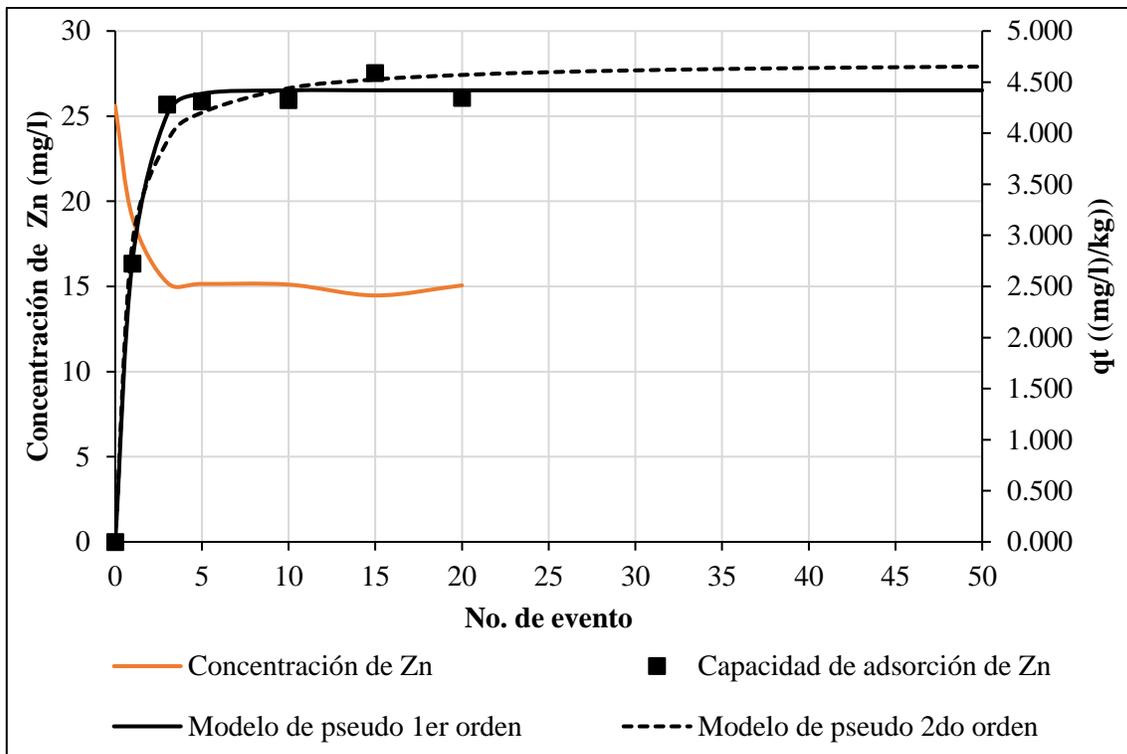


Figura 48.-Curvas de tendencia de la capacidad de adsorción de Zn del CP con ACR y la concentración de Zn por evento y sus ajustes para el modelo de pseudo primer y segundo orden.

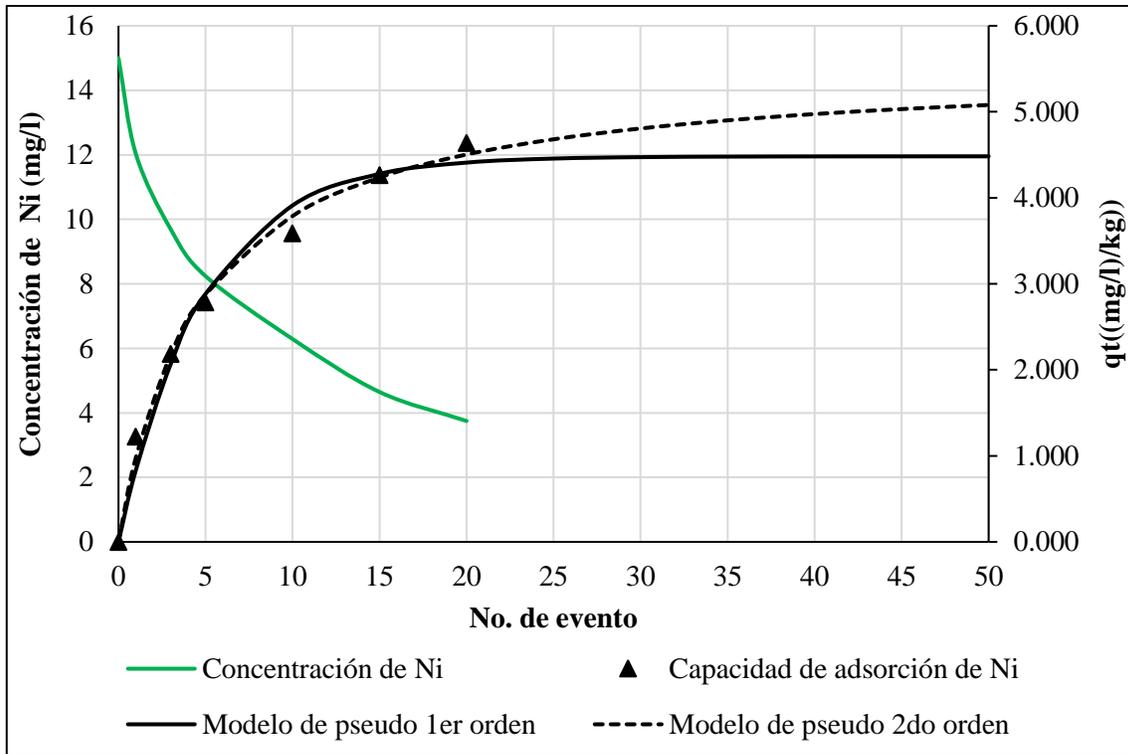


Figura 49.-Curvas de tendencia de la capacidad de adsorción de Ni del CP con ACR y la concentración de Ni por evento y sus ajustes para el modelo de pseudo primer y segundo orden.

La Figura 48 y Figura 49 muestran la capacidad de adsorción del concreto permeable para cada contaminante, así como la variación de su concentración en la solución en cada uno de los eventos de filtrado. De manera visual se puede ver que modelo tiene mejor ajuste con los datos experimentales, de igual manera, analíticamente con el coeficiente de determinación de cada modelo se establece cual tuvo mejor ajuste a los datos experimentales. Encontrando que el modelo de Lagergren describe mejor la cinética de adsorción de Zn y el modelo de pseudo segundo orden se ajusta mejor a los datos experimentales de la cinética de adsorción de Ni.

Dado que el modelo de Lagergren, ajusta mejor al fenómeno de adsorción por la formación de monocapa entre los centros activos de adsorbente, se propone que el mecanismo de remoción de Zn del concreto permeable con ACR predominante es la quimio adsorción. Por otro lado, la formación de una multicapa de iones metálicos depositados sobre la superficie adsorbente, se explica de manera más consistente con un modelo cinético de pseudo segundo

orden, por lo que se determina que probablemente el mecanismo predominante en la remoción de Ni en la solución fue mediante una adsorción física. (Castellan, 1987; Pinzón-Bedoya y Villamizar, 2009; Salgado, 2011; Castro et al., 2014; P. Atkins, 2016; Tubert y Talanquer, 2018).

$$q_t = 4.42(1 - e^{(-0.977t)}) \quad (26)$$

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{0.0386 + 5.553^2} + \frac{t}{5.553}} \quad (27)$$

Las expresiones matemáticas que mejor describen el comportamiento de cinética de adsorción para el Zn y Ni, dadas las condiciones del experimento, se muestran en las ecuaciones 26 y 27, respectivamente, donde “t” representa el número de eventos de filtrado.

#### **4.10 Contenido de Calcio en la Solución**

La presencia de calcio en la solución resultante de los filtrados tanto para el CP con ACR y con AN, puede explicarse debido a la composición misma de la pasta de cemento; como se ha señalado con anterioridad en el Capítulo 1, sección 1.3 Antecedentes, los principales productos de la hidratación del cemento, son el silicato de calcio hidratado y el hidróxido de calcio, este último, constituye de un 25%-30% de la masa de la pasta de cemento, además de ser el más soluble y reactivo entre los otros productos resultantes de la hidratación del cemento, lo que lo hace más susceptible a ser lixiviado de la matriz sólida de la pasta de cemento y de la pasta de cemento vieja, para el caso de los agregados reciclados (Lamond & Pielert, 2006; Shabalala et al., 2017).

Adicionalmente, la aportación de calcio en la solución también pudo deberse probablemente al fenómeno de eflorescencia, en la cual, los depósitos blancos polvorientos entre los poros del concreto permeable, como se muestra en la Figura 50 y Figura 51, son presumiblemente carbonato de calcio entre otros sulfatos y sales, y son procedentes de los minerales disueltos en el agua potable con la que fue elaborada y curada la mezcla y que se depositaron entre los poros una vez evaporada el agua, que finalmente fueron lavados en el proceso de los filtrados

y depositados en la solución de estudio recuperada para cada cilindro de concreto permeable(Lamond & Pielert, 2006).



