

**Evaluación de la eficiencia del uso de poli(butilmetacrilato) modificado con óxido férrico en
la adsorción de iones cromo VI (dicromato) en una matriz acuosa**

Cielo Yadira Urquijo Sánchez

Directores

Prof. Ing. Lucio Orlando Meneses

Prof. Qm. Dr. Mauricio Maldonado Villamil

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingenierías ECBTI

Ingeniería Industrial

Bogotá, Colombia

2023

Dedicatoria

A mis cuatro hijos, a quienes les quiero dejar la entrega, la pasión y el compromiso por alcanzar los sueños y metas propuestas.

Viviendo este momento me pregunto:

¿Y si hubiera renunciado cuando se opusieron...?

¿Y si hubiera escuchado a los que no creían...?

¿Y si hubiera desistido al faltar los recursos...?

¿Y si hubiera cedido ante los problemas...?

¿Y si hubiera claudicado ante el cansancio...?

¿Y si hubiera dejado de insistir...?

Corey Yuen Kwai dijo:

“Retroceder nunca, rendirse jamás”

Mireille Twaygira (Sobreviviente de una guerra en Ruanda) dijo:

“Pero si me hubiera quedado allí, yo no estaría hoy aquí, no podría inspirar a otros”

Jesucristo dice:

“En el mundo tendréis aflicción; pero confiad, yo he vencido al mundo” Jn. 16:33

“y he aquí, yo estoy con vosotros todos los días, hasta el fin del mundo” Mt. 28:20

Agradecimientos

A Dios, porque a pesar de todas mis equivocaciones me ha permitido este logro que siempre fue
mi más grande sueño ...

A mis hijos. por donar las muchísimas horas que pasé frente a un computador.....

A mis padres, por haber esperado tanto...

A mis hermanas porque permanecieron a la expectativa...

Al Dr. Mauricio Maldonado, por ser el mentor que todo el mundo quisiera encontrar...

Al Ing. Lucio Meneses, por mantener mi rumbo en la Ingeniería Industrial...

Al Qm. Carlos Matiz, por su dedicación, apoyo y enseñanza en la parte experimental...

A mis compañeros de trabajo por su constante apoyo...

A la Universidad Nacional de Colombia por facilitar los espacios y recursos...

Al grupo de investigación Aplicaciones Analíticas de Compuestos Orgánicos (AACO) por
abrirme sus puertas y por todo el apoyo que me brindaron ...

A los jurados los profesores Natalia del Rocío Ávila y José Daniel Gómez por su juiciosa
evaluación de mi trabajo y por sus muy valiosas sugerencias...

Al Ingeniero Francisco Javier Hilarión por su excelente gestión administrativa...

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, por mi formación y por tener el modelo
educativo perfecto que me permitió alcanzar esta meta...

Resumen

La contaminación de los cuerpos de agua por descarga de cromo hexavalente, es un problema ambiental muy significativo, del mismo modo, las especies de cromo VI son utilizadas en diferentes procesos productivos. Este trabajo comienza por la obtención o síntesis en el laboratorio de poli(butilmetacrilato) y paralelamente de poli(butilmetacrilato) modificado con óxido férrico al que se le añade un 20% en peso de óxido férrico con respecto al peso del monómero butilmetacrilato. Una vez se obtiene el polímero es caracterizado por Infrarrojo IR-ATR y puesto a interactuar con soluciones patrón de dicromato de potasio bajo distintas condiciones, a las que previamente se les ha determinado sus valores de absorbancia utilizando la técnica espectrofotometría UV-visible.

Se evalúa la matriz polimérica poli(butilmetacrilato) modificada con óxido férrico después de interactuar con las soluciones de dicromato de potasio, analizando una muestra por espectrofotometría UV visible y se establece una eficiencia del 80% en procesos de retención de cromo hexavalente en ambientes ácidos, lo que puede constituir en proyección y una vez se escale a nivel industrial, un aporte significativo en la reducción de los niveles de cromo total y cromo hexavalente permitidos.

Palabras clave: cromo hexavalente, poli(butilmetacrilato), óxido férrico, polímeros, dicromato, adsorción

Abstract

The contamination of water bodies by hexavalent chromium discharge is a very significant environmental problem, in the same way, chromium VI species are used in different production processes. This work begins by obtaining or synthesizing poly(butylmethacrylate) in the laboratory and, at the same time, poly(butylmethacrylate) modified with ferric oxide to which 20% by weight of ferric oxide is added with respect to the weight of the butylmethacrylate monomer. Once the polymer is obtained, it is characterized by IR-ATR Infrared and put to interact with potassium dichromate standard solutions under different conditions, whose absorbance values have previously been determined using the UV-visible spectrophotometry technique.

The polymeric matrix poly(butylmethacrylate) modified with ferric oxide is evaluated after interacting with potassium dichromate solutions, analyzing a sample by UV-visible spectrophotometry and establishing an efficiency of 80% in hexavalent chromium retention processes in acidic environments, which which can constitute in projection and once it is scaled to an industrial level, a significant contribution in the reduction of the levels of total chromium and hexavalent chromium allowed.

Keywords: Hexavalent chromium, poly(butylmethacrylate), ferric oxide, dichromate, adsorption

Contenido

Planteamiento del Problema.....	21
Árbol de Problemas.....	22
Árbol de Objetivos	23
Selección de la Estrategia Óptima.....	24
Matriz del Marco Lógico	25
Justificación.....	27
Matriz de las Partes Interesadas	29
Introducción	31
Objetivos	35
Objetivo General	35
Objetivos Específicos.....	35
Recursos	36
Estructura de Desglose de Recursos (RBS)	36
Matriz de Recursos.....	37
Planificación de Actividades.....	39
Estructura de Desglose del Trabajo (EDT)	39
Diagrama de Gantt	40
Marco Conceptual y Teórico.....	41
El Cromo	41
Propiedades Físicas del Cromo	42

Especies de Cromo.....	42
Métodos de Tratamientos de Aguas Residuales.....	43
Polímeros	44
Métodos de Polimerización.....	47
Industria Polimérica	48
Polímeros Acrílicos.....	49
Poli(butilmetacrilato) (PBMA)	50
Información Comercial del Poli(butilmetacrilato).....	51
Uso Industrial del Poli(butilmetacrilato).....	52
Procesos de Adsorción en Polímeros	52
Óxido Férrico	54
Buenas Prácticas de Laboratorio.....	55
Equipos Utilizados, Técnicas Utilizadas y Metodología	58
Equipos Utilizados	58
Tamiz Molecular	58
Punto de Fusión.....	58
Cabina Extractora.....	58
Balanza Analítica	60
Plancha de Agitación Magnética Multicanal	60
Centrífuga.....	61

Agitador de Laboratorio Vórtex.....	63
Infrarrojo IR-ATR.....	63
Espectrofotómetro UV-Visible	64
Técnicas Utilizadas	67
Metodología	68
Diagrama de Flujo del Proceso de Síntesis y Caracterización del Polímero	69
Obtención del Polímero sin Modificar (PBMA).....	70
Obtención del Polímero con ABCN.....	80
Síntesis del Polí(butylmetacrilato) Modificado con Óxido Férrico (PBMA + Fe ₂ O ₃) ..	82
Técnica de Análisis del Ion Dicromato.....	88
Diagrama de flujo del Proceso de Uso del Dicromato de Potasio	89
Espectro UV – VIS del K ₂ Cr ₂ O ₇	90
Curvas de Calibración del dicromato de potasio	91
Condiciones de Extracción.....	95
Comportamiento del Composito en Alícuotas 5,0 mL y 12,5 mL Llevados a 50mL	95
Evaluación del Composito Teniendo en Cuenta el pH	96
Valores Porcentuales de la Absorbancia en Función de la Concentración	99
Valores Porcentuales de la Absorbancia en Función del pH	100
Análisis de Resultados	101
Esquemmatización del Desarrollo de la Investigación	101

Evaluación de la Síntesis de Polí(butilmetacrilato)	102
Modificación Física de Poli(butilmetacrilato) con Óxido Férrico	108
Análisis de Ion Dicromato	113
Evaluación y Uso de la Técnica Espectroscopia UV- Visible	114
Construcción y Análisis de las Curvas de Calibración	115
Método de Extracción	117
Efecto en la Concentración del Ion Dicromato al Interactuar con los Polímeros Obtenidos	119
Efecto de la Condición de pH al Interactuar con los Polímeros Obtenidos	121
Tabla Resumen de los Resultados.....	122
Consideraciones de Acuerdo con los Resultados.....	123
Esquema Alcance de la Investigación.....	123
Aplicación a Procesos Industriales.....	124
Conclusiones	126
Recomendaciones.....	127
Referencias	128

Lista de Figuras

Figura 1: La cromita _____	41
Figura 2: Monómero de etileno _____	45
Figura 3: Polimerización del polietileno _____	45
Figura 4: Polimerización del nylon _____	46
Figura 5: Acrílico (Polimetilmetacrilato) _____	49
Figura 6: Molécula del butilmetacrilato (BMA) _____	50
Figura 7: Apariencia del óxido férrico _____	54
Figura 8: Póster BPL – UNAL _____	57
Figura 9: Molécula del peróxido de benzoilo _____	74
Figura 10: 1,1' Azobis (ciclohexanocarbonitrilo) (ABCN) _____	80
Figura 11: Molécula de óxido férrico _____	82
Figura 12:: Reacción general de polimerización _____	103
Figura 13: Caracterización del poli(butilmetacrilato) (PBMA) _____	104
Figura 14: Etapa inicial del proceso de polimerización _____	106
Figura 15: Etapa de propagación en la polimerización _____	107
Figura 16: Etapa de finalización de la polimerización _____	108
Figura 17: Espectro Infrarrojo del óxido férrico _____	109
Figura 18: Espectro Infrarrojo del material obtenido por mezcla simple _____	110
Figura 19: IR del polímero modificado con óxido férrico _____	111

Lista de Tablas

Tabla 1: Matriz del marzo lógico.....	25
Tabla 2: Matriz de las partes interesadas	29
Tabla 3: Matriz de recursos.....	37
Tabla 4: Diagrama de Gantt.....	40
Tabla 5: Información comercial del poli(butilmetacrilato).....	52
Tabla 6: Matriz de evaluación de alternativas	67
Tabla 7: Espectro UV-VIS del $K_2Cr_2O_7$	90
Tabla 8: Curva de calibración $\lambda = 350 \text{ nm}$	94
Tabla 9: Curva de calibración $\lambda = 380 \text{ nm}$	94
Tabla 10: Comportamiento del composito en alícuotas 5,0 mL y 12,5 mL llevados a 50mL	95
Tabla 11 Comportamiento del composito en condición de variación de pH.....	96
Tabla 12: Absorbancia porcentual del $K_2Cr_2O_7$ variando la concentración	99
Tabla 13: Absorbancia porcentual del $K_2Cr_2O_7$ con variación pH.....	100
Tabla 14: Asignación de las bandas IR para los polímeros PBMA y PBMA + Fe_2O_3	112
Tabla 15: Absorbancia del dicromato de potasio para la alícuota de 1,0mL e interactuando con el polímero modificado.....	120
Tabla 16: Absorbancia del dicromato de potasio interactuando con el polímero modificado para solución preparada a un pH de 2,17.....	121
Tabla 17: Tabla de resultados	122

Lista de Esquemas

Esquema 1: Árbol de problemas _____	22
Esquema 2: Árbol de objetivos _____	23
Esquema 3: Selección de la estrategia óptima _____	24
Esquema 4: Fases del proyecto de investigación _____	33
Esquema 5: Objetivos _____	35
Esquema 6: Estructura de desglose de recursos _____	36
Esquema 7: Estructura de desglose del trabajo _____	39
Esquema 8: El cromo - propiedades físicas _____	42
Esquema 9: Cromo trivalente _____	42
Esquema 10: Cromo hexavalente _____	43
Esquema 11: Métodos de polimerización _____	48
Esquema 12: Polímeros _____	49
Esquema 13: Adsorción _____	53
Esquema 14: Óxido férrico: Características físicas _____	54
Esquema 15: Diagrama de flujo de síntesis y caracterización de los polímeros _____	69
Esquema 16: Diagrama de flujo uso $K_2Cr_2O_7$ _____	89
Esquema 17: Desarrollo de la investigación _____	101
Esquema 18: Mezcla de reacción para la polimerización _____	105
Esquema 19: Protocolo general de extracción y cuantificación de ion dicromato _____	118
Esquema 20: Alcance de la investigación _____	123
<i>Esquema 21: Condiciones controladas de laboratorio _____</i>	<i>124</i>

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Espectro UV-VIS del $K_2Cr_2O_7$	115
Gráfico 2: Curva de calibración $K_2Cr_2O_7$ a $\lambda = 350$ nm.....	116
Gráfico 3: Curva de calibración $K_2Cr_2O_7$ a $\lambda = 380$ nm.....	117
Gráfico 4: Porcentaje de reducción de absorbancia de $K_2Cr_2O_7$ variando la concentración.....	119
Gráfico 5: Porcentaje de reducción absorbancia del $K_2Cr_2O_7$ con variación pH.....	121

Lista de Fotografías

Fotografía 1: Elementos de protección personal (EPP) en el laboratorio	57
Fotografía 2: Fusiómetro Electrothermal 9100 SMP11	58
Fotografía 3: Manipulación correcta de vapores	59
Fotografía 4: Cabina de extracción de gases.....	59
Fotografía 5. Balanza analítica, marca Sartorius	60
Fotografía 6: La plancha de agitación magnética marca - MS-H340-S4.....	61
Fotografía 7: Centrifugadora.....	61
Fotografía 8: Recopilación de muestra del polímero	62
Fotografía 9: Polímero decantado	62
Fotografía 10: Vórtex.....	63
Fotografía 11: Infrarrojo IR-ATR, unido al computador	64
Fotografía 12: Espectrofotómetro EMC-11-UV	65
Fotografía 13: Juego de celdas de cuarzo y dicromato de potasio.....	65
Fotografía 14: Lectura de la absorbancia.....	66
Fotografía 15: Celda lista para la lectura de la absorbancia	66
Fotografía 16: Butilmetacrilato (BMA)	71
Fotografía 17: BMA, Montaje listo para agregar el BMA.....	72
Fotografía 18: Se agrega el BMA	72
Fotografía 19: BMA, siendo depositado sin el inhibidor.....	73
Fotografía 20: Bomba de aire	73
Fotografía 21: Presentación comercial del peróxido de benzoilo	74
Fotografía 22: BMA con dispuestos para iniciar la polimerización	75

Fotografía 23: Sistema plancha de agitación, condensador, inicio de polimerización	76
Fotografía 24: Sistema de agitación que incluye la refrigeración del mismo.....	77
Fotografía 25: El compuesto cubierto con papel aluminio	77
Fotografía 26: Proceso de filtrado.....	78
Fotografía 27: Polímero formado (PBMA).....	79
Fotografía 28: Proceso de trituración.....	79
Fotografía 29: Presentación comercial del ABCN.....	80
Fotografía 30: Retiro del inhibidor en simultáneo	81
Fotografía 31: Proceso de polimerización del PBMA en simultáneo.....	81
Fotografía 32: Óxido férrico (Fe_2O_3).....	83
Fotografía 33: Inicio del proceso de polimerización en simultáneo de PBMA + Fe_2O_3	83
Fotografía 34: PBMA + Fe_2O_3 , ya casi formado	84
Fotografía 35: Inicio de filtrado de PBMA + Fe_2O_3	85
Fotografía 36: PBMA + Fe_2O_3 en etanol	85
Fotografía 37: PBMA + Fe_2O_3 después del filtrado	86
Fotografía 38: Raspado	86
Fotografía 39: Horno de secado	87
Fotografía 40: Proceso de trituración del PBMA + Fe_2O_3	87
Fotografía 41: Presentación comercial del $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	88
Fotografía 42: $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en solución.....	88
Fotografía 43: $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ para preparar la solución madre.....	91
Fotografía 44: Alícuotas de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	91
Fotografía 45: Preparación de alícuotas de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	92