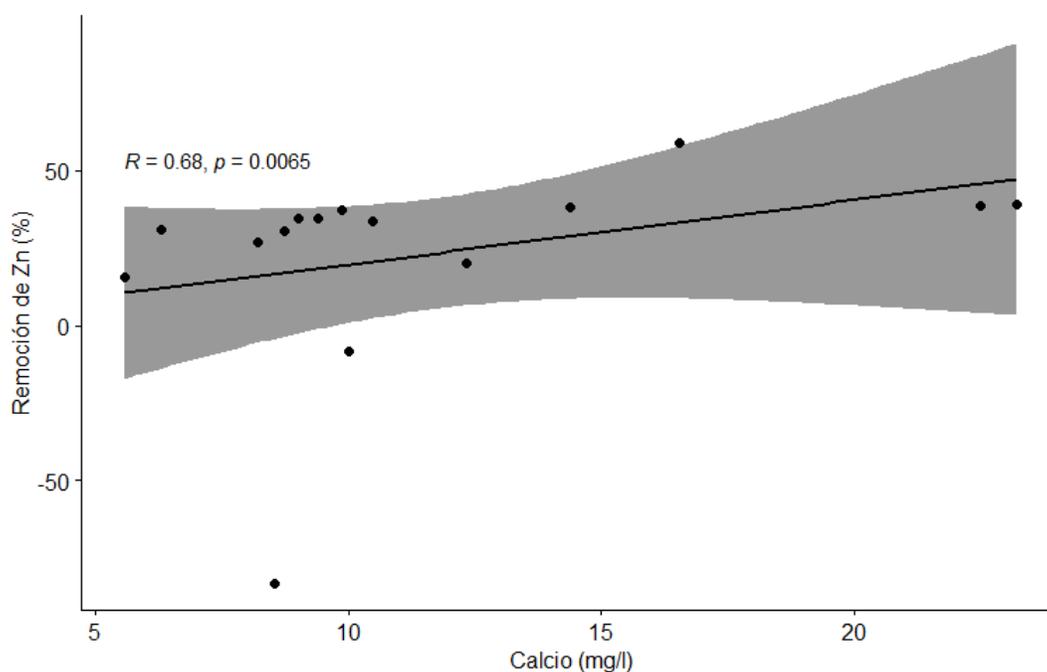
*Figura 50.-Eflorescencia en cilindro de concreto permeable AN-Control.*



*Figura 51.-Eflorescencia en cilindro de concreto permeable ACR-Control.*

Al comparar el contenido de calcio en la solución resultante de los filtrados del CP con ACR y AN con la capacidad del concreto para remover el Zn y Ni, se encontró que existe una

relación significativa en el porcentaje de adsorción del Zn. Al realizar una correlación lineal no paramétrica de *Spearman*, dado que los datos no tienen una distribución normal, se confirma que existe una correlación positiva fuerte, como lo ilustra la Figura 52, con un coeficiente de correlación de *Spearman*  $R= 0.68$ , y con  $p\text{-valor}= 0.0065$  altamente significativo. Los resultados del análisis estadístico mostraron que a mayor concentración de calcio en la solución final, mayor fue la remoción de Zn durante los filtrados, subrayando que no se encontró el mismo comportamiento respecto a la remoción de Ni, al menos no de manera estadísticamente significativa.



*Figura 52.-Diagrama de dispersión y de correlación lineal no paramétrica de la concentración de calcio con el porcentaje de remoción de Zn*

Dentro de las limitaciones del análisis elemental por espectrometría de absorción atómica, se destaca que no se distingue los estados de oxidación o los compuestos en los que se encuentran los elementos de estudio (Amador, 2010). Por lo anterior, dentro de los resultados, solo se puede cuantificar la cantidad de Zn y Ni que fueron adsorbidos en la superficie de la matriz sólida del concreto permeable, sin tomar en cuenta si dentro de la solución recuperada para el análisis, tuvo lugar la estabilización de los contaminantes metálicos mediante el

intercambio iónico y la formación de nuevos compuestos, entre ellos la formación de sus hidróxidos.

## 4.11 Resistencia a la Compresión

Los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión posterior a la prueba de filtrados se muestran en la Tabla 28.

*Tabla 28.- Resultados de la resistencia a compresión de los cilindros de CP con ACR posterior a los filtrados.*

<i>Probeta</i>	<i>Concentración (mg/L)</i>		<i>Resistencia a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</i>	
	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Individual</i>	<i>Promedio</i>
ACR C1	7.500	7.500	68.40	
ACR C2	22.500	7.500	66.07	
ACR C3	7.500	22.500	47.53	
ACR C4	22.500	22.500	51.01	
ACR C5	15.000	15.000	46.36	
ACR C6	15.000	15.000	48.69	
ACR C7	4.393	15.000	42.90	
ACR C8	25.607	15.000	66.07	
ACR C9	15.000	4.393	53.32	49.41
ACR C10	15.000	25.607	48.69	
ACR C11	15.000	15.000	55.65	
ACR C12	15.000	15.000	48.69	
ACR AD	0.000	0.000	40.57	
ACR AP	0.000	0.000	41.73	
ACR Cinética	25.607	15.000	37.09	
ACR Control	0.00	0.00	27.82	
AN C3	7.500	22.500	62.59	
AN C4	22.500	22.500	73.36	
AN C8	25.607	15.000	57.96	59.37
AN AD	0.000	0.000	52.17	
AN AP	0.000	0.000	47.53	
AN Control	0.000	0.000	62.59	

La resistencia de la mezcla de concreto permeable a base de 100% de ACR va de 27.82 kg/cm<sup>2</sup> a 68.4 kg/cm<sup>2</sup>, presentando una resistencia promedio de 49.41 kg/cm<sup>2</sup>. De modo que la sustitución total de agregados naturales por ACR redujo la resistencia a compresión del CP en 16.77%, en promedio, respecto al concreto permeable con AN.

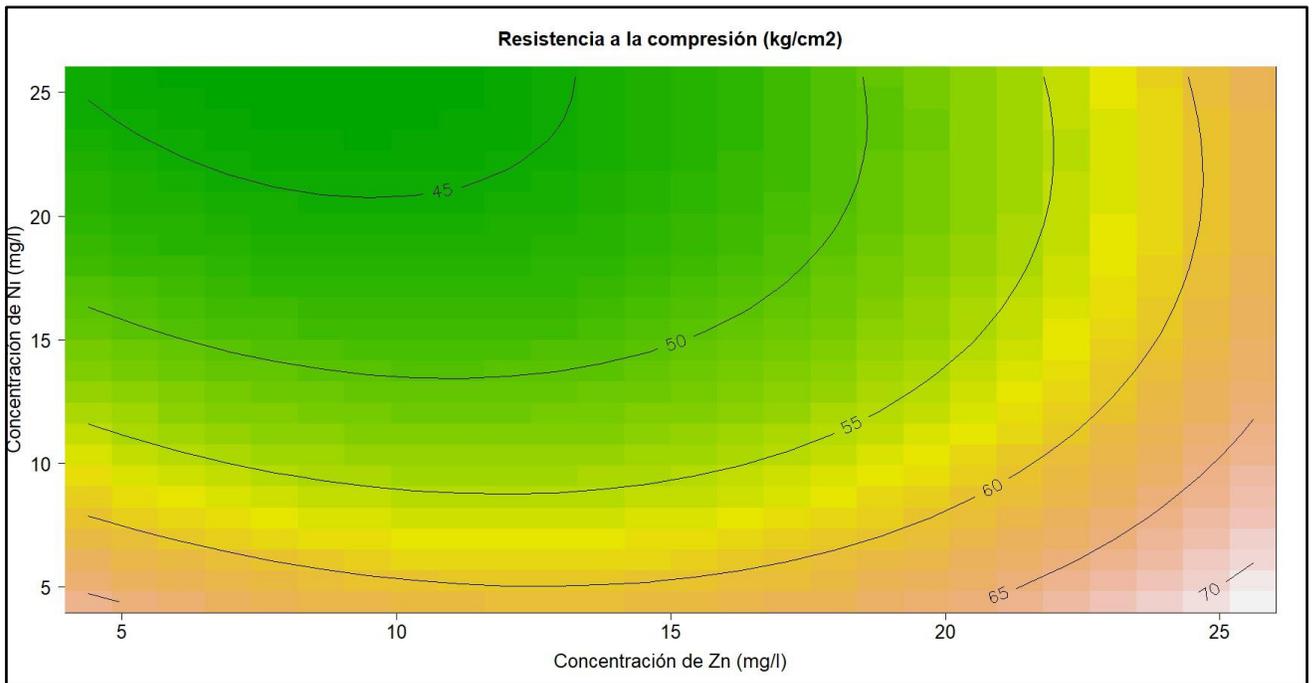
En la literatura se reporta que una de las causas de la reducción de la resistencia a la compresión, se debe a la doble zona de transición interfacial entre la pasta de cemento y los agregados, además que la primera zona de transición interfacial, es decir, la de concreto viejo presente en los ACR, se ve afectada por el proceso de trituración, aumentando la microfisuración de este. Lo anterior se hace evidente en la Figura 53, donde los planos de falla del concreto luego de ser ensayado a compresión simple se presentan en las zonas donde se encuentra mayor cantidad de concreto viejo



*Figura 53.- Fragmento de cilindro de concreto permeable con ACR posterior al ensayo a compresión simple.*

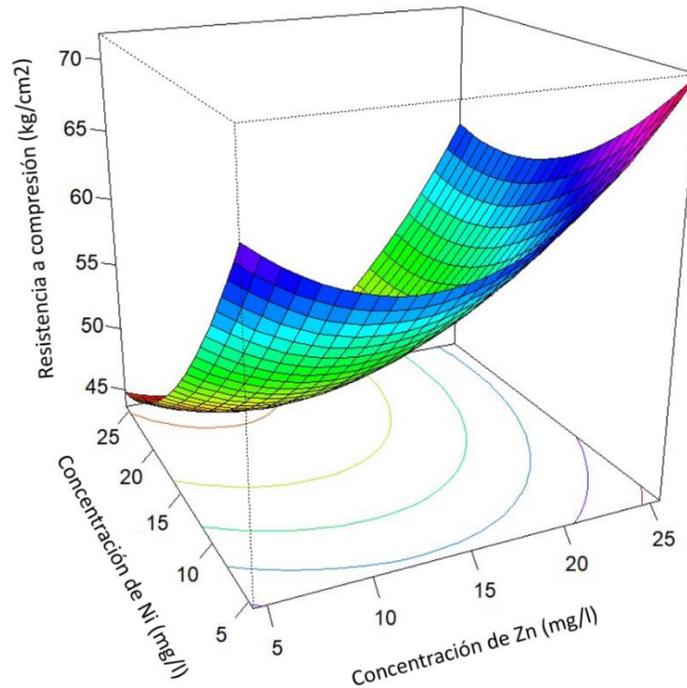
#### **4.11.1 Relación de Exposición Zn y Ni con la Resistencia a la Compresión**

En el software Rstudio se realizó el modelo de la superficie de respuesta que relaciona la concentración de Zn y Ni correspondientes al diseño central compuesto y los resultados de los ensayos a compresión simple de los cilindros que fueron sometidos a los filtrados.



*Figura 54.- Curvas de contorno de la concentración de Zn-Ni Vs resistencia a compresión del concreto.*

De la Figura 54 se puede deducir que a mayor concentración de Zn y menor concentración de Ni dentro de la solución filtrada, mayor es la resistencia a compresión del concreto permeable con ACR y, por el contrario, a mayor cantidad de Ni y menor de Zn, menor la resistencia a compresión del concreto. De igual manera, en la superficie de respuesta, en la Figura 55, se exhibe gráficamente este comportamiento. Sin embargo, con el análisis estadístico se refuta parcialmente este comportamiento.



*Figura 55.-Superficie de respuesta de la concentración de Zn-Ni Vs resistencia a compresión del concreto.*

En la Tabla 29 se muestran los factores de control (Zn=  $x_1$ , Ni=  $x_2$ ) con sus respectivos coeficientes estimados del modelo de superficie de respuesta, de modo que, con este análisis de regresión lineal de los datos experimentales, se busca determinar si la concentración de Zn y Ni en la solución filtrada, así como sus relaciones de primer y segundo orden, son factores que modifican la resistencia del concreto permeable con ACR.

*Tabla 29.- Regresión lineal de los datos experimentales Zn-Ni Vs resistencia a la compresión.*

	<b>Coef. Estimado</b>	<b>Error</b>	<b>t valor</b>	<b>P valor</b>	
(Intercept)	49.8475	3.7752	13.204	1.17E-05	***
x1(Zn)	4.2397	2.6695	1.5882	0.16334	
x2(Ni)	-5.3097	2.6695	-1.9891	0.09384	.
x1:x2	1.4525	3.7752	0.3847	0.71369	
x1^2	3.6956	2.9845	1.2383	0.26187	
x2^2	1.9556	2.9845	0.6553	0.5366	

Multiple R-cuadrada: 0.5814, R-cuadrada ajustada: 0.2326, Estadístico-F: 1.667 sobre 5 y 6 GL, p-valor: 0.275.

Los resultados del análisis estadístico de la superficie de respuesta sugieren que la concentración de Zn y Ni en la solución no son estadísticamente significativos al momento de condicionar la resistencia del CP con ACR, dado que el p-valor de los factores de control es superior al nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

Adicionalmente el p-valor = 0.275 de la regresión lineal respalda lo antes mencionado, ya que al ser mayor de 0.05, nos indica que los efectos de los coeficientes no influyeron en la respuesta, es decir, en la resistencia a la compresión del concreto permeable con ACR.

*Tabla 30.- Análisis de la varianza Zn-Ni Vs resistencia a la compresión.*

	<i>GL</i>	<i>Suma cuad.</i>	<i>Med. cuad</i>	<i>F valor</i>	<i>P valor</i>
FO(x1,x2)	2	369.34	184.672	3.2394	0.11116
TWI(x1,x2)	1	8.44	8.439	0.148	0.71369
PQ(x1,x2)	2	97.27	48.637	0.8532	0.47196
Residuals	6	342.05	57.008		
Lack of fit	3	293.54	97.845	6.0509	0.08671
Pure error	3	48.51	16.17		

Como se expresa la Tabla 30, el valor de la varianza es de  $\sigma = \sqrt{16.17} = 4.02$ , esto nos indica la variación natural del experimento o del fenómeno, y por lo tanto aquellos valores absolutos de los coeficientes estimados de la Tabla 29 de cada factor superiores a la varianza ponderada se notará su influencia sobre el resultado. De esta manera se observa que, aunque no sea estadísticamente significativo la influencia que tiene la concentración de Zn y Ni. El coeficiente estimado del factor Zn de primer orden igual a 4.2397, sugiere que tiene una influencia positiva en la resistencia del concreto; de la misma manera el coeficiente estimado del factor Ni de primer orden igual a -5.3097 tiene una influencia negativa sobre la resistencia del concreto. Lo que se logra identificar de manera gráfica en la Figura 54 y Figura 55 .

#### 4.11.2 Relación del Porcentaje de Vacíos con la Resistencia a la Compresión

Dentro de la literatura es bien sabido que el porcentaje de vacíos es un factor predominante que condiciona la resistencia a compresión del concreto permeable, tanto que en el reporte 522-R del ACI se muestra una gráfica que muestra que a mayor cantidad de vacíos menor resistencia a compresión de la mezcla endurecida de concreto permeable; la Figura 56 es una adaptación de dicha gráfica para una mezcla con agregados con una granulometría ASTM No.67.

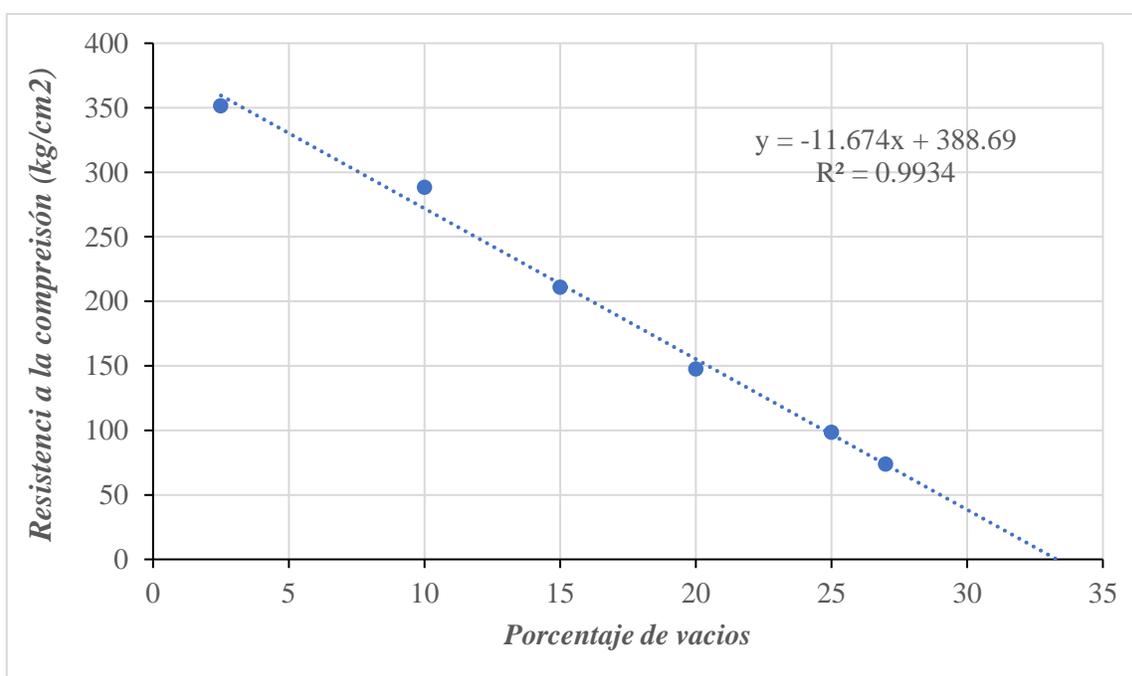


Figura 56.-Relación de la resistencia a la compresión VS porcentaje de vacíos del concreto permeable.

Fuente: Adaptado del ACI, 2010.

Tomando en cuenta el valor promedio del porcentaje de vacíos de la mezcla de concreto permeable con ACR igual a 32.32%, analítica y gráficamente le correspondería un valor de 11.38 kg/cm<sup>2</sup> como resistencia a compresión, lo cual discrepa con la resistencia promedio de 49.41 kg/cm<sup>2</sup>. Los resultados de resistencia a compresión obtenidos por Najah et al., 2021

también difiere de la proyección de la Figura 56 cuando la mezcla de concreto permeable presenta porcentajes de vacíos elevados. Por lo que convendría utilizar una proyección exponencial que relacione la resistencia a compresión con el porcentaje de vacíos de la mezcla, ya que para valores de porcentaje de vacíos superiores al 25% su comportamiento no es lineal respecto a la resistencia a compresión, obteniendo valores inferiores a los reportados (Najah et al., 2021).

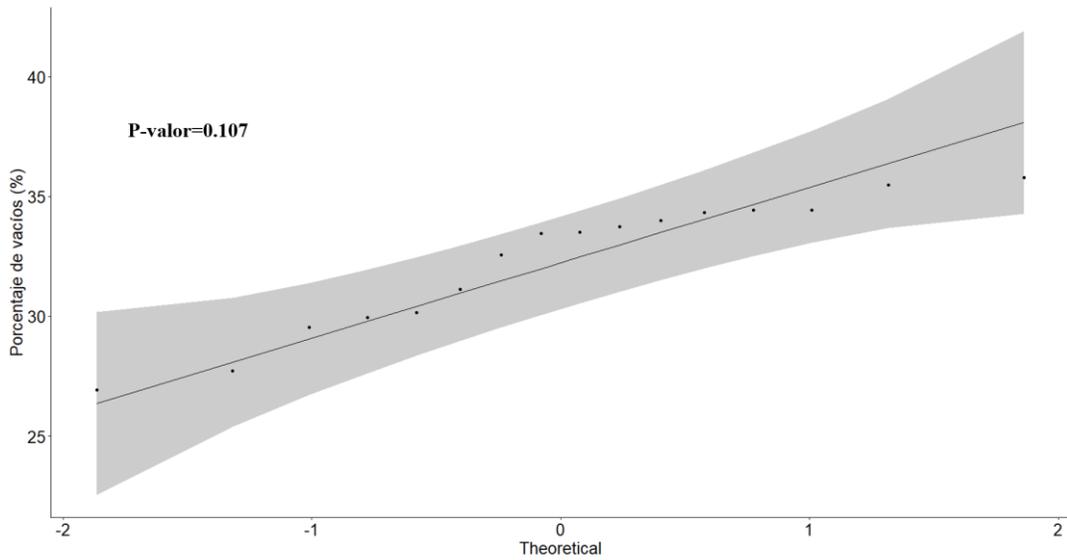
#### **4.11.2.1 Correlación lineal**

A continuación, se realiza el análisis estadístico para corroborar la relación entre el porcentaje de vacíos y la resistencia a compresión del concreto permeable con ACR, dado que los resultados tienen una distribución normal se utiliza la prueba de correlación de *Pearson*.