Fotografía 46: Alistamiento de muestra para toma de absorbancia.....	93
Fotografía 47: Degradé de las alícuotas $K_2Cr_2O_7$	93
Fotografía 48: Solución de $K_2Cr_2O_7$ a pH 2,17	97
Fotografía 49: Solución $K_2Cr_2O_7$ a pH 4,89.....	97
Fotografía 50: Soluciones preparadas a valores de pH distintos	98
Fotografía 51: Interacción del $K_2Cr_2O_7$ con los polímeros.....	98
Fotografía 52: Filtrado de la matriz acuosa	99

Lista de Apéndices

Apéndice A: Tablas de espectroscopía	136
Apéndice B: Infografía	139
Apéndice C: Esquema general	140

Índice de Abreviaturas y Fórmulas Principales

ABCN	Iniciador 1.1' azobis (ciclohexanocarbonitrilo)
BMA	Monómero: Butilmetacrilato, metacrilato de butilo
BPL	Buenas prácticas de laboratorio
Cr ⁶⁺	Cromo hexavalente, cromo (VI).
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de potasio - Analito
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico
IR	Espectro infrarrojo
IR-ATR	Infrarrojo - Attenuated Total Reflection
MMA	Monómero: metilmetacrilato, metacrilato de metilo
PBMA	Poli(butilmetacrilato) – poli (metacrilato de butilo), poli (metacrilato de n-butilo) Polímero sin modificar
PBMA + Fe ₂ O ₃	Polímero modificado – Composito – Matriz polimérica
Tg	Temperatura de transición vítrea
UV – Vis	Ultravioleta visible

Glosario

Absorbancia	Es una medida de la radiación que absorbe una sustancia cuando sobre ésta inciden ondas electromagnéticas generalmente en la región visible de una determinada longitud de onda (Salgado & Hernández, 2014)
Absorción	Es un fenómeno por el cual las moléculas de una molécula penetran en otra.
Adsorción	Fenómeno en el que una sustancia se adhiera a la superficie de otra.
Alícuotas	Soluciones que se preparan a partir de otra de concentración conocida
Analito	Es una sustancia química de la que se interesa conocer algún o algunos datos
Biorremediación	Se utilizan microorganismos para limpiar el agua subterránea
Biosorción	Procesos de sorción (absorción, desorción) en el que la biomasa (material orgánico) captura metales pesados de aguas residuales (Luis Federico Sala, y otros, 2010)
Cadena Trófica	También es llamada cadena alimenticia
Catalizadores	Sustancias que no intervienen en una reacción química, pero la aceleran
Curva De Calibración	Curva que se construye a partir de concentraciones conocidas de una sustancia con respecto a la cantidad de luz que absorbe
Enlace Vinílico	Moléculas que tienen un doble enlace carbono - carbono
Escinde	Molécula que se divide o se separa
Especie Química	Es la forma de referirse a cualquier compuesto químico
Espectro	Es la imagen que presenta una sustancia cuando es excitada con un haz de luz

Fotocatálisis Heterogénea	Procesos fotoquímicos en los que se utiliza energía luminosa, solar o artificial para para la eliminación de contaminantes emergentes de las aguas residuales (González M. G., 2021)
Grupos Funcionales	Corresponden a un patrón de átomos con unos comportamientos y características determinadas
Ligandos	Un ligando es un compuesto orgánico capaz de enlazarse a un centro metálico a través de uno o varios átomos (UABDivulga, 2007).
Oligoelemento	Elemento esencial para el organismo humano
Radicales Libres	Moléculas que tienen electrones desapareados
Soluciones Amortiguadoras	Se utilizan para mantener constante el pH de las soluciones

Planteamiento del Problema

El sector industrial es generador de altos volúmenes de contaminación (Camacho, 2020) a nivel mundial afectando tanto el aire, el suelo y los cuerpos de agua, siendo esta última una de las preocupaciones más acuciantes para la supervivencia humana “Cada día, alrededor de 1000 niños mueren debido a enfermedades diarreicas asociadas a la falta de higiene.

Aproximadamente el 70% de todas las aguas extraídas de los ríos, lagos y acuíferos se utilizan para el riego. Las inundaciones y otros desastres relacionados con el agua representan el 70% de todas las muertes relacionadas con desastres naturales” (Naciones Unidas, 2019) y teniendo en cuenta la importancia vital del agua, es menester encontrar soluciones de mitigación de esta contaminación producida por las industrias, hoy “más del 80% de las aguas residuales resultantes de actividades humanas se vierten en los ríos o el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación” (Palou, 2019).

Una de las fuentes de contaminación más preocupantes es el cromo hexavalente (Cr^{6+}), que es un elemento ampliamente usado en la industria en áreas como el revestimiento plástico, galvanoplastia de metales para resistencia de la corrosión, curtido y acabado de cueros, en pigmentos y para conservantes de madera (Pabón, R. Benítez, Sarria-Villa, & Gallo, 2020) pero sus efectos para la salud humana son muy nocivos. El cromo VI ejerce una acción corrosiva sobre la piel, produciendo úlceras cutáneas (Tellez, Carvajal, & Gaitán, 2004), muchos estudios han demostrado que el cromo (VI) que forma dicromatos “provoca un estrés oxidativo a través de una mayor producción de Especies Reactivas del Oxígeno (ROS) que conducen al daño del ADN genómico y el daño oxidativo de los lípidos y las proteínas” (Montaubán, 2013), dicho de una forma más sencilla, son compuestos cancerígenos por lo que deben generarse soluciones acertadas desde la academia, el laboratorio, la literatura y la industria que impacten

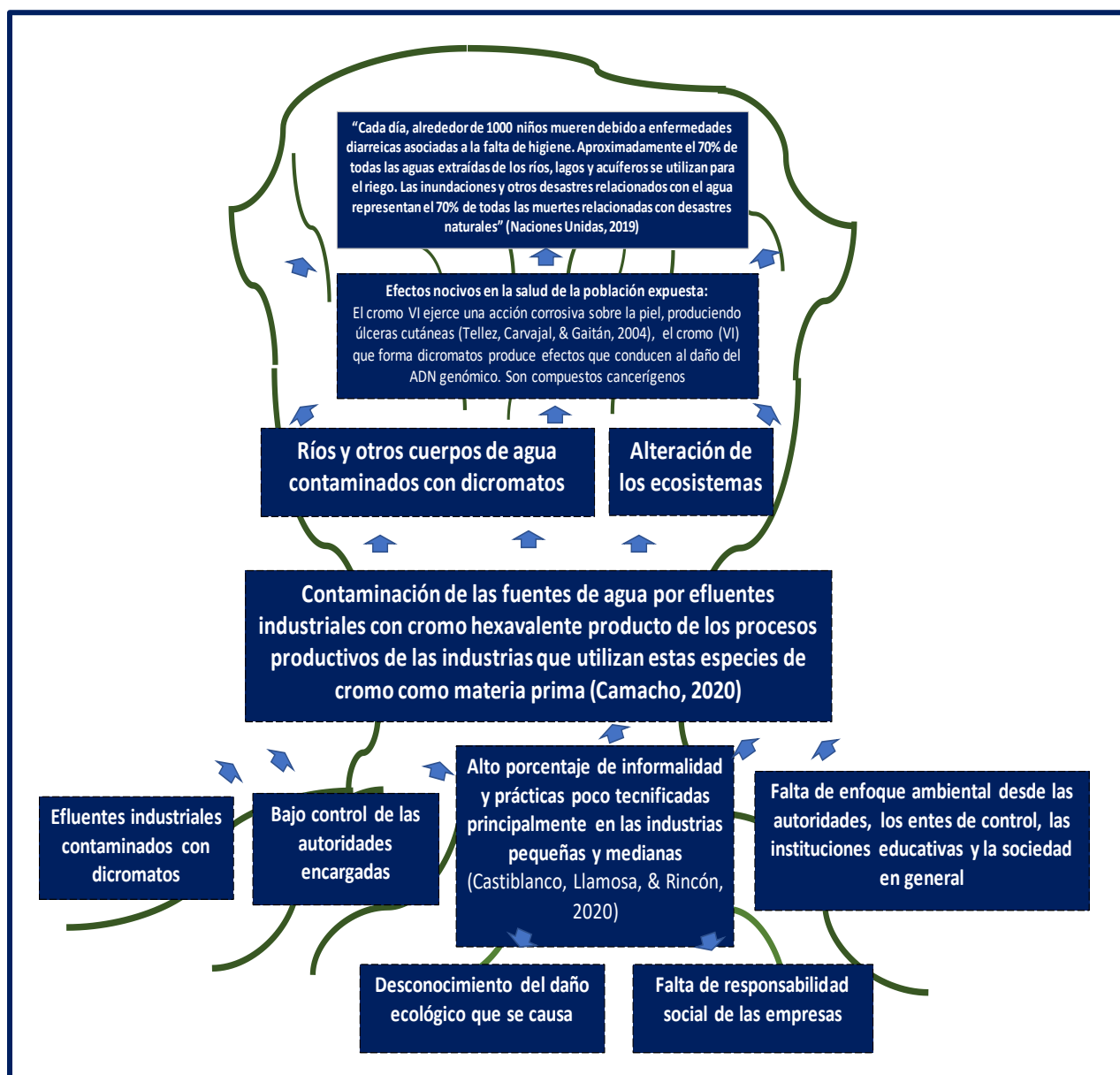
positivamente en la mitigación de la contaminación de las aguas producto de la descarga industrial de dicromatos.

Árbol de Problemas

Esta serie de consideraciones se ha plasmado en el siguiente Árbol de Problemas.

Esquema 1

Árbol de Problemas, con el cual se identifica el problema central y sus principales causas



Fuente: Autor

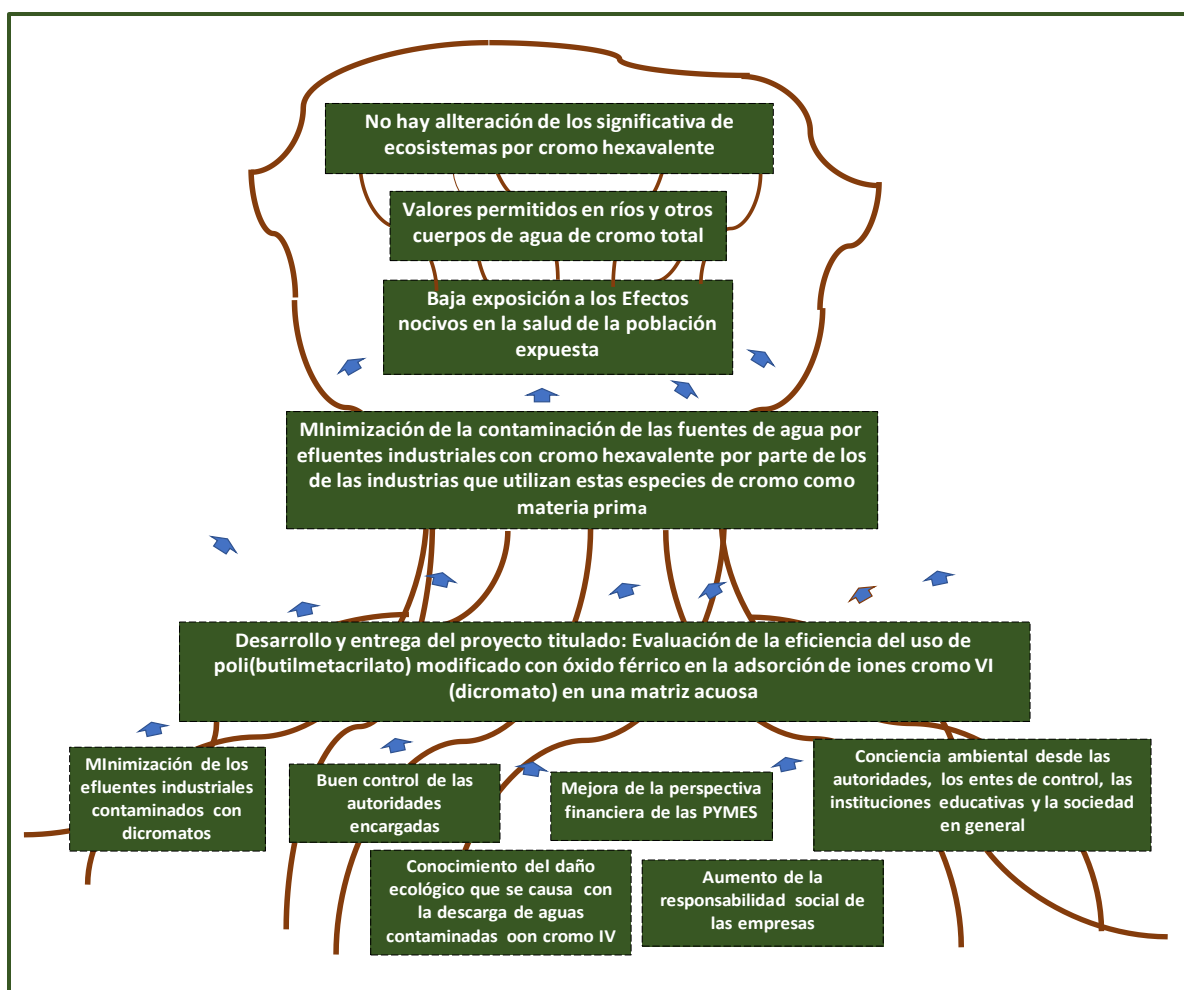
Entonces la pregunta que debe plantearse es la siguiente:

¿Pueden adsorberse dicromatos de forma eficiente por medio de procesos fisicoquímicos que involucren el uso de materiales poliméricos con base en metacrilato para su aplicación posterior y proyección al escalamiento industrial en el tratamiento de efluentes industriales? Para empezar a dar respuesta a esta pregunta se plantea el árbol de objetivos y la matriz del marco lógico:

Árbol de Objetivos

Esquema 2

Árbol de objetivos, con el cual se empieza a proyectar de la solución.



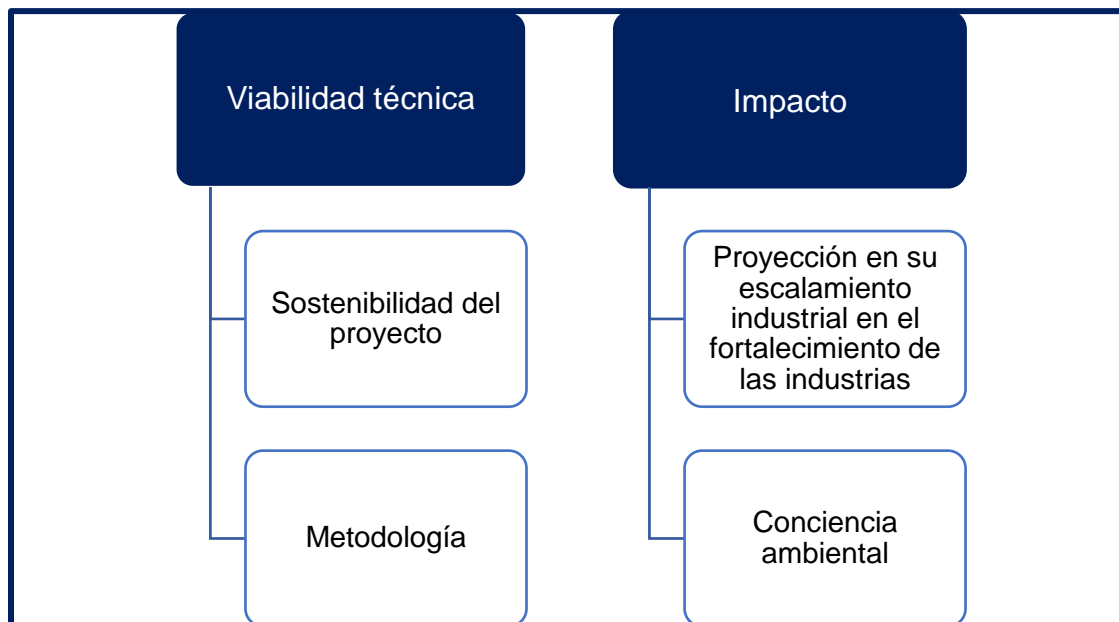
Fuente: Autor

Selección de la Estrategia Óptima

Desarrollo y entrega del proyecto titulado: “Evaluación de la eficiencia del uso de poli(butilmetacrilato) modificado con óxido férrico en la adsorción de iones cromo VI (dicromato) en una matriz acuosa”, teniendo en cuenta aspectos como la viabilidad técnica, sostenibilidad del proyecto, es decir que con los recursos disponibles se pudiera llevar a buen término y su metodología (Metodología), que fuera adecuada para el alcance propuesto del proyecto; además, que su potencial aplicación y escalamiento a nivel industrial puede contribuir al fortalecimiento de las industrias y generar un impacto ambiental positivo, así como una conciencia ambiental en autoridades, entes de control, instituciones educativas, de salud y sociedad en general.