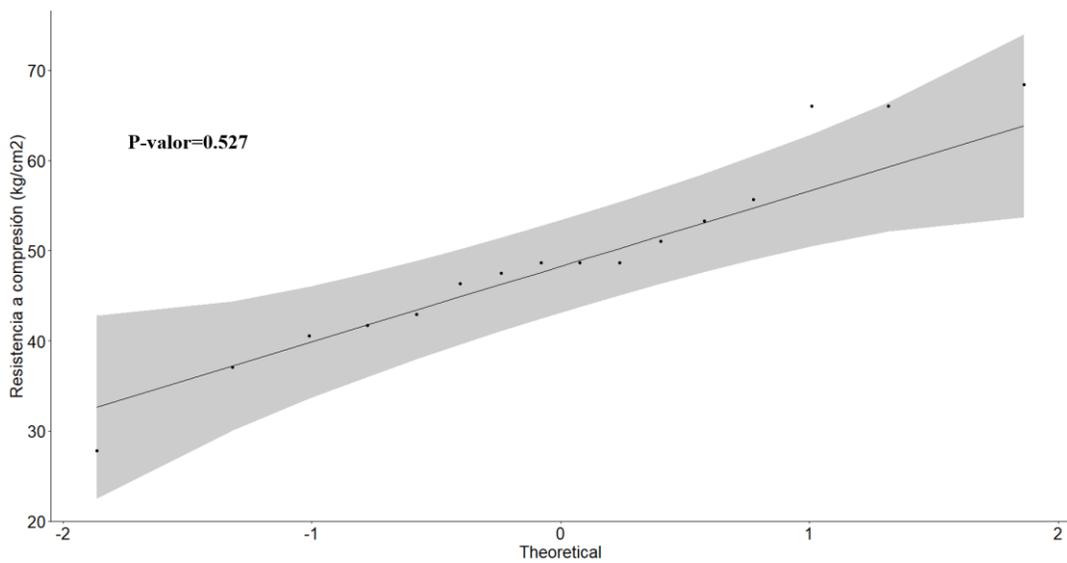
#### **Prueba de normalidad de los datos**

Primeramente, con la prueba de *Shapiro-Wilks* determinamos si los resultados del porcentaje de vacíos y la resistencia a compresión tienen una distribución normal; la prueba de *Shapiro-Wilks* plantea como hipótesis nula que una muestra proviene de una distribución normal, por lo tanto, a un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , para los valores menores de 0.05 de p-valor de la prueba de *Shapiro-Wilks* de los datos se considerara la hipótesis alternativa que significa que los datos no tienen una distribución normal.

Utilizando el programa Rstudio realizamos la prueba de *Shapiro-Wilks* obteniendo siguientes resultados.



*Figura 57.- Gráfica de prueba de distribución normal para los resultados del porcentaje de vacíos del concreto permeable con ACR.*

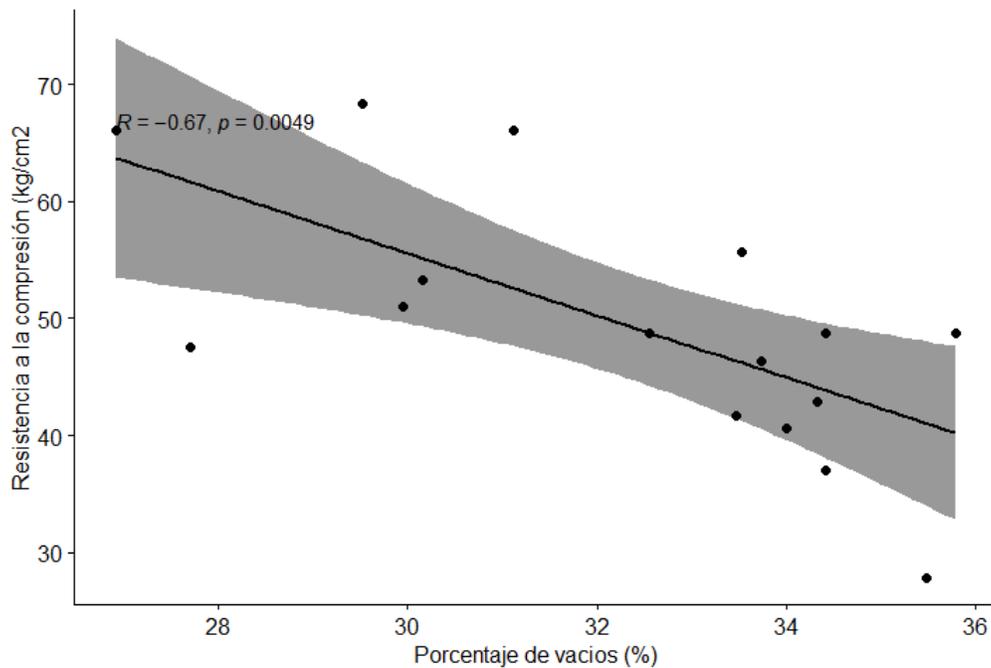


*Figura 58.-Gráfica de prueba de distribución normal para los resultados de la resistencia a compresión del concreto permeable con ACR.*

A partir de los resultados, los dos valores p son superiores al nivel de significación 0.05, lo que implica que la distribución de los datos no difiere significativamente de la distribución normal. En otras palabras, podemos asumir la normalidad de los datos obtenidos.

## Correlación de Pearson

La correlación de *Pearson*, mide la dependencia lineal entre dos variables, para este caso, relacionamos la dependencia lineal del porcentaje de vacíos y la resistencia a compresión del concreto permeable con ACR. También se le conoce como prueba de correlación paramétrica, porque depende de la distribución de los datos, solo se puede usar cuando las variables pertenecen a una distribución normal.



*Figura 59.- Diagrama de dispersión y de correlación lineal paramétrica del porcentaje de vacíos Vs resistencia a compresión del concreto permeable con ACR.*

Habiendo confirmado la normalidad de los datos de cada variable se realizó la prueba de correlación de *Pearson* obteniendo la gráfica mostrada en la Figura 59, donde se indica que dado el valor de  $R = -0.67$ , existe una fuerte correlación lineal negativa, es decir, a mayor porcentaje de vacíos, menor resistencia a la compresión. En adición, dado un  $p$ -valor = 0.0049, inferior a 0.05, podemos concluir que el porcentaje de vacíos y la resistencia a compresión, están significativamente correlacionadas.

### 4.11.3 Relación de la Concentración Final de Ni en la Solución con la Resistencia a la Compresión

Mediante un análisis de relación lineal paramétrico de *Pearson* entre las variables de la resistencia a compresión de los cilindros con ACR y la cantidad de Ni (mg/l) en la solución final resultante del evento 10, presentado en la Figura 60, los resultados sugieren que existe una correlación lineal fuerte de carácter negativa con un coeficiente  $R = -0.58$  y un  $p$ -valor = 0.048; lo que representa que a mayor concentración de Ni en la solución, menor es el desempeño en la resistencia a la compresión del CP con ACR.

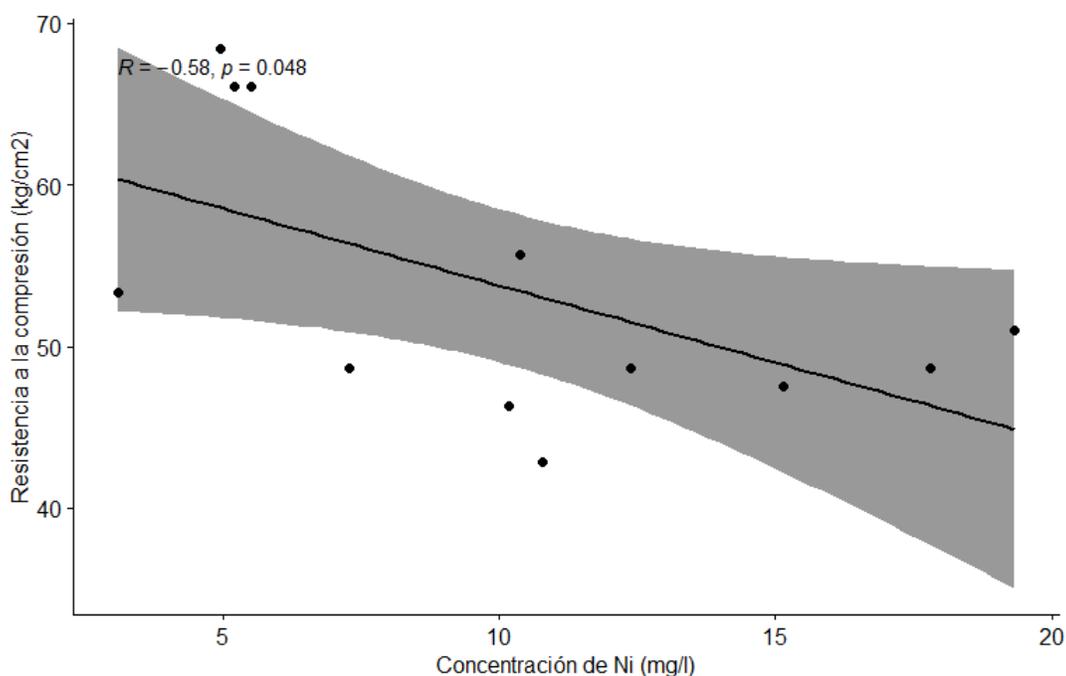


Figura 60.-Diagrama de dispersión y de correlación lineal paramétrica de la concentración de Ni resultante del evento 10 Vs resistencia a compresión del concreto permeable con ACR.

Aunque no se pudo comprobar de manera estadística que la concentración de Ni en la solución inicial afectaba la resistencia del concreto, ya que no cumplía con la significancia estadística (Tabla 29), gráficamente de la Figura 54 y Figura 55 observamos que a mayor cantidad inicial de Ni en la solución, disminuye la resistencia del concreto permeable, comportamiento que se repite al analizar la correlación lineal que existe, pero ahora con la concentración final de Ni en la solución posterior al evento 10; esto sugiere que sí existe una

dependencia negativa de la resistencia con la concentración de Ni presente en la solución que es filtrada por el concreto.

Sin embargo, al comparar los coeficientes de correlación lineal de Pearson de las variables del porcentaje de vacíos y la concentración final de Ni en la solución con la resistencia del CP,  $R=-0.67$  y  $R=-0.58$  respectivamente, se observa que la variable predominante al disminuir la capacidad de resistir esfuerzos de compresión del CP, sigue siendo el porcentaje de vacíos de la mezcla endurecida.

## **4.12 Análisis de Costos**

Analizar la viabilidad económica de la incorporación de agregados reciclados al concreto se considera importante y apropiado, debido a que si su uso no resulta en una ventaja económica sobre el concreto convencional, su uso in situ será limitado, salvo que exista una norma u organismo que exija su uso; que dicho sea de paso, para el caso particular de México, con la publicación de la NOM-161-SEMARNAT-2011, se contempla como obligación la aplicación de un plan de manejo de residuos de la construcción para aquellas obras en las que se genere más de  $80 \text{ m}^3$  de RCD.

Es de resaltar que la distancia de transportación de los áridos, es un factor fundamental para determinar el costo de los elementos que los incluyan; cuando las distancias que comprenden los sitios de recuperación, tratamiento, almacenamiento y utilización de los RCD, son extensas, se limita la viabilidad económica y ambiental para su utilización, superando el valor del producto final (Braga et al., 2017; Martínez-Lage et al., 2020; Ospina et al., 2017). Basado en lo antes mencionado, para el análisis de costos de producción de concreto permeable con ACR y AN se hacen las siguientes consideraciones:

- La distancia entre la planta recicladora y el sitio de la obra es similar a la del banco de los áridos naturales.
- La relación agua-cemento de ambas mezclas son iguales.

- El precio de transportación de los agregados es igual.
- Los ACR y AN están debidamente caracterizados y tratados para cumplir con las especificaciones de granulometría y densidad utilizadas en este estudio.
- La adquisición de los áridos es directamente con proveedores, los costos de producción y/o recuperación, transporte, almacenamiento y tratamiento están incluidos en el precio directo.

A partir de la dosificación del diseño de mezcla calculado para el concreto permeable con agregados de concreto reciclado y agregados naturales (material de banco), con base en sus características físicas, se establecen los costos directos con los que se determina el precio por la elaboración de 1 m<sup>3</sup> para los dos tipos de concreto. Los rendimientos y costos de equipo, herramienta y mano de obra necesarios para el desarrollo de los conceptos, fueron tomados del catálogo de costos directos para la utilización de materiales reciclados en la construcción 2022 publicado por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (Centro Nacional de Ingeniería de Costos, 2022) que a su vez fueron adecuados a los costos comerciales de materiales y cotizaciones con contratistas locales en el municipio de Querétaro. Los costos presentados en este subcapítulo no incluyen IVA y se consideró el 3% del costo de mano de obra para herramienta y 2% de equipo de seguridad que a su vez está incluido en el costo de cada cuadrilla correspondiente.

*Tabla 31.-Costo directo para la elaboración de concreto permeable con ACR.*

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
<b>Concreto permeable hecho en obra con agregados de concreto reciclado de granulometría abierta sin arena</b>	<b>m3</b>			
<b>MATERIALES</b>				
Material pétreo de concreto reciclado de granulometría abierta.	m3	0.638	\$95.00	\$ 60.61
Cemento portland gris CPC 30R, saco de 50 kg	t	0.30446	\$3,612.00	\$ 1,099.71
Agua de toma municipal	m3	0.1217	\$89.46	\$ 10.89
		<b>SUBTOTAL DE MATERIALES:</b>		<b>\$ 1,171.21</b>
<b>MANO DE OBRA</b>				

Cuadrilla 1 (Oficial albañil (1)+ ayudante (5)+ cabo de oficiales 6/20)	jor	0.0625	\$ 3,075.19	\$ 192.20
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>\$ 192.20</b>
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Revolvedora ARSI:AR-10EK 1 saco de 8 hp mot. Kohler s/reductor	h	0.5	\$ 147.16	\$ 73.58
<b>SUBTOTAL DE EQUIPO Y HERRAMIENTA:</b>				<b>\$ 73.58</b>
<b>COSTO DIRECTO:</b>				<b>\$ 1,436.99</b>

El precio por m<sup>3</sup> de grava reciclada, fue considerado con un costo de \$95.00 correspondiente al precio del mercadeo de las planta recicladoras de Ciudad de México para el año 2022-2023 (Centro Nacional de Ingeniería de Costos, 2022; Escobar, 2023; Zamarrón, 2021)

*Tabla 32.-Costo directo para la elaboración de concreto permeable con agregados naturales.*

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	IMPORTE
<b>Concreto permeable hecho en obra con agregados de banco de granulometría abierta sin arena</b>	<b>m3</b>			
<b>MATERIALES</b>				
Grava de banco	m3	0.5973	\$ 476.00	\$ 284.31
Cemento portland gris CPC 30R, saco de 50 kg	t	0.30446	\$ 3,612.00	\$ 1,099.71
Agua de toma municipal	m3	0.1217	\$ 89.46	\$ 10.89
<b>SUBTOTAL DE MATERIALES:</b>				<b>\$ 1,394.91</b>
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 1 (Oficial albañil (1)+ ayudante (5)+ cabo de oficiales 6/20)	jor	0.0625	\$ 3,075.19	\$ 192.20
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>\$ 192.20</b>
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Revolvedora ARSI:AR-10EK 1 saco de 8 hp mot. Kohler s/reductor	h	0.5	\$ 147.16	\$ 73.58
<b>SUBTOTAL DE EQUIPO Y HERRAMIENTA:</b>				<b>\$ 73.58</b>
<b>COSTO DIRECTO:</b>				<b>\$ 1,660.69</b>

De la comparación de los costos directos de la Tabla 31 y Tabla 32, se determinó que la elaboración de 1 m<sup>3</sup> del concreto permeable con grava de banco en la dosificación de diseño establecida previamente, presenta aumento de \$223.7 lo equivalente a un 13.47% en el costo directo, en comparación con el concreto con ACR.

Bajo esta comparativa, la diferencia en el costo directo está relacionada únicamente por el precio y la cantidad de áridos utilizados en cada una de las mezclas, siendo el precio de los agregados naturales 5 veces más alto en comparación con los ACR. Teniendo en cuenta las consideraciones expuestas anteriormente, el alto precio de los agregados naturales respecto a los ACR, está vinculado a su costo de producción, en el cual se espera tener una utilidad por la explotación del terreno, el costo de los trámites y licencias de explotación (Ospina et al., 2017). Por otra parte, el costo de producción de agregados reciclados no implica compromisos tributarios por la explotación de un banco, sin embargo, sus costos adicionales están más relacionados por las actividades de recolección y transporte (Braga et al., 2017; Martínez-Lage et al., 2020; Ospina et al., 2017).

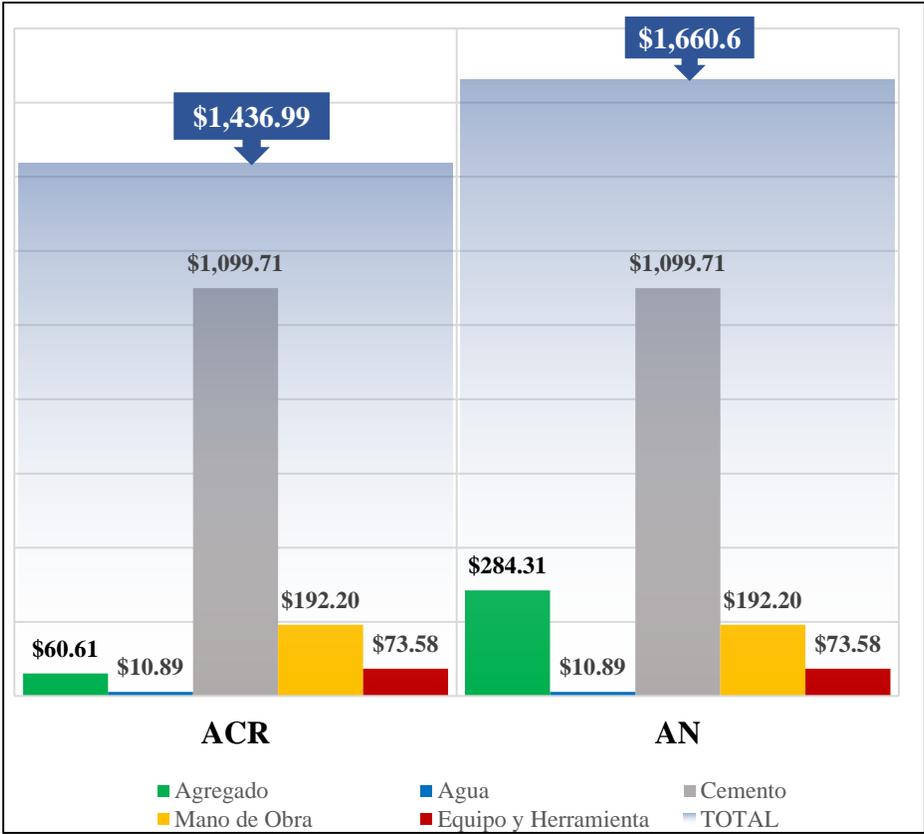


Figura 61.- Gráfica del costo directo de la elaboración de concreto permeable con ACR y AN.