Esquema 3

Selección de la estrategia óptima



Fuente: Autor

Matriz del Marco Lógico

Tabla 1

Matriz del marco lógico

	Objetivo	Indicadores	Medios de verificación	Supuesto
Fin	Aportar a la disminución de la contaminación de las aguas por metales pesados, en este caso por cromo hexavalente	Mediciones directas en los cuerpos de agua	Cifras medios oficiales	Los países logran la concientización de la peligrosidad de la contaminación de las aguas por cromo hexavalente
Propósito	Generar un mecanismo con el que se adsorban los iones Cr^{6+} evitando su descarga a las fuentes de agua.	Cantidad de dicromato adsorbido/cantidad de dicromato utilizado * 100 Absorbancia dicromato con las diversas condiciones/Absorbancia del dicromato de las alícuotas en el estado inicial * 100	Registro de la absorbancia del dicromato	Proceso de difícil aplicación en las industrias
Componentes	Aplicación de la técnica espectrofotometría UV-Vis en la determinación de la adsorción de dicromatos por parte del PBMA modificado con Fe_2O_3	Rendimiento de la reacción Absorbancia del dicromato de potasio	Absorbancia antes (sin el polímero) realizada a diferentes alícuotas medidas en el espectrofotómetro UV-Vis y después (una vez realizada la adición del PBMA modificado con	No encontrar la disminución de la absorbancia lo que indicaría que no es eficiente la reacción

		Fe ₂ O ₃) del dicromato de potasio		
Actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de la disolución de dicromato de potasio. • Obtención de las alícuotas de dicromato de potasio en distintas concentraciones de 0,5mL; 1,0mL; 1,5mL; 2,0mL; 2,5mL; 3,0mL; 3,5mL; 4,0mL; 4,5mL y 5mL, todas diluidas en 10mL. • Medición de la absorbancia de las soluciones diluidas. • Obtención de las curvas de calibración • Síntesis del poli(butilmetacrilato) • Síntesis del polímero modificado con óxido férrico • Caracterización por infrarrojo de los compuestos obtenidos • Ensayos de adsorción bajo diferentes condiciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Solución preparada [Concentración Molar] • Alícuotas preparadas [Concentración Molar] obtenidas a partir de la ecuación $C_1V_1 = C_2V_2$ • Absorbancia de las soluciones diluidas • Espectros infrarrojos • Porcentaje de reducción de la absorbancia del dicromato de potasio 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión bibliográfica • IR (espectros infrarrojos) • Curvas de calibración • Datos obtenidos en la experimentación • Ejecución presupuestal en especie • Registro fotográfico del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de las actividades sin mayores inconvenientes o retos

Fuente: Autor

Justificación

El desarrollo industrial ha producido la comodidad de la vida actual, sin embargo, también ha producido el desborde de la contaminación tanto en el aire, el suelo y las aguas que son las despensas naturales del sustento de la vida en el planeta (Castiblanco, Llamosa, & Rincón, 2020). Dada la amplitud del tema se focaliza en tan solo uno de los aspectos del problema de alcance global, como es la contaminación de los cuerpos de agua, los que han sido constantemente receptores de metales pesados, entre ellos el cromo, los cuales, tienen una alta persistencia en el medio debido a que no son biodegradables ni química ni biológicamente y tienen grandes posibilidades de incorporación a la cadena trófica donde también se encuentra el ser humano (Calva & Torres, 2003). El cromo hexavalente es la especie base de este estudio debido a su amplia utilización en diversas industrias en forma de sales y a que de acuerdo con muchos estudios es altamente tóxica (Tellez, Carvajal, & Gaitán, 2004).

La contaminación producida por las industrias se ha visibilizado desde hace tiempo atrás y muchos autores se han preocupado por registrar esta situación, que se ha configurado como un problema a nivel mundial (Arauzo, Rivera, M., Noreña, & O., 2003); en Colombia, ya en 2007 se vertían cerca de 300 toneladas por año de derivados del cromo a los cursos de agua (Céspedes, Valencia, & Jiménez, 2007). En Bogotá, dada la existencia de numerosas curtiembres, existe la preocupación constante por los niveles de cromo hexavalente en las fuentes de agua que atraviesan la ciudad como el río Tunjuelo (Camacho, 2020) y propiamente del río Bogotá se tienen reportes de contaminación por cromo desde los municipios de Villapinzón y Chocontá (Pinzón, 2019)

Para contrarrestar este problema deben ser protagonistas las autoridades tanto nacionales como internacionales. De acuerdo con la Constitución Política de Colombia (Artículos 79 y 80, principalmente), existen algunos derechos de obligatorio cumplimiento por parte del Estado:

“Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas”. Por su parte la ONU declaró que el medio ambiente saludable es un derecho humano “La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró hoy, 28 de julio de 2022, que todas las personas del mundo tienen derecho a un medio ambiente saludable” (ONU, 2022).

Debido a lo expuesto anteriormente, se necesita un recurso eficiente que permita la adsorción de dicromatos, que apoye a la productividad de las industrias que usan cromo y al cumplimiento de la normatividad, y que, a la vez, mitigue eficazmente la contaminación por esta causa de las fuentes de agua, por lo que se propone el uso de materiales poliméricos con base en metacrilatos.

Para lograr entender la problemática desde varios puntos de vista, se crea la matriz de las partes interesadas.

Matriz de las Partes Interesadas

Tabla 2

Matriz de las partes interesadas

Parte interesada	Necesidades	Expectativas	Compromisos del proyecto
Industrias en las que el dicromato hace parte de su proceso productivo	Ensayos e investigaciones que propongan soluciones que permitan retener el dicromato para prevenir la contaminación en los cursos de agua y el cumplimiento de la normatividad.	Eficacia de los procesos, control de los costos de producción, maximización de las utilidades.	Responder la pregunta problema de esta investigación: ¿Pueden adsorberse dicromatos de forma eficiente por medio de procesos fisicoquímicos que involucren el uso de materiales poliméricos con base en metacrilato para su aplicación posterior y proyección al escalamiento industrial en el tratamiento de efluentes industriales?
Profesores, estudiantes de ingenierías y ciencias exactas	Estudios realizados y publicaciones que abarquen los temas que relacionan las palabras clave: Contaminación por cromo hexavalente, poli(butilmetacrilato), óxido férrico, polímeros, dicromato, adsorción	Encontrar la información veraz, acertada y comprobada relacionada con los temas enunciados en cualquier búsqueda sencilla en bases de datos o repositorios institucionales	A presentar una información objetiva, sencilla, clara y específica de los temas relacionados A presentar unas conclusiones veraces A sugerir y recomendar continuar con la investigación.
Universidad Nacional y a Distancia UNAD	Generar en sus estudiantes el interés por la investigación Estar bien representados frente a la comunidad científica por sus estudiantes	Hacer parte a la presente investigación del Repositorio Institucional Ser reconocidos como ente formador de la estudiante autora de este texto	A dar los respectivos créditos a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Universidad Nacional de Colombia	Servir a la comunidad educativa con el apoyo a estudiantes de otras instituciones	Recibir los créditos correspondientes por el apoyo	A dar los respectivos créditos a la Universidad Nacional de Colombia

		prestado a la estudiante de la UNAD	
Autora y directores del proyecto de investigación	Apoyo por parte de la UNAD para que sea posible la realización de esta investigación	Respeto por los derechos de autor	A entregar el documento libre de plagio, referenciado con normas APA y confiar en la protección de los derechos de autor de la investigación, y en acceso a la información de cualquier usuario interesado
Bibliotecas y repositorios institucionales	Investigación relativa a los temas relacionados	Acervo de la información objetiva, veraz y escrita en su totalidad por la autora, respetando los derechos de autor	A cumplir con todas las exigencias y normatividad al respecto. A respetar los derechos de autor de los trabajos referenciados
Comunidad científica	Investigación avalada por resultados claros y bien presentados	Acceso a la información	Responsabilidad social y respeto por la comunidad científica
Comunidad aledaña a industrias como curtiembres y otras y que además circunden los cuerpos de agua afectados	Protección de los derechos al medio ambiente sano de acuerdo con la Constitución Política de Colombia y la ONU	Que se respete la normatividad Respeto por los espacios públicos y las fuentes de agua	A investigar con materiales poliméricos con base en metacrilato que permitan la adsorción de dicromatos de forma eficiente por medio de procesos fisicoquímicos para el tratamiento de efluentes industriales
Autoridades ambientales	Cumplimiento de la normatividad por ser el organismo de control	Al cumplimiento de la normatividad	Cumplimiento de la normatividad
Gobierno	Supervisa el cumplimiento de la normatividad. Debe generar soluciones que aporten eficientemente a la protección del medio ambiente.	Al cumplimiento de la normatividad A la administración eficiente de los recursos	A cumplir la normatividad y proteger el medio ambiente.
Comunidad nacional e internacional	Desarrollo eficaz de los procesos y protección al medio ambiente	Cumplimiento de la normatividad vigente y compromisos pactados. Cumplimiento de los compromisos internacionales	Al cumplimiento de los compromisos adquiridos y a las normas establecidas.

Fuente: Autor

Introducción

Este trabajo participa en los esfuerzos que a nivel mundial se están generando en la recuperación y prevención de la contaminación de las fuentes de agua dada la gravedad y trascendencia de la problemática. “La tasa de contaminación del agua puede ser estimada en 2000 millones de metros cúbicos diarios” (Reyes, Vergara, Torres, & Díaz-Lagos, 2016), ante este preocupante panorama la ONU “en septiembre 2015 la Asamblea General ha acordado un objetivo específico (el numero 6): “Asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos”. Esto significa que realmente el agua y el saneamiento se han convertido en una prioridad para los Estados Miembro” (ONU - DAES, 2015)

En torno a todas las consideraciones con respecto a la contaminación ambiental, este trabajo quiere aportar en la proyección de una posible solución en la mitigación de la contaminación del agua generada por las industrias que en su proceso productivo utilizan cromo (específicamente dicromatos) y que ese proceso involucra la descarga en sus efluentes de esta especie de cromo, entre ellas, las curtiembres y otras industrias como el proceso de cromado de plástico donde se utilizan baños con cromo VI como capa protectora anticorrosiva y acabado brillante (Meléndez & Milla, 2006), (Pinzón, 2019)

La contaminación por cromo al igual que muchos otros metales pesados es preocupante dado que afecta la seguridad alimentaria y la salud pública. Esta contaminación, proviene, entre otros causales, del uso para riego de aguas afectadas (Singh et. al, 2010; Francisca et. al, 2015; Li et. al, 2015), citado por (Reyes, Vergara, Torres, & Díaz-Lagos, 2016).

Otras investigaciones al respecto a nivel mundial han determinado y normativizado los niveles permitidos de metales pesados, el cromo entre ellos. La UE legisla una tolerancia de cromo en alimentos de 0,10 ppm. “la suma de los niveles de concentración de plomo, cadmio,

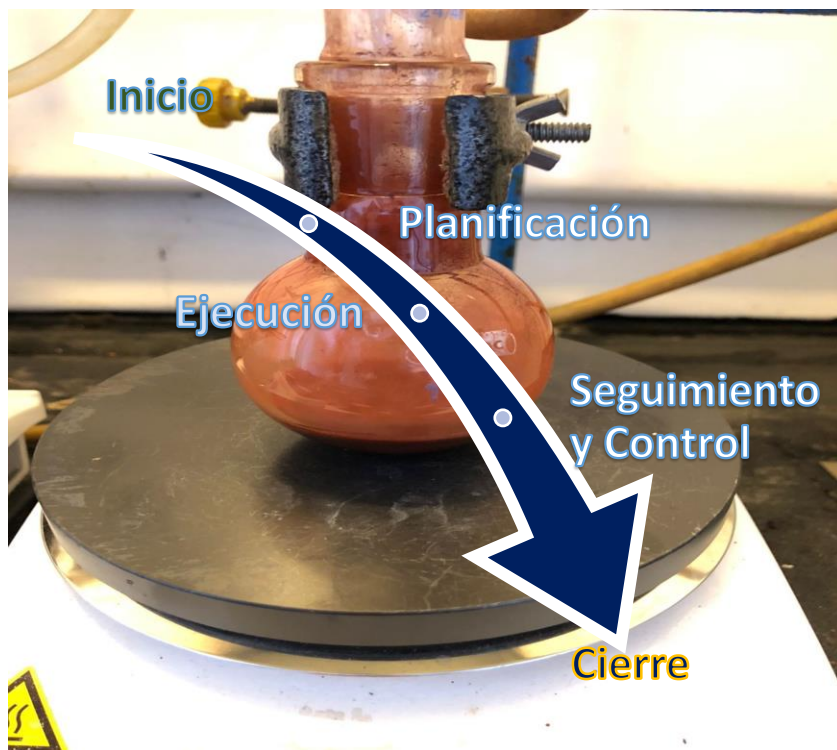
mercurio y cromo hexavalente presente en los envases o sus componentes no será superior a: 100 ppm en peso” (UE, 2019).

En Colombia el Decreto 475 de 1998 del Ministerio de Salud Pública indica como valor admisible de Cromo Hexavalente (Cr^{6+}) 0.01 en mg/L. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el Ministerio de Protección Social en la Resolución Número (2115) del 22 de junio de 2007, indican como valor máximo permitido de Cromo total 0,05 mg/L.

Este proyecto, busca evaluar el uso de una matriz polimérica [poli(butilmetacrilato) modificada con óxido férrico] en la adsorción de iones (dicromato) presentes en disoluciones acuosas, y proyectar sujeto a su escalamiento industrial generar un aporte significativo a la industria para cumplir con la normatividad, y a la vez, contribuir con la mitigación de la problemática de la contaminación de las aguas con sales de cromo hexavalente. Este proyecto de investigación se realizará en cinco etapas, las cuales se visualizan en el siguiente esquema:

Esquema 4

Fases del proyecto de investigación



Fuente: Autor

En la etapa de Inicio se identifica y visualiza el problema, se justifica el por qué es importante abordar el hecho de la contaminación con dicromatos, se identifican las partes interesadas y se propone una solución. Dentro de este trabajo ya se ha realizado esta etapa por lo que se puede avanzar a la siguiente, en lo referente a la planificación, donde se plantean los objetivos, se define el cronograma de trabajo, se identifican los recursos (tanto materiales como humanos) que se requieren para la ejecución del proyecto que permitirá proponer una solución a la contaminación de las aguas por dicromatos.

Realizada la planificación, se procede con la ejecución que consiste en la realización de las tareas que han sido planteadas y planificadas. La fase de seguimiento y control, realmente se da a lo largo de todo el proyecto, puesto que es necesario el control en cada uno de los pasos que se dan en la síntesis del polímero, el cuidado de las mediciones y la captura de los datos para determinar si se están cumpliendo los objetivos; en esta etapa, se toman las acciones pertinentes para ir ajustando el trabajo a los resultados finales que se buscan. En la fase de cierre se dan los resultados, las conclusiones y se propone el planteamiento de este proyecto a nivel industrial.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el uso de poli(butilmetacrilato) modificado con óxido férrico en la adsorción de iones (dicromato) presentes en disoluciones acuosas, bajo distintas condiciones en escenarios controlados de laboratorio.