En la Figura 61 se muestra la gráfica de barras de los costos que involucra la elaboración de cada una de las mezclas, como ya se ha señalado, la única diferencia del costo entre uno y

otro es el precio de los agregados. No obstante, es de recalcar que costo del cemento para ambas mezclas constituye la mayor parte del costo directo total, un 76.5% y 66.2% del costo directo del CP con ACR y AN respectivamente, mientras que el costo por los agregados solo representa un 4.2% y 17.1% de costo directo del CP con ACR y AN respectivamente.

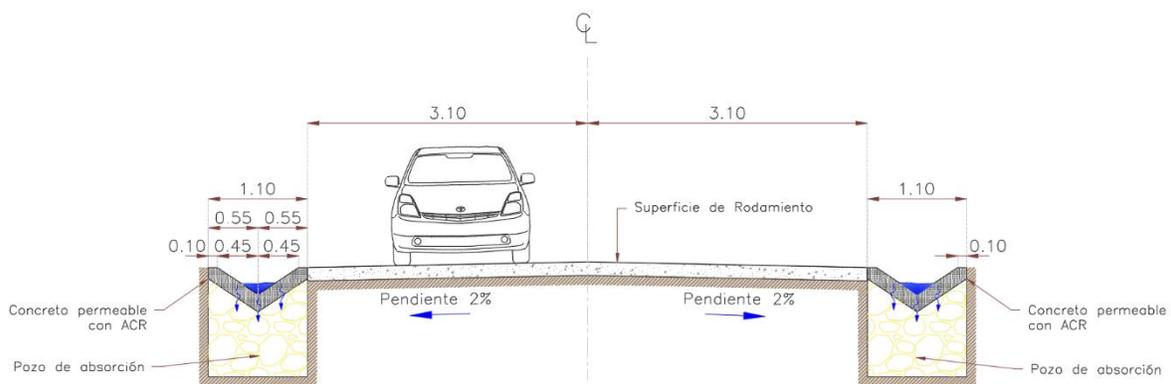
Desde el punto de vista del contenido de cemento de la mezcla, el costo del concreto permeable indica que a mayor contenido de cemento mayor costo total; de la comparación de las gráficas de barras, es posible concluir que el concreto con ACR es más barato que aquel con AN, siempre y cuando las mezclas compartan las mismas propiedades mecánicas. Sin embargo, dado que los ACR reducen las propiedades mecánicas de la mezcla endurecida, es necesario disminuir la relación agua-cemento en la dosificación para equiparar la resistencia de un concreto con otro, aumentando los costos de elaboración de concreto con agregados reciclados al aumentar la cantidad de cemento en la mezcla o incluir el uso de aditivos (Braga et al., 2017; Martínez-Lage et al., 2020).

Aún si un ahorro del 13.47% podría no parecer sustancial o si es necesario aumentar la cantidad de cemento o aditivos en la dosificación de la mezcla aumentando con ello los costos directos de elaboración del concreto permeable, hay algunos factores no reflejados directamente en el costo de la elaboración del concreto con ACR, que impactan de manera positiva en el presupuesto final de una obra, al reducir los gastos por actividades de transporte y disposición de residuos, que en los conceptos de demolición representan un gasto considerable, más aún cuando el factor de abundamiento aumenta hasta un 75% respecto al volumen de los residuos de concreto en su estado original (Ospina et al., 2017). Por último, es de destacar que los costos ambientales no son tenidos en cuenta en este análisis, pero estos finalmente son asumidos por la sociedad en general.

### **4.13 Posibles Aplicaciones del Concreto Permeable con ACR**

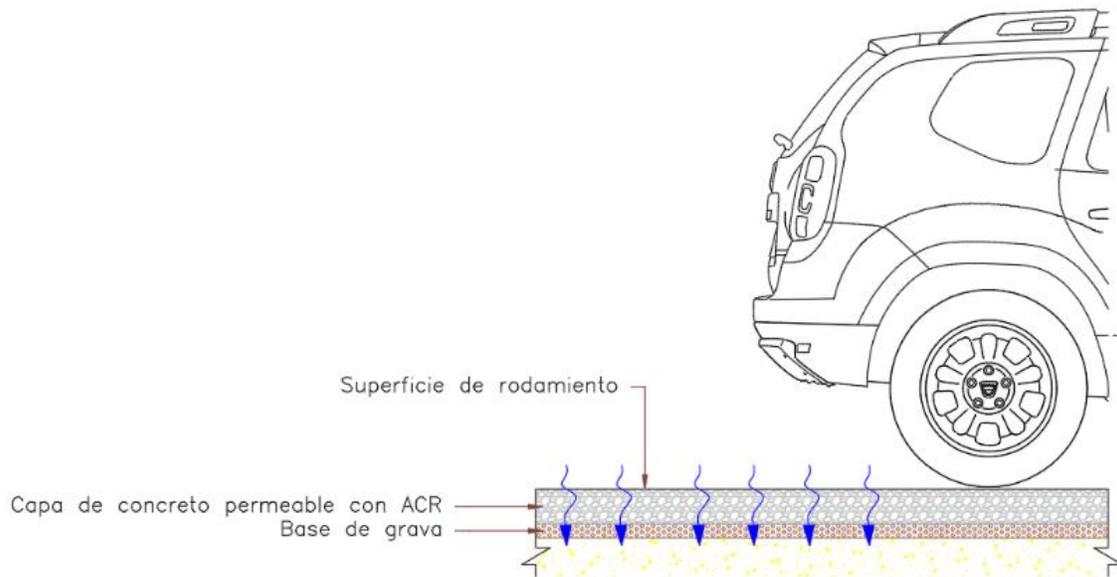
Con base en sus propiedades mecánicas, de remoción y permeables medidas de la mezcla endurecida del concreto permeable con ACR, se presentan tres posibles propuestas de su aplicación.

La primera de ellas consiste en su implementación en pozos de absorción en cunetas; las cunetas son obras auxiliares en forma de zanja artificial, a un costado de la vía de circulación, con el fin de captar el agua producto de la escorrentía desde el centro del camino. Las cunetas cuentan con la pendiente necesaria para direccionar el agua a un lugar específico. Se propone que el caudal que fluye a través de las cunetas se dirija a pozos de absorción ubicados a cierta distancia entre sí, cuya capa superior se componga de concreto permeable con ACR, de esta manera se le da tratamiento al agua recolectada de la escorrentía de la carretera antes de que se infiltre al subsuelo como se muestra la Figura 62.



*Figura 62.-Sección transversal de carretera con pozos de absorción.*

Otra propuesta, como se ilustra en la Figura 63, es la utilización del concreto permeable con ACR como superficie de rodamiento del pavimento en zonas residenciales y comerciales, donde estará expuesto a tráfico ligero, en zonas donde el terreno tenga alta capacidad de infiltración y se pueda aprovechar sus bondades descontaminantes para darle un tratamiento de remoción de metales pesados previo a la infiltración del agua al subsuelo.



*Figura 63.-Estructura de pavimento permeable.*

Una tercera opción consiste en usarlo para construir banquetas y andadores dentro de las zonas habitacionales y de oficinas a fin de permitir que el agua de lluvia se infiltre al subsuelo y se pueda favorecer la recarga de los mantos acuíferos.

### Conclusiones

De la realización de este trabajo de investigación se deduce que la hipótesis planteada, se cumplió; es decir, el uso de 100% de agregados reciclados en sustitución de los agregados naturales en el concreto permeable mejora su capacidad de remover metales pesados en solución en hasta un 82.17%. Adicionalmente, los resultados del análisis estadístico que relaciona la concentración inicial de Zn y Ni en las soluciones filtradas con la resistencia a la compresión en la superficie de respuesta, y la correlación lineal del porcentaje de vacíos y la resistencia a compresión de la mezcla endurecida, se concluye que no hay evidencia de que la concentración inicial de Zn y Ni de las soluciones a las que fueron expuestas el concreto permeable con ACR afectaran de manera significativa su capacidad para resistir esfuerzos de compresión, validando un supuesto importante de la hipótesis inicial.

Las conclusiones adicionales que se obtuvieron se presentan a continuación.

- Independientemente de la condición de la concentración de los contaminantes evaluados, el concreto permeable fabricado con agregados reciclados y agregados naturales, presentaron una tendencia a remover una mayor cantidad de níquel. En el caso del zinc, se observaron algunos eventos (ACR-C4 y ACR-C6) en los que este tipo de concreto presentó un fenómeno de desorción, por lo que la eficiencia de remoción de este contaminante disminuyó significativamente.
- Respecto a los modelos cinéticos de remoción de los contaminantes se encontró que el modelo de Lagergren fue el que mejor describió la velocidad de remoción del zinc por cada evento de infiltración en el concreto permeable fabricado con agregados reciclados. En contraste, el modelo de pseudo segundo orden fue el que mejor se ajustó y describió la eficiencia de remoción del níquel por este tipo de concreto.
- Las cinéticas de adsorción mostraron que los especímenes de concreto permeable ensayados se saturan con iones de zinc de manera más rápida que con los de níquel, ya

que, a partir del quinto evento de infiltración de la solución contaminante, la eficiencia de remoción del zinc se mantiene prácticamente constante. Mientras que para el caso del níquel se observó que el concreto permeable fabricado con agregados reciclados continuar removiendo zinc aún después de los diez eventos de infiltración de la solución contaminante.

- La resistencia a compresión de la mezcla con agregados reciclados, en comparación con la mezcla a base de agregados naturales, se vio disminuida 16.77%, en promedio, debido al aumento en el porcentaje de vacíos (29.67%, en promedio) presentado en el concreto permeable con agregados reciclados y a factores secundarios como la doble zona de transición interfacial y al proceso de trituración del agregado reciclado.

## **5.1 Líneas Futuras de Investigación**

Para complementar esta investigación se sugiere realizar un análisis de las soluciones por difracción de rayos X para evaluar los cambios mineralógicos y de las fases cristalinas resultantes de la interacción de la solución con el concreto permeable. Adicionalmente, se plantea la implementación de un estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX) a los residuos sólidos de las probetas de concreto permeable, para determinar la distribución de los iones metálicos sobre su superficie (Chen et al., 2019). Por último, se considera pertinente la realización de un estudio de factibilidad técnica-económica para un caso de estudio en particular en la implementación del concreto permeable con ACR como superficie de rodamiento en un pavimento. Tomando en cuenta las condiciones locales hidrológicas, de tránsito, costos de materiales, maquinaria y mano de obra, presencia de contaminantes ambientales y la disponibilidad de residuos en la zona.

## Referencias

- ACI. (2010). Report on Pervious Concrete, ACI 522R-10. In *American Concrete Institute* (Vol. 10, Issue Reapproved).
- Aguilera, A., Bautista, F., Gutiérrez-Ruiz, M., Cenicerros-Gómez, A. E., Cejudo, R., & Goguitchaichvili, A. (2021). Heavy metal pollution of street dust in the largest city of Mexico, sources and health risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment, Science Direct, 193*(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08993-4>
- Amador, J. (2010). Espectrometría óptica atómica. *Temas de Ciencia y Tecnología, 14*, 3–10.
- Ammar, N. S., Ismail, A. I. M., & El-Shafey, O. I. (2015). Engineering behavior influence of basaltic rocks on the adsorption of heavy metal ions. *Desalination and Water Treatment, 57*(11), 5089–5099. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.1003101>
- Arredondo Rea, S. P. (2011). *Estudio Microestructural de Concretos Sustentables Aplicando Técnicas Avanzadas* [Universidad Autónoma de Chihuahua]. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/774>
- ASTM. (2016). *Standard Specification for Concrete Aggregates: Vol. i* (Issue C). <https://doi.org/10.1520/C0033>
- ASTM. (2017). C29/C29M – 17a:Standard Test Method for Bulk Density (“ Unit Weight ”) and Voids in Aggregate. In *ASTM International: Vol. i* (Issue c). <https://doi.org/10.1520/C0029>
- Ávila García, P., Pablos Hatch, J. L., & Moller Pelayo, C. M. (2018). Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos. *Comision Nacional de Los Derechos Humanos (CNDH)*, 313. [http://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO\\_RIOS\\_LAGOS\\_ACUIFEROS.pdf](http://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_ACUIFEROS.pdf)

- Beatty, D. B., & Kerber, J. D. (1993). Concepts, Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry. In *North* (2nd editio). , Perkin-Elmer Corporation.
- Boroumnad, S., & Hassan Baziar, M. (2005). Determination of Compacted Clay Permeability By Artificial Neural Networks. *Ninth International Water Technology Conference, IWTC9 2005, Sharm El-Sheik, Egypt, April*, 515–526.
- Braga, A. M., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162(2017), 529–543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057>
- Cai, X., Wu, K., Huang, W., Yu, J., & Yu, H. (2020). Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base. *Road Materials and Pavement Design*, 22(10), 2181–2196. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1742193>
- Calva, L. G., & Torres, M. del R. (2003). Metales Pesados y sus efectos en organismos. *Revista de Educación En Ciencias e Ingeniería*. <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n51ne/metales.pdf>
- Calva, L. G., & Torres, M. del R. (2007). Contaminantes Prioritarios en Agua , Sedimentos y Organismos . In P. P. J. T. Arredondo Figueroa J.L., Díaz Zavaleta G (Ed.), *Limnología de Presas Mexicanas*. (1a ed.). GT Editor, S.A.
- Castellan, G. W. (1987). *Fisicoquímica* (Pearson Education (ed.); 3ra ed.). Addison-Wesley Publishing Company.
- Castro, S., Cerda, R., Betanco, N., Canelo, F., López, X., García, A., & Benavente, M. (2014). Estudio del equilibrio y cinética de adsorción de Cd(II), Ni(II) y Cr(VI) usando Quitosano y Quitosano modificado con cobre. *Nexo Revista Científica*, 26(2), 56–68. <https://doi.org/10.5377/nexo.v26i2.1285>
- CENAM. (2012). *Guía Técnica de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en*

*las Mediciones Analíticas que Emplean la Técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente.*

Centro Nacional de Ingeniería de Costos. (2022). *Catálogo de costos directos para la utilización de materiales reciclados en la construcción 2022.*

Cervantes Cárdenas, A. F. de J. (2020). *Estudio de factibilidad del concreto permeable y su posible aplicación en la ciudad de Barranquilla, Colombia.* Universidad de la Costa – CUC.

Chen, X., Niu, Z., Zhang, H., Guo, Y., Liu, M., & Zhou, M. (2019). Study on the metakaolin-based geopolymer pervious concrete (MKGPC) and its removal capability of heavy metal ions. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(9), 1181–1192. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1667499>

CMIC. (2013). Plan De Manejo De Residuos De La Construcción Y La Demolición. In *Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción*. [https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM\\_RCD\\_Completo.pdf](https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM_RCD_Completo.pdf)

Comisión Nacional del Agua. (2019). *Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento.* <file:///E:/UAM/PTAR/Referencias/CONAGUA PTAR.pdf>

Cordeiro, G., Batista Leite, M., & Pereira Vieira, A. (2015). Recycled Concrete Aggregates From Different Sources : Characterization and Use in Structural ... Sources : Characterization and Use in Structural. *Research Gate, October.*

Díaz, J. G., González, E., & García, R. (2013). *Mapeo de la calidad ambiental urbana mediante bioindicadores en la ciudad de Santiago de Querétaro.* Universidad Autónoma de Querétaro.

El-Hassan, H., Kianmehr, P., & Zouaoui, S. (2019). Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. *Construction and Building*

*Materials*, 212, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325>

Escobar, S. (2023). *Minería urbana: Avances en el reciclaje de residuos de la construcción en la Ciudad de México*. *El Economista*. <https://www.economista.com.mx/econohabitat/Mineria-urbana-Avances-en-el-reciclaje-de-residuos-de-la-construccion-en-la-Ciudad-de-Mexico-20230928-0010.html>

Flores-Díaz, A. C. (2020). *Calidad del agua superficial: ¿cómo frenar el deterioro del capital natural de México?* *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/2020/06/20/delcampo/articulos/calidad-agua.html>

Gonçalves, P., & De Brito, J. (2010). Recycled aggregate concrete (RAC) - Comparative analysis of existing specifications. *Magazine of Concrete Research*, 62(5), 339–346. <https://doi.org/10.1680/mac.2008.62.5.339>

Habert, G., & Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 397–402. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001>

Haselbach, L., Poor, C., & Tilson, J. (2013). Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 652–657. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.013>

Hernández-Mendoza, C. E., García Ramírez, P., & Chávez Alegría, O. (2021). Geotechnical evaluation of diesel contaminated clayey soil. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14), 1–20. <https://doi.org/10.3390/app11146451>

Holmes, R. R., Hart, M. L., & Kevern, J. T. (2017). Enhancing the Ability of Pervious Concrete to Remove Heavy Metals from Stormwater. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(2), 04017004. <https://doi.org/10.1061/jswbay.0000823>

IMCYC. (2006). *Causas Y Problemas, Causas y Soluciones.*, 5, 67–71. [www.revistacyt.com.mx/images/problemas/2007/pdf/FEBRERO.pdf%5Cn](http://www.revistacyt.com.mx/images/problemas/2007/pdf/FEBRERO.pdf%5Cn)

- Iranzo, E. O. (2015). Adsorción de disoluciones acuosas: isotermas de absorción y coeficientes de difusión [Universidad Complutense de Madrid]. In *Tesis Doctoral*. <https://eprints.ucm.es/52719/1/5309859314.pdf>
- Joseph, M., Boehme, L., Sierens, Z., & Vandewalle, L. (2015). Water absorption variability of recycled concrete aggregates. *Magazine of Concrete Research*, 67(11), 592–597. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00210>
- Kim, G. M., Jang, J. G., Khalid, H. R., & Lee, H. K. (2017). Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 136, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.020>
- Lamond, J. F., & Pielert, J. H. (2006). Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. In ASTM international (Ed.), *ASTM Special Technical Publication: Vol. STP 169D*. <https://doi.org/10.1520/stp169d-eb>
- Mahedi, M., Dayioglu, A. Y., Cetin, B., & Jones, S. (2020). Remediation of acid mine drainage with recycled concrete aggregates and fly ash. *Environmental Geotechnics*. <https://doi.org/10.1680/jenge.19.00150>
- Mandour, R. (2021). Distribution and accumulation of heavy metals in Lake Manzala, Egypt. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(1), 284–292. <https://doi.org/10.1080/2314808X.2021.1973183>
- Mangani, G., Berloni, A., & Bellucci, F. (2004). Evaluation of the pollutant content in road runoff first flush waters. *Area*, 213–228.
- Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P., & Velay-Lizancos, M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*, 104, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.044>
- Martínez Soto, I. ., & Mendoza Escobedo, C. . (2006). Comportamiento mecánico de

concreto fabricado con agregados reciclados. In *Ingeniería Investigación y Tecnología* (Vol. 7, Issue 3). <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2006.07n3.012>

Mebratu, D. (1998). Sustainability and sustainable development: Historical and conceptual review. *Environmental Impact Assessment Review*, 18(6), 493–520. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(98\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00019-5)

Mejía, C., Pinzón, E. C. L., & González, J. T. (2013). Influence of traffic in the heavy metals accumulation on urban roads: Torrelavega (spain)-soacha (colombia) | Influencia del tráfico en la acumulación de metales pesados sobre vías urbanas: Torrelavega (españa)-soacha (colombia). *Revista Facultad de Ingeniería*, 67, 146–160.