Objetivos Específicos

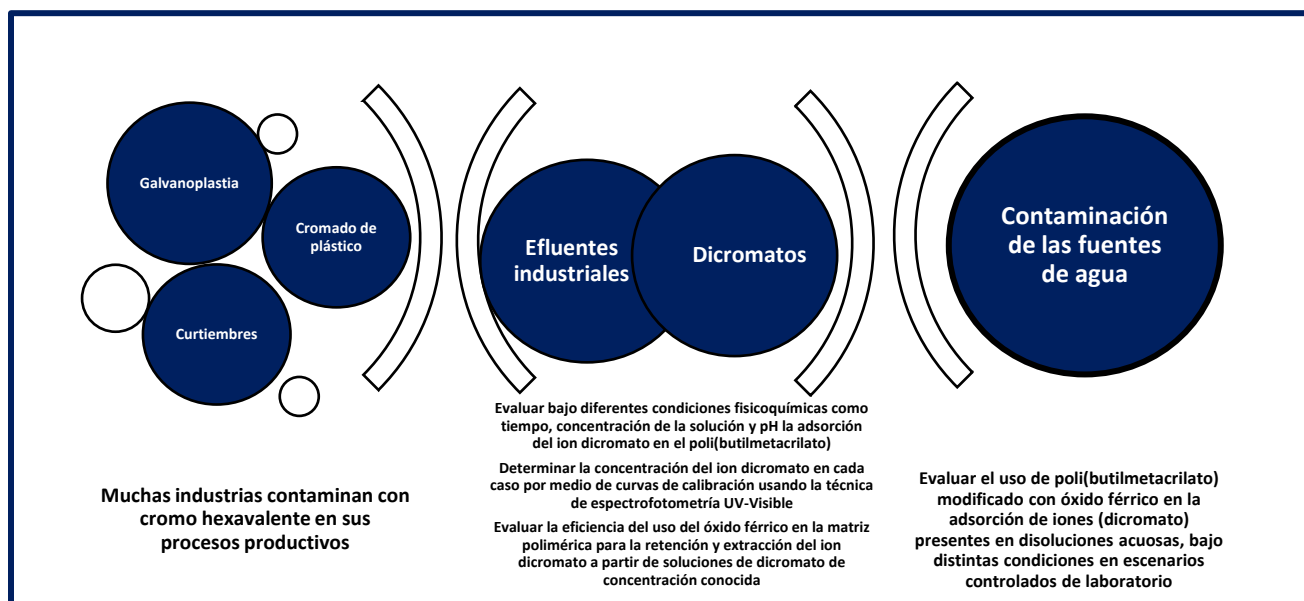
Evaluar bajo diferentes condiciones fisicoquímicas como tiempo, concentración de la solución y pH la adsorción del ion dicromato en el poli(butilmetacrilato).

Determinar la concentración del ion dicromato en cada caso por medio de curvas de calibración usando la técnica de espectrofotometría UV-Visible.

Evaluar la eficiencia del uso del óxido férrico en la matriz polimérica para la retención y extracción del ion dicromato a partir de soluciones de dicromato de concentración conocida.

Esquema 5

Objetivos



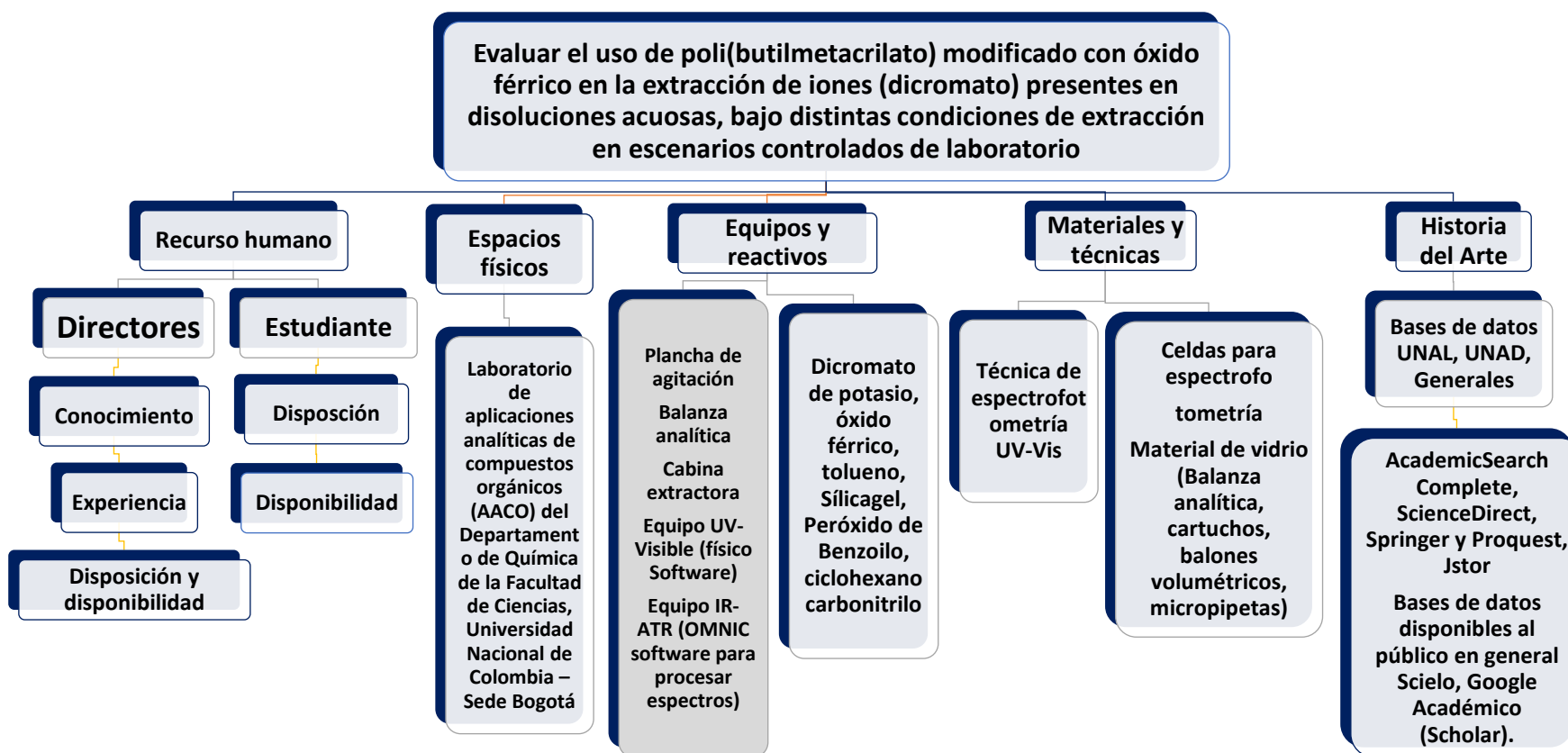
Fuente: Autor

Recursos

Estructura de Desglose de Recursos (RBS)

Esquema 6

Estructura de desglose de recursos



Fuente: Autor

Matriz de Recursos

Tabla 3

Matriz de recursos

Recursos Necesarios				
Recurso	Descripción	Valor	Fuente Financiadora	Monto (\$)
Equipo Humano	Director del proyecto de investigación por parte de la Universidad Nacional de Colombia (30 horas)	Valor de la hora: \$80.000	Aporte en especie por parte de los profesores	\$ 2.400.000
	Director del proyecto de investigación por parte de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD (30 horas)			
	Estudiante de Ingeniería Industrial (120 horas)	Valor de la hora: \$30.000	Personal	\$ 3.600.000
Equipos	Espectrómetro Infrarrojo	Los espectros de Infrarrojo se obtendrán en un espectrómetro Thermo Fisher Scientific Nicolet iS10 FT-IR con un accesorio ATR de Selenuro de Zinc monolítico. La información de los espectros se registrará en valores de número de onda (cm ⁻¹). Uso del equipo 10 horas. La hora de uso valorada en \$100.000	Por disposición de la Universidad Nacional de Colombia, el equipo está disponible para el desarrollo de esta investigación en el laboratorio de Aplicaciones Analíticas de Compuestos Orgánicos (AACO) ubicado en los laboratorios 309 y 334 del edificio 451, Departamento de química, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá	\$1.000.000*
	Estudios por espectroscopia UV-Visible	La información sobre la absorbancia de las soluciones en la región UV-Visible (200 a 800 nm) se obtendrán en un	Por disposición de la Universidad Nacional de Colombia, el equipo está disponible para el desarrollo de esta investigación en el	\$3.000.000*

		espectrofotómetro EMC-11-UV, se obtendrán los datos en celda de cuarzo y los datos generados se darán en absorbancia. Uso del equipo 20 horas. La hora de uso valorada en \$150.000	laboratorio de Aplicaciones Analíticas de Compuestos Orgánicos (AACO) ubicado en el laboratorio 309 del edificio 451, Departamento de química, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá	
Materiales y suministros	Sustancias Químicas como ácidos, bases, sales. Materiales poliméricos poli(butilmetacrilato), óxido férrico.	Los reactivos necesarios para el proyecto son dicromato de potasio, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, ácido acético, acetato de sodio, ácido fosfórico, fosfato diácido de sodio, fosfato monoácido de sodio, fosfato de sodio, carbonato de sodio, bicarbonato de sodio, etanol, así como el sorbente PBMA	Serán proporcionados por el laboratorio de Aplicaciones Analíticas de Compuestos Orgánicos (AACO) del Departamento de química, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá	\$ 10.000.000*
Bibliografía	Bases de Datos Universidad Nacional Abierta y a Distancia y Universidad Nacional de Colombia	Academic Search Complete, ScienceDirect, Springer y Proquest, Jstor Bases de datos disponibles al público en general Scielo, Google Académico (Scholar).	Acceso directo	\$ 0
Total				\$ 20.000.000

Fuente: Autor

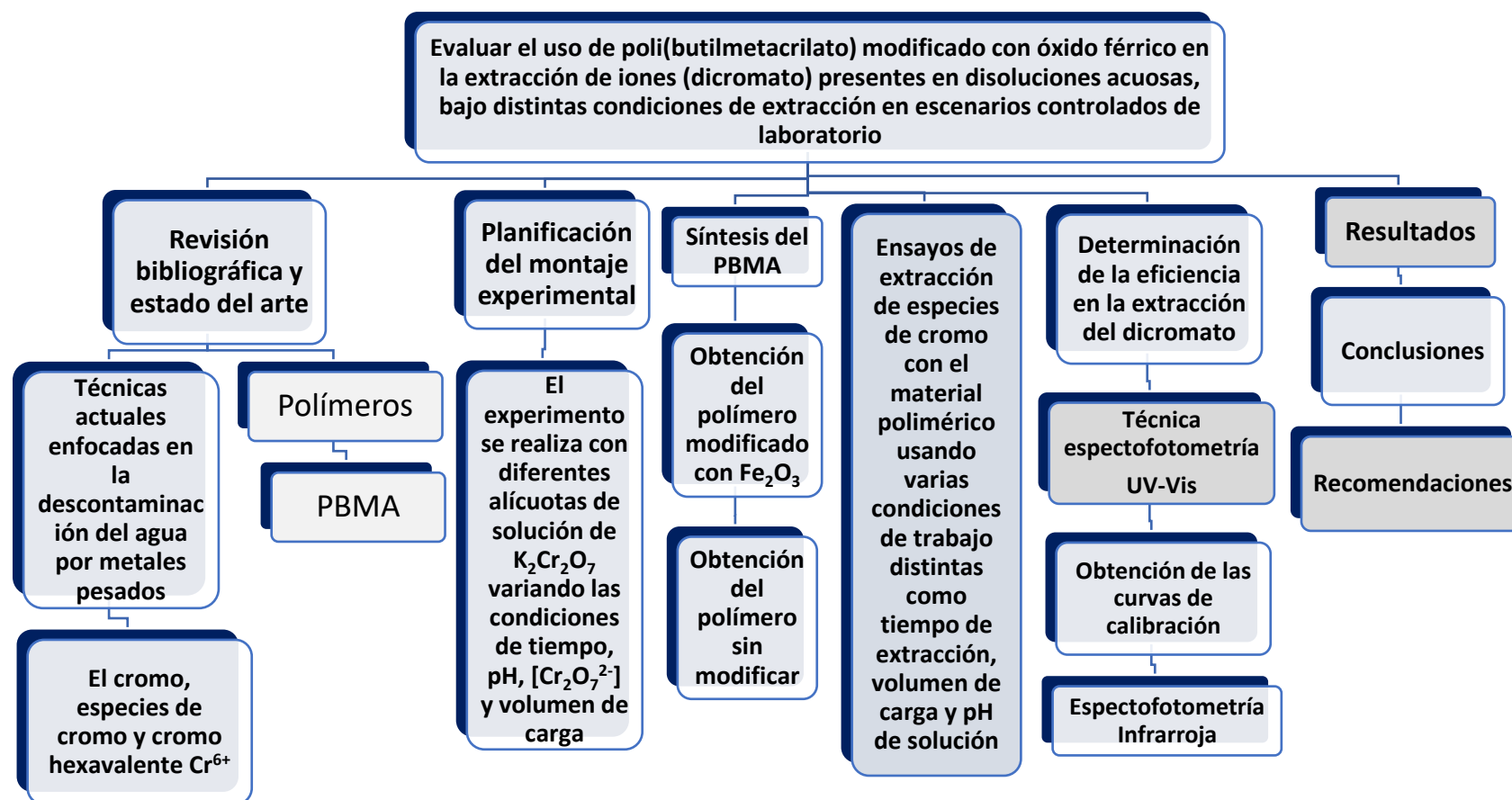
*El monto de los recursos indicados son asumidos por el grupo de Investigación de Aplicaciones Analíticas de Compuestos Orgánicos del Departamento de Química Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá en especie.

Planificación de Actividades

Estructura de Desglose del Trabajo (EDT)