Monrose, J., Tota-Maharaj, K., & Mwashu, A. (2019). Assessment of the physical characteristics and stormwater effluent quality of permeable pavement systems containing recycled materials. *Road Materials and Pavement Design*, 22(4), 779–811. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1643397>

Mubarak, N. M., Sahu, J. N., Abdullah, E. C., & Jayakumar, N. S. (2014). Removal of heavy metals from wastewater using carbon nanotubes. *Separation and Purification Reviews*, Taylor & Francis Group, 43(4), 311–338. <https://doi.org/10.1080/15422119.2013.821996>

Muñoz Celis, C. C. (2019). *Importancia de la Ingeniería Civil en el Cumplimiento del ODS No. 9 Industria, Innovación e Infraestructura* (Issue 9). Universidad Militar Nueva Granada.

Myers, A. L. (2004). Thermodynamics of adsorption. In T. M. Letcher (Ed.), *Chemical Thermodynamics for Industry* (Vol. 22, Issue 10). <https://doi.org/10.1063/1.1739867>

Myers, R. H. (2009). *Response Surface Methodology. Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. (I. M. J. David J. Balding, Noel A. C. Cressie, Garrett M. Fitzmaurice, S. W. Geert Molenberghs, David W. Scott, Adrian F. M. Smith, Ruey S. Tsay, & J. L. T. Editors Emeriti: Vic Barnett, J. Stuart Hunter (eds.); 3era ed.). John

Wiley & Sons.

Najah, N. S. H., Saloma, Hanafiah, Nurjannah, S. A., Muliawan, S., & Eric. (2021). Compressive strength, permeability, and porosity analysis of pervious concrete by variation of A/C without fine aggregate. *AIP Conference Proceedings*, 2339(May). <https://doi.org/10.1063/5.0044591>

Navarro Aviñó, E., & Alonso, A. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 16(2), 1–17. [http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=488&Id\\_Categoria=1&tipo=portada](http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=488&Id_Categoria=1&tipo=portada)

Orta Resendiz, B., Cruz Olivares, J., & Martínez Barrera, G. (2015). Adsorción de plomo (II) en un adsorbente irradiado con rayos gamma. In *Ekp* (Vol. 13, Issue 3).

Ospina, M. Á., Moreno, L. Á., & Rodríguez, K. A. (2017). Análisis técnico-económico del uso de concreto reciclado y el concreto convencional en Colombia. *Actas de Ingeniería*, 3(May), 36–47. [https://www.researchgate.net/publication/330661099\\_Analisis\\_tecnico-economico\\_del\\_uso\\_de\\_concreto\\_reciclado\\_y\\_el\\_concreto\\_convencional\\_en\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/330661099_Analisis_tecnico-economico_del_uso_de_concreto_reciclado_y_el_concreto_convencional_en_Colombia)

P. Atkins, J. d. P. (2016). *Química Física* (8va Edición). Editorial Medica Panamericana.

Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es)

Piñero García, P., & García-Pintos Escuder, A. (2009). Prácticas ambientales en el sector de la construcción. el caso de las empresas constructoras españolas. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de La Empresa*, 15(2), 183–200.

[https://doi.org/10.1016/S1135-2523\(12\)60096-3](https://doi.org/10.1016/S1135-2523(12)60096-3)

- Pinzón-Bedoya, M. L., & Villamizar, L. E. V. (2009). Modelamiento de la cinética de bioadsorción de cr (iii) usando cáscara de naranja. *DYNA (Colombia)*, 76(160), 95–106.
- Rahman, K., Barua, S., Anwar, M. S., Hasan, M. Z., & Islam, S. (2020). Removal of Heavy Metals from Stormwater Using Porous Concrete Pavement. *Journal of Modern Materials*, 7(1), 37–44. <https://doi.org/10.21467/jmm.7.1.37-44>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Heavy metals contamination implications for health and food safety. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 24(1), 14. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>
- Rodríguez, P. G. (2019). *Comparación del efecto de dos métodos de biorremediación en las propiedades geotécnicas de un suelo fino contaminado con Diesel*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Romero Esquivel, L. G., Vargas Camareno, M., & Padilla Barrantes, F. (2007). Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica. Estudio de caso en lodo de electrodeposición. *Avances En Química*, 2(3), 9–14. <http://www.redalyc.org/pdf/933/93320303.pdf>
- Rondinel-Oviedo, D. R. (2021). Construction and demolition waste management in developing countries: a diagnosis from 265 construction sites in the Lima Metropolitan Area. *International Journal of Construction Management*, 0(0), 1–12. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1874677>
- Salgado, N. (2011). Selectividad Del Proceso De Adsorción De Roca Zeolítica Modificada Con Bromuro De Hexadeciltrimetilamonio Frente a Cromatos Y Dicromatos. In *Instituto Tecnológico de Toluca*. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA.
- SCT. (2006). *M-PRY-PUE-1-07-003-06* (7ma ed.).
- SCT. (2015). *Isoyetas de intensidad de lluvia del estado de Querétaro TR 10 años*.

[https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas\\_2015/QUERETARO/22.-QUERÉTARO\\_TR\\_\\_10\\_AÑOS.pdf](https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Isoyetas_2015/QUERETARO/22.-QUERÉTARO_TR__10_AÑOS.pdf)

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA-CDMX). (2020). *Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2021*. 1–179. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/residuos/Inventariod eResiduosSolidos2021.pdf>

Shabalala, A. N., Ekolu, S. O., Diop, S., & Solomon, F. (2017). Pervious concrete reactive barrier for removal of heavy metals from acid mine drainage – column study. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 323, pp. 641–653). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.027>

Silva-Juarez, J. F., Chavez-Alegria, O., Ramon Gaxiola-Camacho, J., & Millan-Almaraz, J. R. (2021). Permeable concrete design for heavy metal absorption in sustainable roads. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(4), 293–334. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-04-07>

Singh, D., & Singh, S. P. (2020). Influence of grading recycled concrete aggregates on the properties of pervious concrete. *Construction Materials ICE*. <https://doi.org/10.1680/jcoma.20.00046>

Suryawanshi, P. V., Rajaram, B. S., Bhanarkar, A. D., & Chalapati Rao, C. V. (2016). Determining heavy metal contamination of road dust in Delhi, India. *Atmosfera*, 29(3), 221–234. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.03.04>

Tijani, M. A., Ajagbe, W. O., Ganiyu, A. A., Aremu, A. S., & Olawale, S. O. A. (2021). Stormwater Management Using Pervious Concrete Containing Sorghum Husk Ash and Recycled. *Towards a Sustainable Water Future: Proceedings of OICWE 2020*, 233–242.

Trejo Meza, L. M., Quintero Nuñez, M., & Valdez Salas, B. (2013). Heavy metals in urban road sediments of the city of Mexicali, México. *Revista Internacional de*

*Contaminación Ambiental.*

- Tubert, I., & Talanquer, V. (2018). Sobre adsorción. *Educación Química*, 8(4), 186. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1997.4.66595>
- Vera, J. A. S. (2014). *Tratamientos de evaporación para la reducción de residuos químicos generados en los laboratorios de química general de la Universidad de Pamplona . Introducción Tratamientos de evaporación Metodología. July 2014*, 89–97.
- Wagih, A. M., El-Karmoty, H. Z., Ebid, M., & Okba, S. H. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC Journal*, 9(3), 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.08.007>
- Yip Robin, C. P., & Poon, C. S. (2009). Cultural shift towards sustainability in the construction industry of Hong Kong. *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3616–3628. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.017>
- Zamarrón, I. (2021). *Con planta de reciclaje de cascajo en CDMX, sacan dinero de debajo de las piedras*. FORBES MÉXICO. <https://www.forbes.com.mx/con-planta-de-reciclaje-de-cascajo-en-cdmx-sacan-dinero-de-debajo-de-las-piedras/>
- Zarazúa, G., Ávila-Pérez, P., Tejeda, S., Valdivia-Barrientos, M., Zepeda-Gómez, C., & Macedo-Miranda, G. (2013). Evaluación de los metales pesados Cr, Mn, Fe, Cu, Zn Y Pb en sombrerillo de agua (hydrocotyle ranunculoides) del curso alto Del Río Ierma, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 29(SUPPL.2), 17–24.
- Zhang, Y., Luo, W., Wang, J., Wang, Y., Xu, Y., & Xiao, J. (2019). A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078>

## **Publicaciones Derivadas del Proyecto de Investigación**

D. Escarcega Huerta and C. E. Hernández-Mendoza, “Carbon nanotube-treated pervious concrete for heavy metal adsorption,” *XVIII Congr. Int. Ing.*, vol. 18, pp. 412–418, 2022.

D. Escarcega Huerta, C. E. Hernández-Mendoza, and J. L. Reyes Araiza, “Evaluación de la resistencia a la compresión del concreto permeable fabricado con agregados reciclados from recycled aggregates,” *XVI Coloq. Posgrado la Fac. Ing. la Univ. Autónoma Querétaro.*, vol. 16, pp. 1–10, 2022.