Esquema 7

Estructura de desglose del trabajo

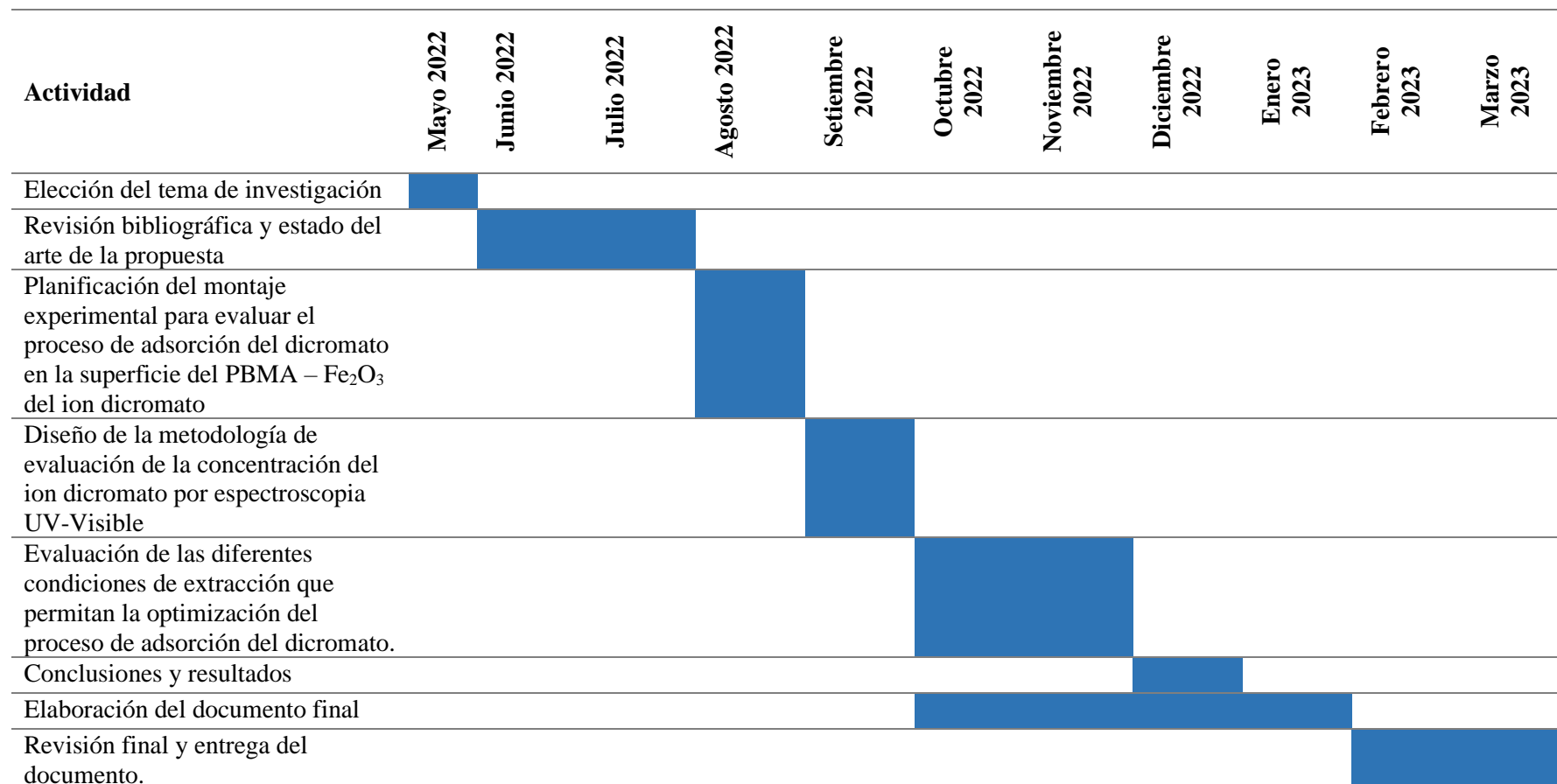


Fuente: Autor

Diagrama de Gantt

Tabla 4

Diagrama de Gantt



Fuente: Autor

Marco Conceptual y Teórico

El Cromo

Figura 1

La cromita



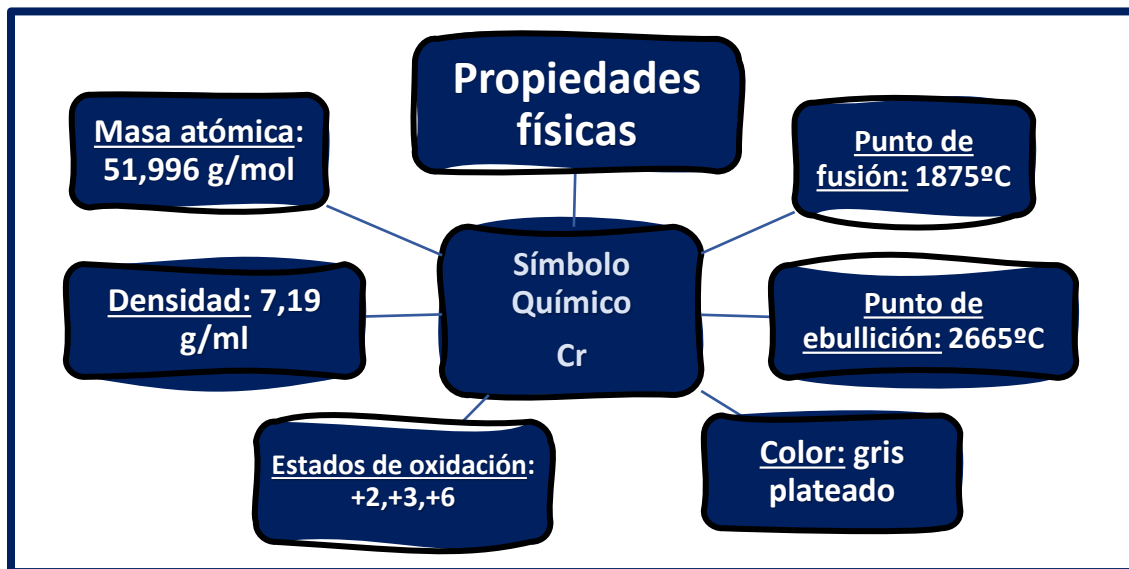
Fuente: (Admin, 2020)

El Cromo (Cr) es el elemento más abundante del grupo de los elementos de transición, clasificado entre los metales pesados, número atómico 24, pertenece al grupo 6 de la tabla periódica, con peso atómico 51,996, ocupa el cuarto lugar entre los 29 elementos biológicamente más importantes de la corteza terrestre (Tellez, Carvajal, & Gaitán, 2004), su apariencia es blanco plateado, brillante, además es duro, quebradizo y resistente a la corrosión El cromo no se encuentra solo en la naturaleza sino en forma de cromita ($\text{Fe}_2\text{O} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) o piedra de cromo férrico (Lenntech Water Treatment Solutions, 2023), (Figura 1). Es un oligoelemento en su forma trivalente Cr^{3+} (Montaubán, 2013). El cromo hexavalente Cr^{6+} es de alta toxicidad “considerado carcinógeno del grupo I por la International Agency for Research on Cancer (IARC)” (Cuberos, Rodriguez, & Priet, 2009). Las ocurrencias más importantes de cromo se encuentran en Turquía, Estados Unidos, Sudáfrica, Albania, Finlandia, Irán, Madagascar, Rusia, Rodesia Meridional, Cuba, Brasil, Japón, India, Pakistán y Filipinas. En Colombia no se reporta oficialmente producción de cromo (González H. , 2016).

Propiedades Físicas del Cromo

Esquema 8

El cromo - propiedades físicas

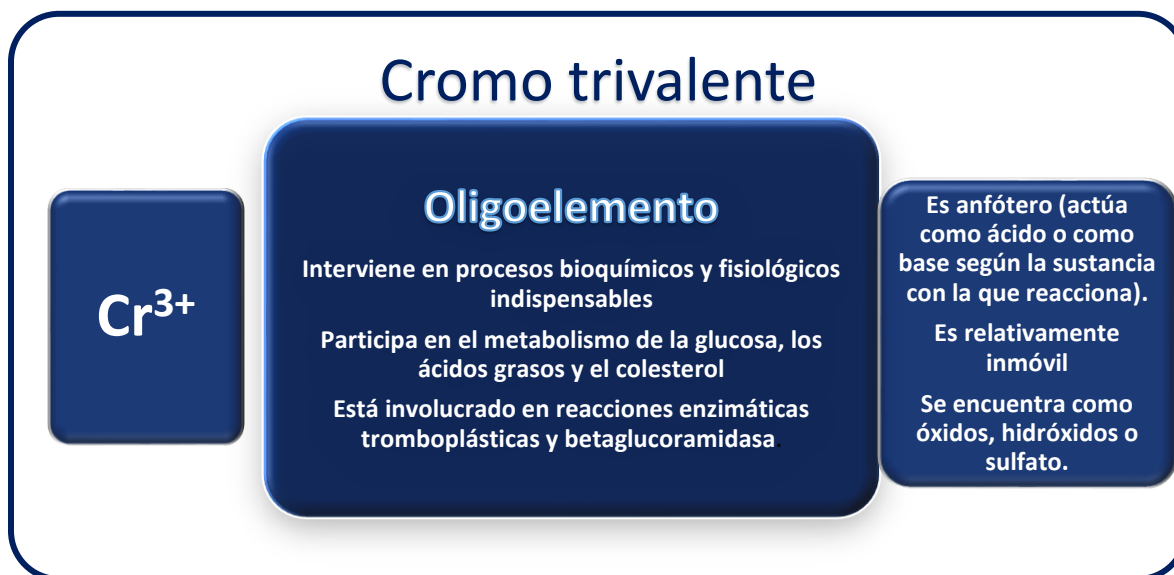


Fuente: Autor

Especies de Cromo

Esquema 9

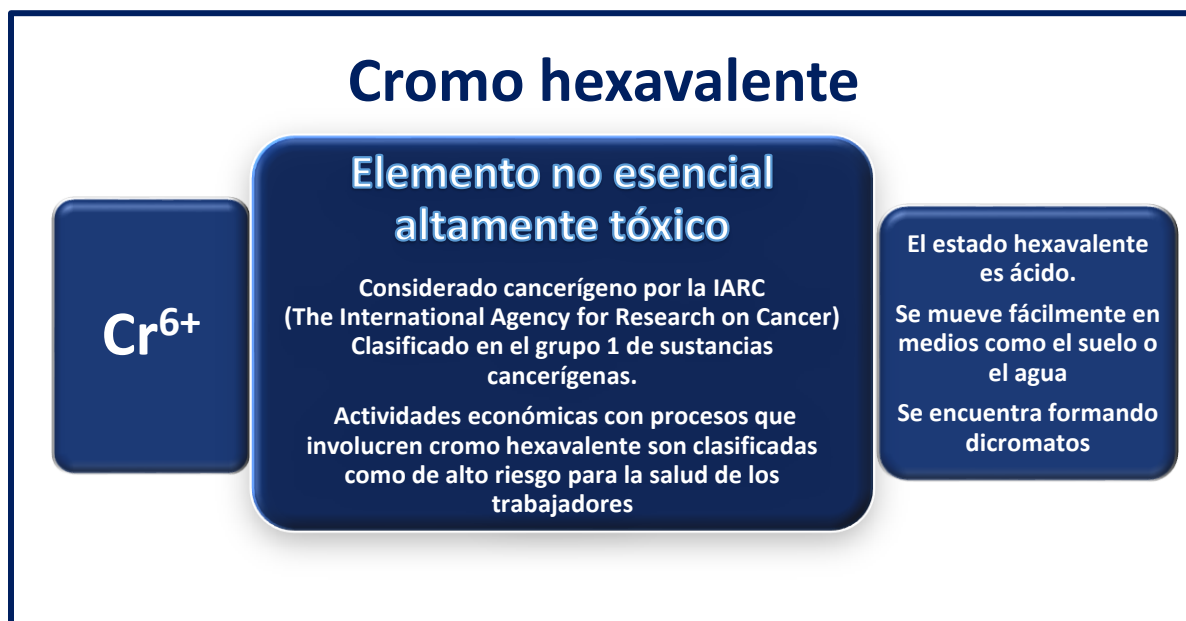
Cromo trivalente



Fuente: Autor

Esquema 10

Cromo hexavalente



Fuente: Autor

Métodos de Tratamientos de Aguas Residuales

En la actualidad existen muchos métodos utilizados por las industrias para la descontaminación de las aguas, principalmente en el aspecto de los metales pesados, usando extensivamente tratamientos físicos como la filtración, ósmosis, coagulación, adsorción y el desarrollo de nuevas membranas líquidas (Sánchez J. K., 2019), (Benito, 2006). La eliminación de iones metálicos tóxicos como plomo (II), cadmio (II) y mercurio (II), utilizando materiales poliméricos modificados con ligandos es un enfoque prometedor para mejorar la calidad ambiental, debido a su alta estabilidad, alta selectividad y remoción eficiente (Castillo, Maldonado, & Esteso, 2022)

Los tratamientos que algunas industrias utilizan para controlar la contaminación por causa de sus efluentes son la reducción química para transformar el cromo VI en cromo III. En

curtiembres el cromo es retenido precipitándolo como hidróxido de cromo mediante un ajuste de pH (Montaubán, 2013).

También se ha estudiado el uso de la fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2) como otro de los métodos estudiados para la eliminación de cromo hexavalente, en el estudio denominado “Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales proveniente de procesos de cromado de plásticos en empresas de Bogotá” las autoras comprobaron que los procesos fotocatalíticos son más eficientes en medios ácidos (Catiblanco & Perilla, 2019).

Existen estudios muy interesantes basados en tratamientos bioquímicos, por ejemplo, biosorción de cromo con hoja de café (Higuera, Folrez, & Arroyave, 2009) donde se mostró que la hoja de café variedad castillo puede ser aplicada para la descontaminación de efluentes ricos en cromo (VI).

También existen técnicas convencionales utilizadas principalmente para la remoción de metales pesados en el agua “Las técnicas convencionales para la remoción de metales pesados son: oxidación-reducción, biorremediación, ósmosis inversa, tratamiento electroquímico, coagulación, ablandamiento con cal, precipitación, filtración por membranas, intercambio iónico y adsorción” (Burciaga, Claudio, Cano, Martínez, & Vega, 2020).

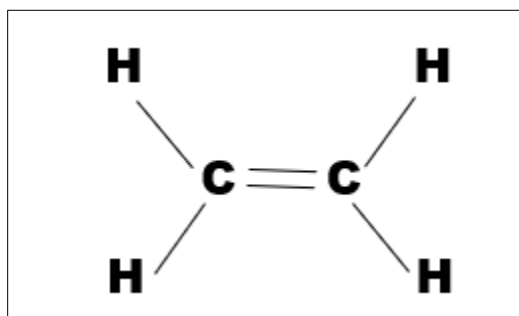
Polímeros

Los polímeros son sustancias formadas por moléculas muy grandes (macromoléculas), compuestas por muchas unidades pequeñas que se repiten y que están enlazadas químicamente (enlaces covalentes) llamadas monómeros (Hermida, 2011) (Cornejo, 2016). Los monómeros que forman un polímero pueden ser todos iguales (homopolímeros), de dos clases (copolímeros) o una combinación de diferentes monómeros (heteropolímeros) (Meira & Gugliotta, 2019); un

ejemplo muy sencillo de homopolímero es el polietileno, cuyo monómero es el etileno (figura 2) que es un monómero que contiene dos átomos de carbono unidos por un doble enlace y dos hidrógenos unidos a cada uno de los carbonos para un total de cuatro hidrógenos.

Figura 2

Monómero de etileno

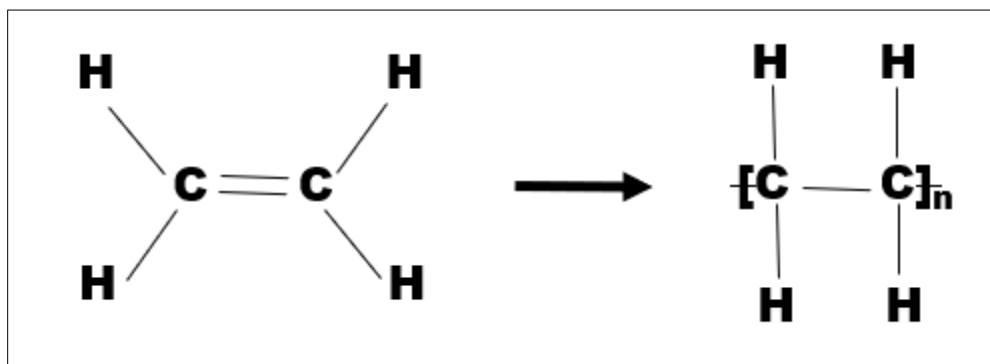


Fuente: Autor

Los polímeros se forman tras un proceso denominado *polimerización* (figura 3).

Figura 3

Polimerización del polietileno



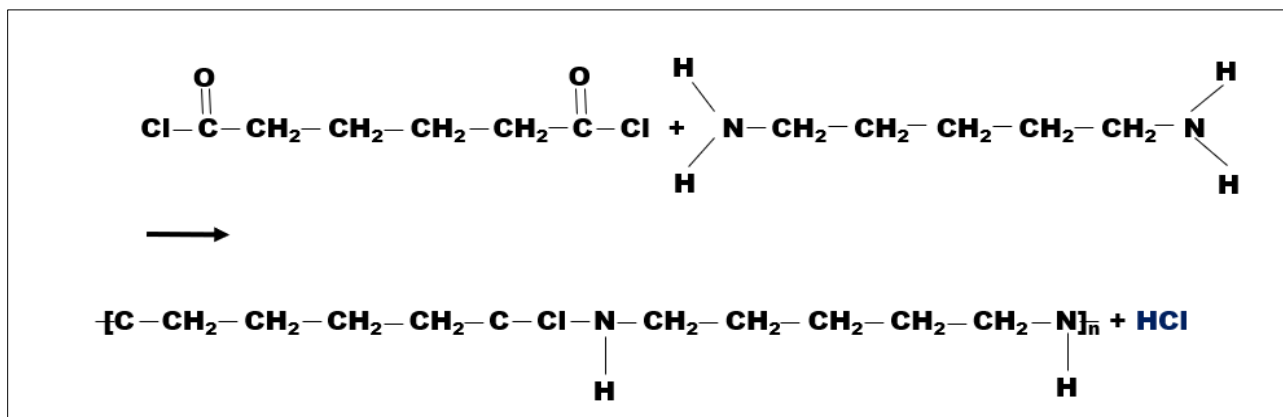
Fuente: Autor

Este tipo de polimerización se denomina polimerización por adición, en donde se rompe el enlace doble formando enlaces sencillos que se adicionan unos tras otros según la capacidad del monómero (Rico & Gomis, 2012). Existe otro tipo de polimerización como es la

polimerización por condensación, en donde el monómero pierde átomos al pasar a formar el polímero, los cuales forman subproductos. En el caso por ejemplo de la obtención de nylon (poliamida) (figura 4) que se sintetiza a partir de un diácido y una diamina, en donde se forma ácido clorhídrico debido a que la diamina pierde un hidrógeno que se une al cloro del diácido.

Figura 4

Polimerización del nylon



Fuente: Autor

Dentro de sus características más importantes se tiene que los polímeros generalmente forman sólidos amorfos y presentan durezas diferentes, algunos pueden ser muy rígidos, otros elásticos o muy resistentes a la tensión como el Nylon. La mayoría de los polímeros son termoplásticos, malos conductores térmicos y aislantes (Rico & Gomis, 2012).

En la naturaleza se encuentran muchos polímeros y de muy diferentes características, entre los polímeros naturales se encuentran: las harinas, los carbohidratos, las proteínas y las moléculas de ADN, y muchos otros, los cuales también son llamados biopolímeros, sin embargo, muchos de estos biopolímeros se obtienen de manera sintética (Rico & Gomis, 2012). Entre los polímeros sintéticos existen materiales de extenso uso industrial como el PVC, el teflón y todos

los plásticos. Los polímeros sintéticos tienen la característica de no ser biodegradables, sin embargo, algunos se pueden reciclar (Cornejo, 2016).

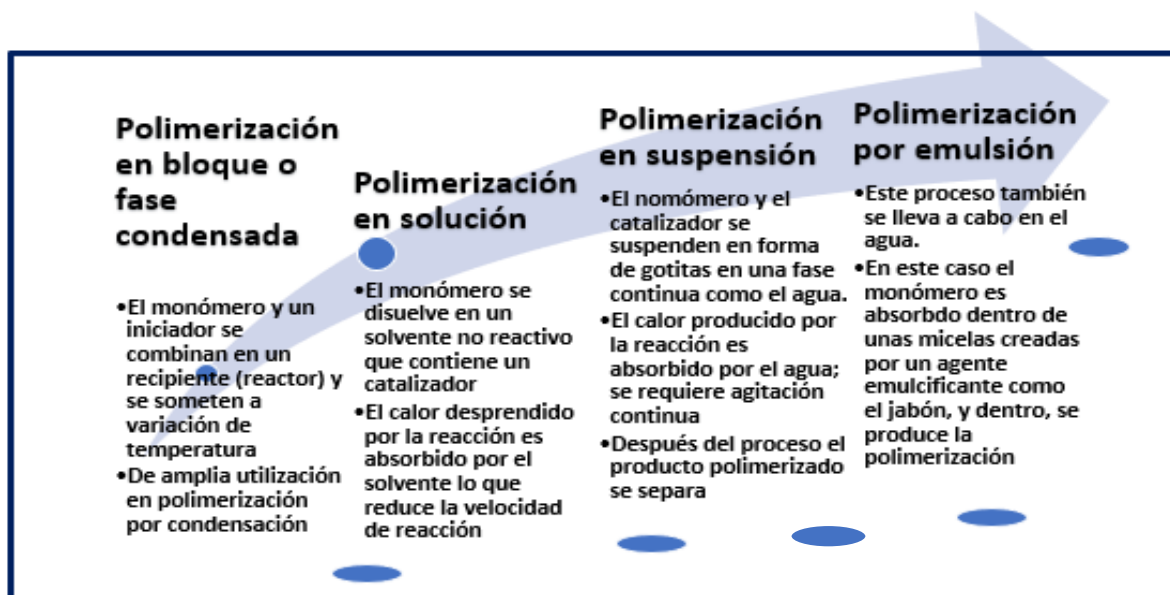
Otro tipo de polimerización es la polimerización por radicales libres, en donde la principal característica es que la polimerización comienza por una molécula llamada iniciador, la cual cuando interactúa con el monómero, se separa en radicales libres (moléculas con electrones desapareados), los que a su vez reaccionan con un monómero creando así cadenas de polímero (Gugliotta, 2013). En esta investigación se utiliza el poli(butilmetacrilato) (PBMA) cuya polimerización se realiza por radicales libres (Tsvetkov, Vitovskaya, & Lyubina, 1962). Los materiales poliméricos con base en metacrilatos se pueden modificar con agentes inorgánicos u orgánicos para modificar sus propiedades. Uno de los compuestos que recientemente se ha usado con este propósito es el Óxido Férrico (Ullah, y otros, 2021) y (Shan, Zeng, Zhao, & Zhan, 2020), el cual confiere propiedades adicionales que pueden ser útiles en los procesos de adsorción.

Métodos de Polimerización

Existen diferentes métodos para la producción de polímeros a escala industrial, en el Esquema 11 se muestran algunos de los métodos más reconocidos, entre ellos el método de polimerización en bloque o fase condensada es el que se emplea para la producción de los polímeros que se producirán en este trabajo de investigación.

Esquema 11

Métodos de polimerización.



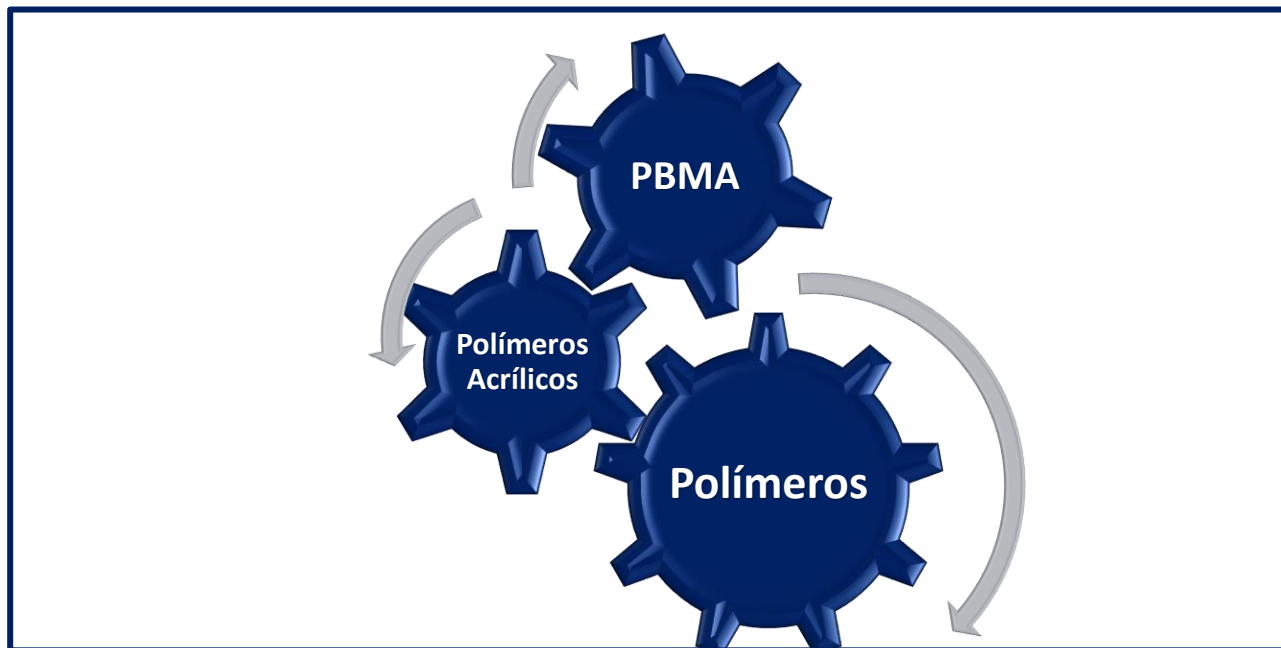
Fuente: (Hermida, 2011)

Industria Polimérica

La industria polimérica a nivel mundial ha registrado un crecimiento en tendencia global, en Colombia, la industria del plástico creció en un 22,2% en el 2021, con respecto al año anterior. En 2020, el procesamiento nacional de resinas plásticas registró una cifra de 1,33 millones en 2020. Los materiales más demandados en ese año para la fabricación de distintos productos de plástico fueron los polietilenos (39%) los polímeros de propileno (19,5%), los policloruros de vinilo (16%), las resinas de poli(etilentereftalato) PET (12,5%) y los poliestirenos (6%), y otros polímeros (8%) (La República, 2021). Sin embargo, la industria polimérica de la misma forma como ha aportado a la sociedad facilitando muchas de las actividades cotidianas y siendo soporte de muchas industrias, también ha impactado al mundo a nivel de contaminación y contribuido al cambio climático (Enlight, 2021). El esquema 12 muestra una relación del tipo de polímero que se obtendrá en esta investigación.

Esquema 12

Polímeros



Fuente: Autor

Polímeros Acrílicos

Figura 5

Acrílico (Polimetilmetacrilato)



Fuente: (Acriformas Ltda, 2020)

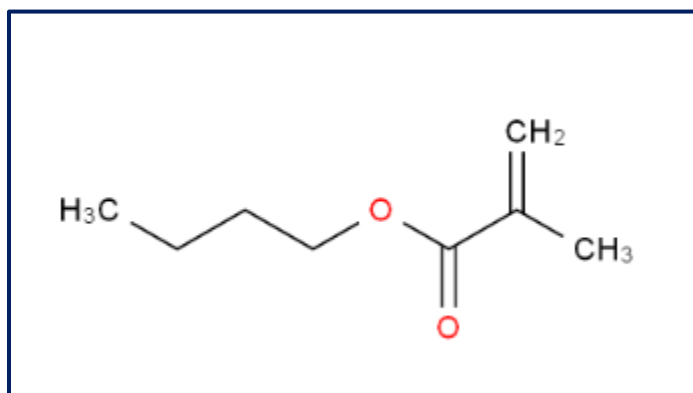
Los acrilatos y metacrilatos son materiales plásticos (figura 5) formados por la polimerización de monómeros derivados del ácido acrílico o ácido metacrílico (Campos, Rodrigues, & Salazar, 2013).

Los polímeros acrílicos se usan en muchas industrias como “aislantes eléctricos, discos compactos, pinturas, adhesivos y tintas de impresión. Se han utilizado en la fabricación de diversos dispositivos médicos, como lentes de contacto, lentes intraoculares, prótesis dentales, empastes compuestos, cemento óseo, bombas de insulina y audífonos” (Gatica, Pastor, & Silvestre, 2018). Otros polímeros acrílicos son utilizados en la producción de pañales desechables y toallas higiénicas como el poliacrilato de sodio (PANa), ya que es capaz de absorber varias veces su peso en agua (Pariguana & Ganzales, 2019). Los polímeros acrílicos son utilizados en una gran diversidad de formas, por ejemplo, el Polímero acrílico de Estireno tiene como finalidad aumentar la capacidad de soporte de los suelos en zonas que soportan climas críticos, por lo que se usa en la construcción de carreteras; hay usos en el ámbito clínico, en ortodoncia, en cosmética, siendo muy importante en este sector la producción de uñas acrílicas (Gatica, Pastor, & Silvestre, 2018)

Poli(butilmetacrilato) (PBMA)

Figura 6

Molécula del butilmetacrilato (BMA)



Fuente: (Guidechem, 2010)

El poli(butilmetacrilato) PBMA, también llamado poli (metacrilato de n-butilo), es un polímero acrílico con unas características fácilmente diferenciables con las de otros polímeros de

quizá mayor reconocimiento (Guidechem, 2010). Se produce por la polimerización de su monómero (butilmetacrilato, BMA), cuya molécula se muestra en la figura 6. Uno de los polímeros acrílicos que más se encuentra tanto en la literatura como en el ámbito comercial es el poli(metilmetacrilato) PMMA (Resinex, 2023), que es un polímero de cadena más corta (un carbono, comparado con cuatro carbonos que conforman la cadena principal del poli(butilmetacrilato, PBMA), y esto hace grandes diferencias, el hecho de que el PBMA sea de una cadena alquílica más larga le permite mayor flexibilidad debido a la disminución de la Tg (temperatura de transición vítrea) que tiene que ver con la temperatura a la que el polímero cambia de un estado rígido y quebradizo a otro blando y maleable (Rodríguez & Santana, 2015). En el caso de PMMA, que tiene una Tg de alrededor de los 100°C, lo que permite que su operabilidad esté siempre por debajo es decir en su estado vítreo, por lo que es material bastante rígido. Por el contrario, la Tg del PBMA es de 20°C. “La facilidad con que se mueven las cadenas determina por qué algunos polímeros tienen Tg altas, y otros Tg bajas. Una cadena polimérica que pueda movilizarse fácilmente, tendrá una Tg muy baja, mientras que uno que no se mueve tanto, tendrá una Tg alta”. (Rodríguez & Santana, 2015).

Información Comercial del Poli(butilmetacrilato)

Todos los productos químicos comercializados cuentan con la posibilidad de ser identificados individualmente, la siguiente tabla muestra la información comercial del poli(butilmetacrilato).

Tabla 5*Información comercial del poli(butilmetacrilato)*

Macromolécula de poli(butilmetacrilato) 9003-63-8		Otros nombres
Nombre químico	Macromolécula de poli(butilmetacrilato)	2-Propenoicacid,2-
Nombre IUPAC	butyl 2-methylprop-2-enoate	Butyl2-methyl-2-
PubChemID	7354	EINECS 202-615-1
Peso molecular	142.19600	MFCD00084402
PSA	26.30000	poly(butyl methacrylate)
LogP	2.02520	
EINECS	202-615-1; 618-468-5	
Fórmula molecular	C ₈ H ₁₄ O ₂	

Fuente: (Guidechem, 2010)

La tabla 5 muestra la información comercial del poli(butilmetacrilato)

Uso Industrial del Poli(butilmetacrilato)

El poli(butilmetacrilato) o PBMA se usa con frecuencia en recubrimientos y en materiales biomédicos como cemento óseo, en sistemas de administración de fármacos de liberación controlada”, en usos industriales o de investigación “como modificador en las mezclas de polímeros” (Yang & Hu, 2006). Combinado con octanos y nonanos se convierte en un compuesto sellador para bordes (3M Company, 2017). Se usa como resina en aplicaciones odontológicas (Yallonardo, 2005).

Procesos de Adsorción en Polímeros

La adsorción se define como un proceso que ocurre cuando un gas o líquido se acumulan en la superficie de un sólido o líquido (adsorbente), formando una película molecular o atómica (adsorbato) (Burciaga, Claudio, Cano, Martínez, & Vega, 2020), esquema 13.

Esquema 13

Adsorción



Fuente: Autor

El uso de polímeros como superficies de adsorción ha ganado gran prestigio en la actualidad entre los métodos utilizados actualmente para la remoción de metales pesados dando muy buenos resultados (Sánchez M. G., 2018). Varias propiedades de los polímeros influyen en la eficiencia de los procesos de adsorción como el peso molecular, la Temperatura de Transición Vítrea y los compuestos con los que estén modificados, al igual de si son la combinación de dos polímeros (copolímeros), el área superficial, los sitios activos y la presencia de grupos funcionales. (Xu, y otros, 2022).

De manera que, los procesos de adsorción son utilizados como alternativas para reducir el impacto de la contaminación por iones de metales pesados en los cuerpos de agua. El uso de materiales inorgánicos como óxidos férricos, de manganeso, aluminio, titanio, magnesio y cerio, proporcionan una gran área superficial y una afinidad específica para la adsorción de metales pesados de sistemas acuosos (Burciaga, Claudio, Cano, Martínez, & Vega, 2020).

Este trabajo estudia la capacidad de adsorción de iones dicromato por parte del polímero poli(butilmetacrilato) modificado con óxido férrico (PBMA + Fe_2O_3).

Óxido Férrico

Figura 7

Apariencia del óxido férrico

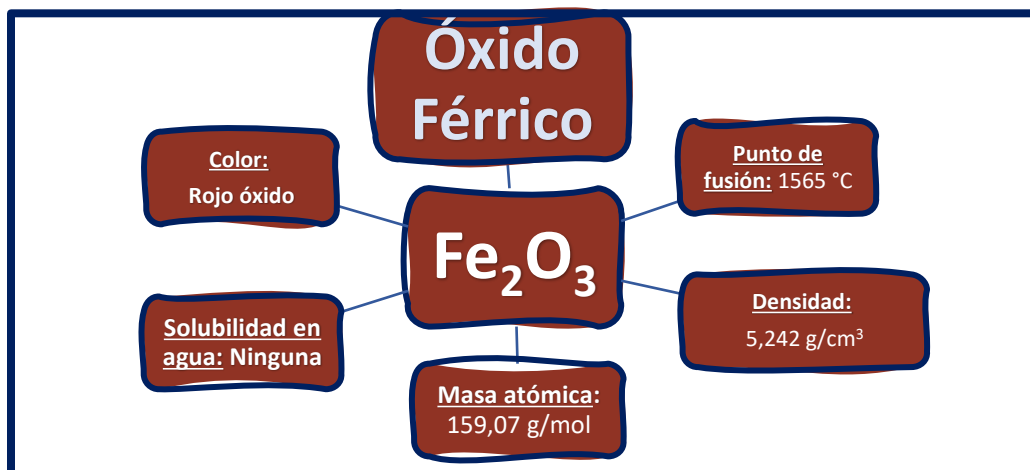


Fuente: (Amazon, 2023)

Su apariencia es de un polvo rojizo (figura 7). Su fórmula química es Fe_2O_3 . Es utilizado como pigmento de alta densidad para pinturas, en la fabricación de cementos, morteros y vidrio, así como en la fabricación de esmaltes y cerámicas. También es usado para la fabricación de electrodos de soldadura o en electrónica (Amazon, 2023). El esquema 14 muestra algunas propiedades físicas del óxido férrico.

Esquema 14

Óxido férrico: Características físicas



Fuente: Autor

El óxido de hierro ha sido estudiado con mucho interés en los últimos años especialmente la síntesis de nanopartículas magnéticas (NPMs) por sus muchas aplicaciones industriales incluidos los medios de almacenamiento magnético, biosensores, dispositivos de resonancia magnética y aplicaciones medioambientales para tratamiento de aguas (Escobaro, Pizzioa, & Romanelli, 2018), estos autores centran su investigación en propiedades magnéticas, estructura, síntesis y aplicación como catalizadores de las nanopartículas magnéticas de óxidos de hierro.

Buenas Prácticas de Laboratorio

BPL, es un sistema de control de calidad que se aplica a los procesos internos que se deben llevar en un laboratorio. “Son un conjunto de procedimientos operacionales, reglas y prácticas promulgadas por organismos como la Organization for Economic Cooperation and Development (OCDE) o la Food and Drug Administration (FDA) que son de obligatorio uso y que buscan la calidad de las mediciones que se toman (Eroinnova, 2022). Mucho de este enfoque viene determinado por la norma ISO 17025. Este sistema se encarga de planificar, hacer, verificar y evaluar los procesos organizativos tendientes a garantizar la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos. Dentro de los asuntos que son contemplados en las BPL están el cumplimiento de normas y conductas básicas que mayoritariamente tienen un carácter preventivo para evitar procedimientos riesgosos y accidentes que pueden afectar la vida o las instalaciones y equipos que existen en un laboratorio, por lo tanto, se debe ser riguroso en el cumplimiento de las normas establecidas.

Las medidas principales que deben tenerse en cuenta son:

- Verificar el estado de las instalaciones y los equipos e informar cualquier economía

- Usar elementos de protección personal adecuados, específicos y en buen estado (Fotografía 1).
- Cuando se termine la práctica se debe apagar los equipos y disponer el aseo de los implementos usados, no dejar estopas o pedazos de tela impregnados con sustancias inflamables.
- Conocer y portar la ficha técnica de los reactivos que se van a usar
- Conocer la ubicación y vigilar la caducidad de los extintores.
- Conocer las vías de evacuación y salidas de emergencia
- No consumir alimentos dentro de los laboratorios ya que se puede generar algún tipo de contaminación cruzada
- Ser estrictos con las mediciones de reactivos y productos para tener un control de los experimentos
- Documentar todo lo que se hace en la práctica de laboratorio en un cuaderno o agenda destinada para ese fin con fecha de registro.

La figura 8 muestra un póster que cuelga de las paredes de los laboratorios donde se pueden encontrar algunas de estas instrucciones.

Figura 8

Póster BPL - UNAL



Póster Buenas Prácticas de Laboratorio

Fotografía 1

Elementos de protección personal (EPP) en el laboratorio



La fotografía muestra la protección contra los gases tóxicos de las sustancias utilizadas

Equipos Utilizados, Técnicas Utilizadas y Metodología

Equipos Utilizados

Para el desarrollo de este trabajo se emplearon diferentes equipos, los cuales proporcionan las mediciones y/o características requeridas en las técnicas utilizadas.

Tamiz Molecular

Para la reducción de partícula de los polímeros sintetizados se empleó un tamiz analítico de 0.8" x alto 2" ASTM E11 con una abertura de $106\mu\text{m}$, malla 140 Mesh de la casa Endecotts.

Punto de Fusión

Los puntos de fusión de los polímeros obtenidos fueron tomados en un fusiómetro Electrothermal 9100 SMP11 con una velocidad de calentamiento de 1 a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por min de la casa Stuart-Equipment y se reportan sin corregir.

Fotografía 2

Fusiómetro Electrothermal 9100 SMP11



Cabina Extractora

Para el manejo de vapores se utilizaron cabinas extractoras, cuya función es capturar y extraer las emisiones generadas por sustancias químicas peligrosas.

Fotografía 3

Manipulación correcta de vapores



En la fotografía 3, se observa la manipulación cuidadosa del polímero dentro de la cabina de extracción para evitar los vapores

Fotografía 4

Cabina de extracción de gases



En la fotografía 4 se observa la cabina dispuesta para su uso.

Balanza Analítica

Para pesar los compuestos se utilizó una balanza analítica, marca Sartorius con precisión de 3 decimales.

Fotografía 5

Balanza analítica, marca Sartorius



Plancha de Agitación Magnética Multicanal

La plancha de agitación marca - MS-H340-S4 Agitador magnético con calentamiento de 4 puestos DLAB utilizada para hacer interactuar el polímero con y sin óxido férrico con el analito en todos los casos, es decir PBMA con $K_2Cr_2O_7$ y PMBA + Fe_2O_3 con $K_2Cr_2O_7$.

Fotografía 6

La plancha de agitación magnética marca - MS-H340-S4



En esta fotografía se observan cuatro beakers que contienen diversas condiciones y están siendo sometidos a agitación por dos horas.

Centrífuga

Para la extracción del polímero se utilizó una centrifugadora

Fotografía 7

Centrifugadora



La fotografía 7 registra la centrifugadora, con capacidad para cuatro tubos de ensayo

Fotografía 8*Recopilación de muestra del polímero*

La fotografía 8 muestra el llenado de uno de los tubos de ensayo con el polímero recién retirado del sistema de agitación

Fotografía 9*Polímero decantado*

En la fotografía 9 se muestra un tubo de ensayo después de la centrifugación, ahí se ve muy bien el polímero en el fondo, sigue retirar el etanol que se ve en la parte superior para obtener el polímero

Agitador de Laboratorio Vórtex

El contenido de los tubos de ensayo (el polímero) se homogenizó por esta técnica, utilizando un vórtex Phoenix RS-VA 10, que tiene una velocidad de rotación entre 0 - 2500 rpm.

Fotografía 10

Vórtex



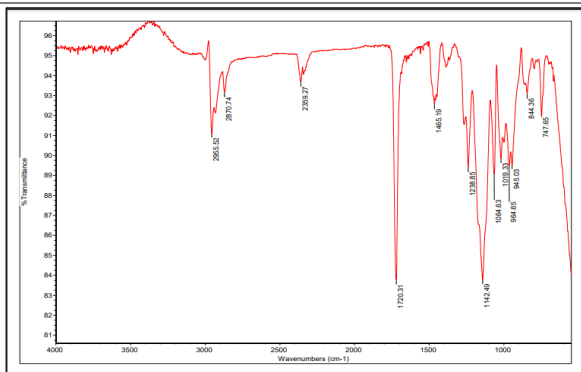
En la fotografía 10 se observa un tubo de ensayo que está sostenido a presión en el vórtex con el fin de homogenizar el contenido

Infrarrojo IR-ATR

Los espectros IR fueron tomados en un espectrómetro ThermoFisher Scientific iD1 Nicolet iS5 IR con accesorio ATR de seleniuro de zinc (ZnSe) y dado en cm^{-1} (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA). La técnica del IR-ATR (Infrarrojo - Attenuated Total Reflection) permite reconocer los grupos funcionales de un compuesto. La siguiente imagen (fotografía 11) muestra el espectrómetro de la referencia, al igual que una de sus lecturas o espectros.

Fotografía 11

Infrarrojo IR-ATR, unido al computador y cómo es un espectro que registra



Un espectrómetro debe estar conectado o en línea con un computador que almacena sus productos o espectros

Espectrofotómetro UV-Visible

Los espectros de UV-Vis se obtuvieron en un espectrofotómetro EMC-11-UV en un rango de 200-800 nm, se utilizaron para estas determinaciones celdas de cuarzo.

Fotografía 12

Espectrofotómetro EMC-11-UV



En la fotografía 12 el espectrofotómetro UV-VIS

Fotografía 13

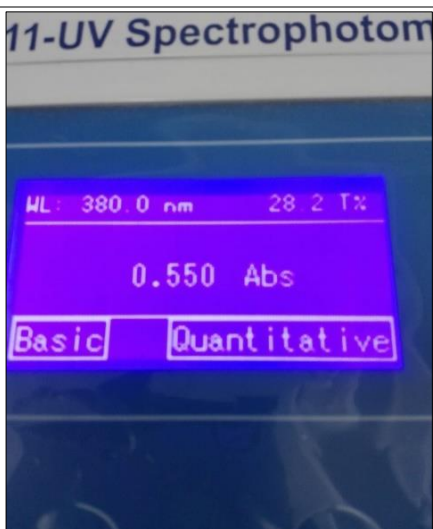
Juego de celdas de cuarzo y dicromato de potasio



En la fotografía 13 el juego de celdas y la solución de dicromato de potasio.

Fotografía 14

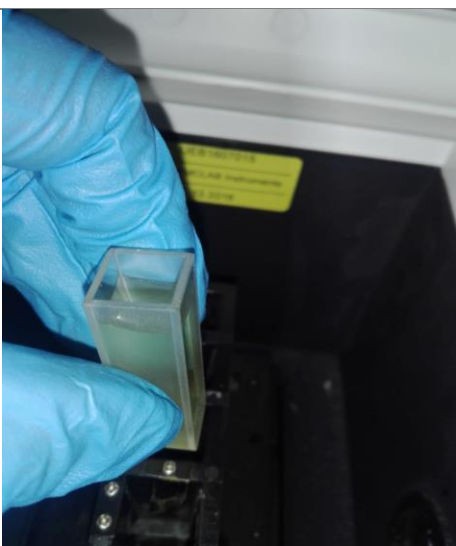
Lectura de la absorbancia



En la fotografía 14 se muestra la lectura de la absorbancia de una muestra en el espectrofotómetro UV-Vis: en este caso, se mide a una λ de 380nm, su absorbancia es de 0,550

Fotografía 15

Celda lista para la lectura de la absorbancia



En la fotografía 15 se muestra una celda con dicromato de potasio al interior del espectrofotómetro a punto de ser ubicada para lectura

Técnicas Utilizadas

De acuerdo con los objetivos planteados se propone la siguiente Matriz de Alternativas, con el fin de seleccionar las técnicas más efectivas para el desarrollo del proyecto:

Tabla 6

Matriz de evaluación de alternativas

Matriz de Evaluación de Alternativas																
Técnicas a utilizar para evaluar la eficiencia del PBMA + Fe ₂ O ₃ [Ponderación 1 ≤ X ≤ 10]	Ponderación 1 ≤ X ≤ 10	Espectroscopía de absorción atómica	Fluorescencia de rayos x	Potenciometría	Espectrofotometría UV-VIS	IR-ATR (Infrarrojo - Attenuated Total	Espectrofotometría RAMAN	Espectrometría de masas								
Criterios de Selección	Determinación de la eficiencia del proceso de adsorción de la especie de cromo hexavalente.	10	9	90	6	60	7	70	9	90	10	100	10	100	10	100
	Precisión de los resultados	8	9	72	10	80	8	64	9	72	10	80	10	80	10	80
	Accesibilidad a los equipos	9	3	27	4	36	10	90	10	90	8	72	5	45	3	27
	Costos del uso de la técnica	7	2	14	5	35	10	70	10	70	10	70	10	70	2	14
	Facilidad para el uso	6	3	18	5	30	10	60	10	60	10	60	3	18	3	18
	Pertinencia de la técnica	4	3	12	2	8	6	24	10	40	10	40	10	40	3	12
	Tiempo de obtención de los resultados	5	10	50	8	40	3	15	8	40	10	50	10	50	10	50
Total			283		289		393		462		472		403		301	

La matriz de alternativas sugiere el uso de las técnicas Espectrofotometría UV-Vis y IR-ATR.

Metodología

En su aspecto metodológico, el trabajo se desarrolló en cuatro etapas que se describen a continuación:

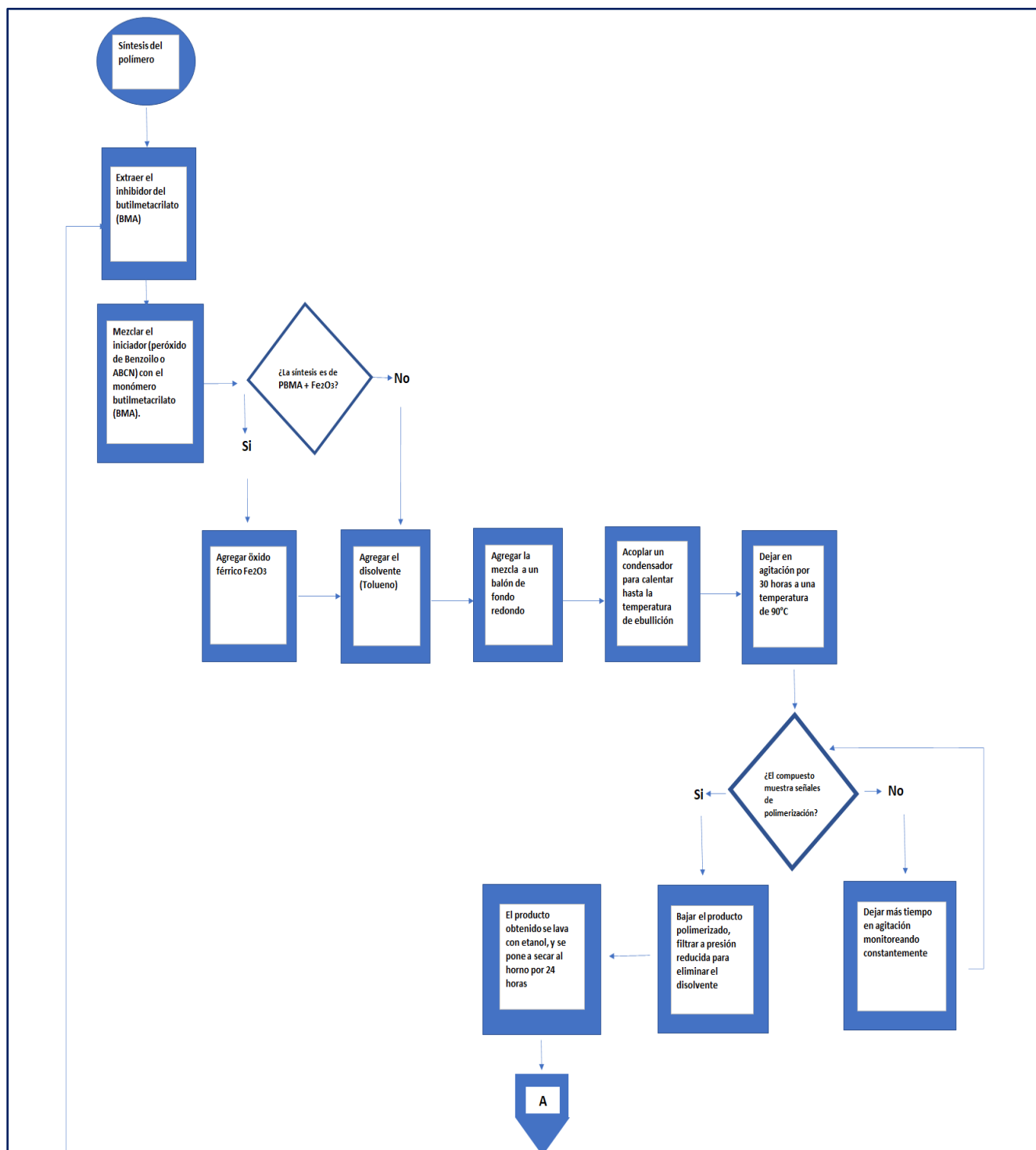
- **Etapa 1.** Revisión bibliográfica y estado del arte de los altos índices de contaminación de los cuerpos de agua que se generan a raíz de la producción de industrias que utilicen como materia prima para su producción sales de cromo, además, de las técnicas actuales enfocadas en la descontaminación del agua por metales pesados. En esta etapa se determinan como objeto de estudio el cromo y las especies de cromo hexavalente Cr^{6+} . Revisión bibliográfica del tema Polímeros, específicamente poli(butilmetacrilato) (PBMA). Revisión bibliográfica del proceso de adsorción, aquí se estudian las aplicaciones del óxido férrico de acuerdo con investigaciones recientes.
- **Etapa 2.** Síntesis del material polimérico (PBMA) y síntesis del polímero modificado (PBMA + Fe_2O_3).
- **Etapa 3.** Condiciones para la extracción: Ensayos de extracción de cromo hexavalente con el material polimérico usando varias condiciones de trabajo distintas como tiempo de extracción, volumen de carga y pH de solución.
- **Etapa 4.** Ensayos del proceso de la adsorción de los polímeros tanto modificado como sin modificar, la cuantificación se realiza por medio de Espectrofotometría UV-Vis.

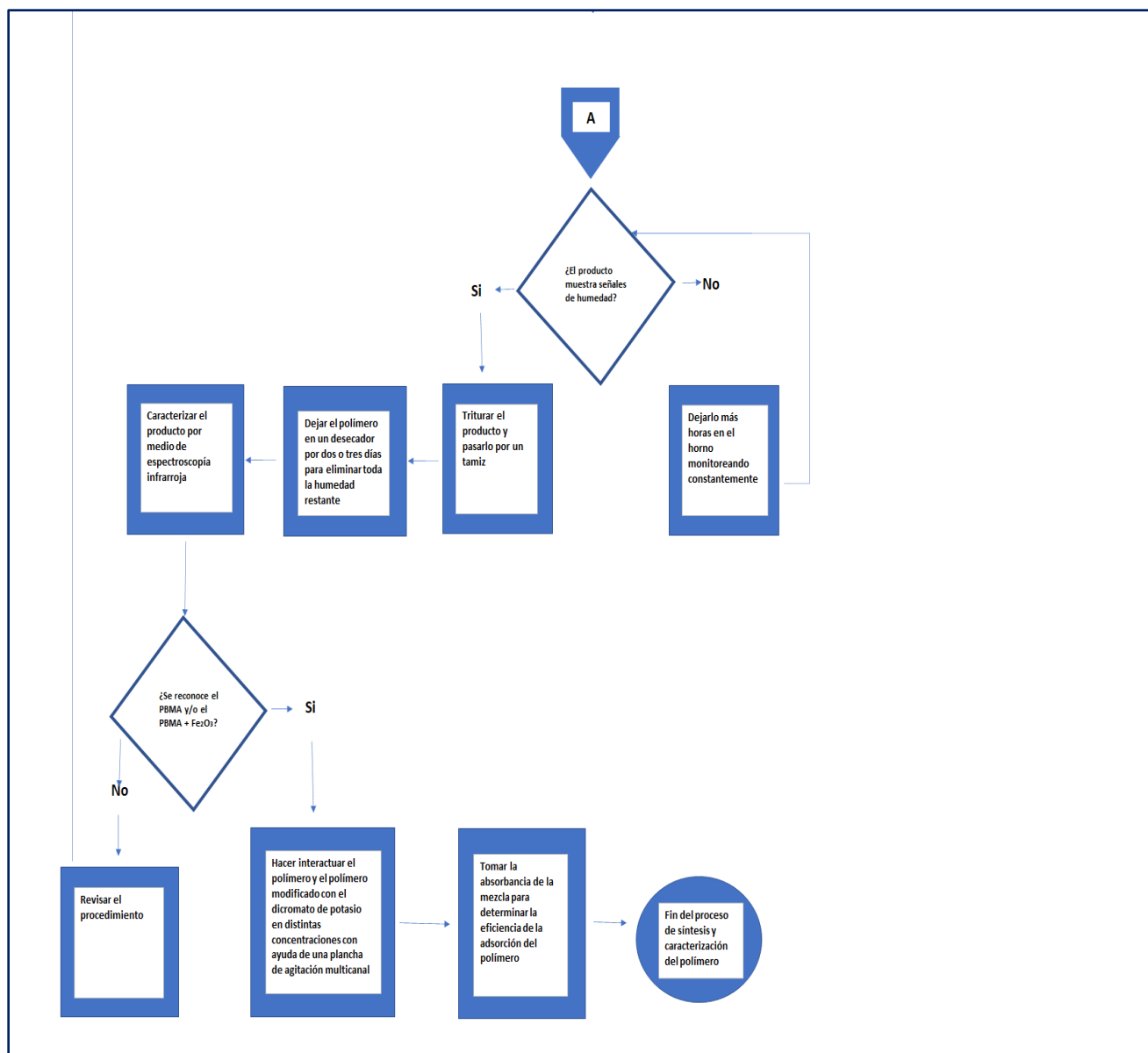
Todos los reactivos químicos fueron adquiridos comercialmente y usados sin purificación previa.

Diagrama de Flujo del Proceso de Síntesis y Caracterización del Polímero

Esquema 15

Diagrama de flujo de síntesis y caracterización de los polímeros





Fuente: Autor

Obtención del Polímero sin Modificar (PBMA)

1 paso: Extraer el inhibidor del butilmetacrilato (BMA). El monómero se encuentra y se puede adquirir comercialmente (Fotografía 16), la dificultad radica en que para que no se produzca la polimerización espontánea debe conservarse en un recipiente oscuro y a temperaturas bajas (en una nevera común), y no sólo eso, sino que contiene una sustancia

integrada en el compuesto que se denomina inhibidor y que como su palabra puede indicar inhibe, limita o no permite la polimerización espontánea y fuera de control.

Fotografía 16

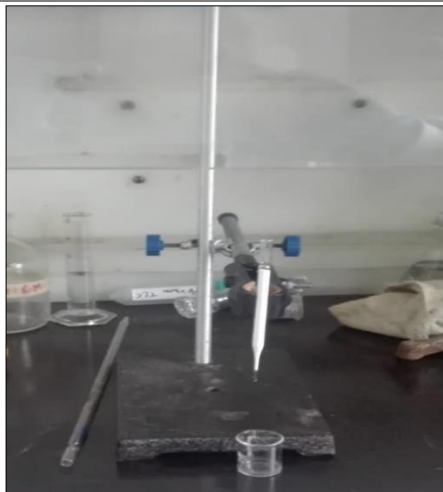
Butilmetacrilato (BMA)



En este sentido, es necesario extraer el inhibidor para dar paso a la polimerización, para esto se utiliza una Pipeta Pasteur y se miden 5 mL de butilmetacrilato (BMA), el cual se hace pasar por un cartucho, lo que permite descender por gravedad al recipiente de reacción (también puede ayudarse con una bomba de aire como en este caso).

Fotografía 17

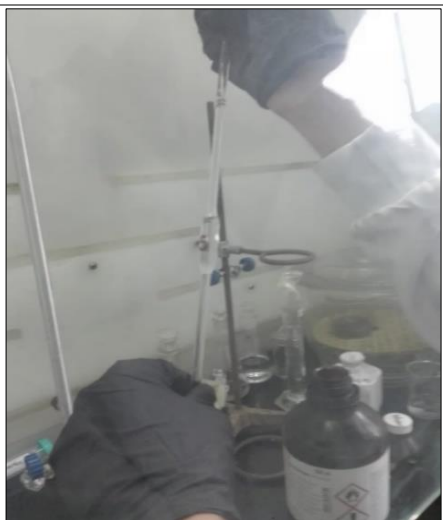
BMA, Montaje listo para agregar el BMA



En la fotografía 17 se observa el montaje listo con una pipeta pasteur y el beaker en donde quedará el BMA, ya sin el inhibidor

Fotografía 18

Se agrega el BMA



En la fotografía 18 se muestra la adición del BMA para iniciar el retiro del inhibidor

Fotografía 19

BMA, siendo depositado sin el inhibidor



En la fotografía 19 se observa caer el butilmetacrilato

Fotografía 20

Bomba de aire

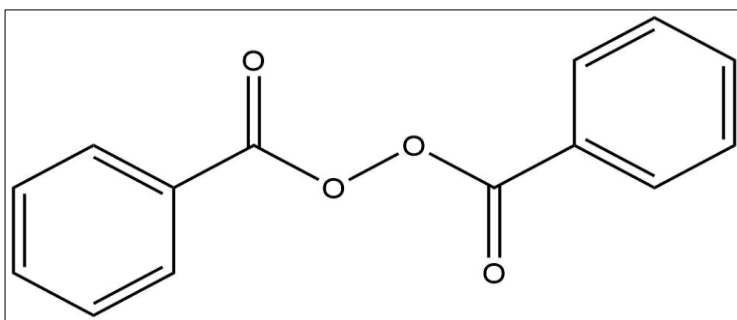


En la fotografía 20 se le está ayudando con una bomba de aire al monómero para descender más rápido. En este proceso se obtuvieron 4,47g de BMA

2 paso: Mezclar el iniciador (Peróxido de Benzoilo o ABCN) (Yang & Hu, 2006), con el monómero butilmetacrilato (BMA). Para que se produzca la polimerización es necesario adicionar al BMA un iniciador, en este caso se usa peróxido de benzoilo ($C_{14}H_{10}O_4$) (figura 9).

Figura 9

Molécula del peróxido de benzoilo



Fotografía 21

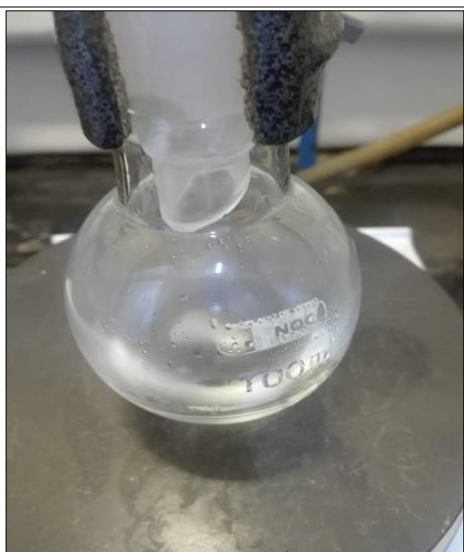
Presentación comercial del peróxido de benzoilo



3 paso: Agregar el disolvente (10mL de tolueno) con la ayuda de una pipeta graduada. En este paso se agrega gota a gota el tolueno. Todos los reactivos antes mencionados se agregan en un balón de fondo redondo al cual se le acopla un condensador para calentar hasta la temperatura de ebullición.

Fotografía 22

BMA con dispuestos para iniciar la polimerización



En la fotografía 22 se observa la solución compuesta por el butilmetacrilato y el tolueno, instalados en un sistema plancha de agitación – condensador, a esta mezcla se le coloca un agitador magnético, el cual interactúa con la plancha para producir y mantener la agitación.

Fotografía 23

Sistema conformado por: plancha de agitación, condensador, inicio de polimerización



En la fotografía 23 se observa el sistema que se requiere para producir la polimerización

4 paso: Encender la plancha de agitación magnética y llevarla a una temperatura de 90°C. Se inicia la polimerización por radicales libres. Para proteger la solución de la luz se cubre con papel aluminio. Se deja en agitación por 30 horas. Para lograr este proceso se debe tener un sistema que incluye una plancha de agitación magnética, un agitador magnético para que inicie y se mantenga la agitación y un condensador. Este sistema incluye un proceso de refrigeración continua que debe ser monitoreado constantemente.

Fotografía 24

Sistema de agitación que incluye la refrigeración del mismo



En la fotografía 24 se puede observar el sistema em agitación

Fotografía 25

El compuesto cubierto con papel aluminio

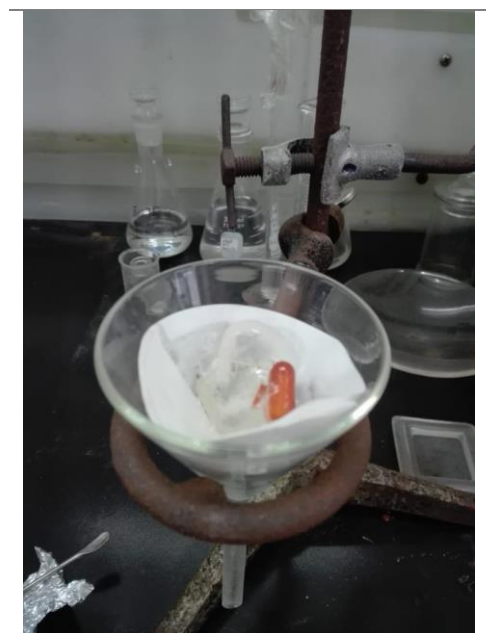


En la fotografía 25 se observa la manera en la que se protege de la luz, el polímero que se está formando, con papel aluminio

5 paso: Transcurridas las 30 horas, se procede a retirar la mezcla del sistema de polimerización y a enfriarla. Se elimina el disolvente por filtración. En la fotografía 26 se puede observar el proceso de filtrado.

Fotografía 26

Proceso de filtrado



El polímero una vez se baja de la plancha de agitación se pasa por un proceso de filtrado con la ayuda de un montaje que consta de un soporte metálico para embudo, un embudo, papel de filtro y por supuesto un beaker en donde se recogerá el PBMA

6 paso: El producto obtenido se lavó con etanol, se secó en horno, se trituro y finalmente se pasó por un tamiz molecular.

Fotografía 27

Polímero formado (PBMA)



La fotografía 27 muestra el polímero formado (aspecto de polvo blanco grueso)

Fotografía 28

Proceso de trituración



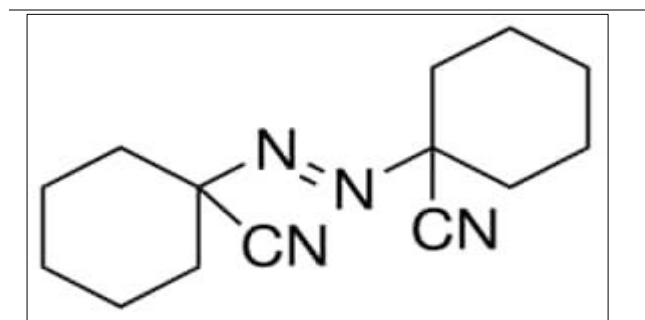
La fotografía 28 muestra el proceso de trituración del PBMA

Obtención del Polímero con ABCN

Se llevan a cabo dos reacciones de polimerización simultánea con el fin de analizar los cambios que se producen buscando la optimización del proceso. En esta ocasión se cambia el iniciador, esta vez se usará 1,1' Azobis (ciclohexanocarbonitrilo) (ABCN), Todos los compuestos se han aumentado en cantidad con el fin de lograr mayor cantidad del polímero. La figura 10 muestra la molécula del ABCN y una fotografía (fotografía 29) de su presentación comercial.

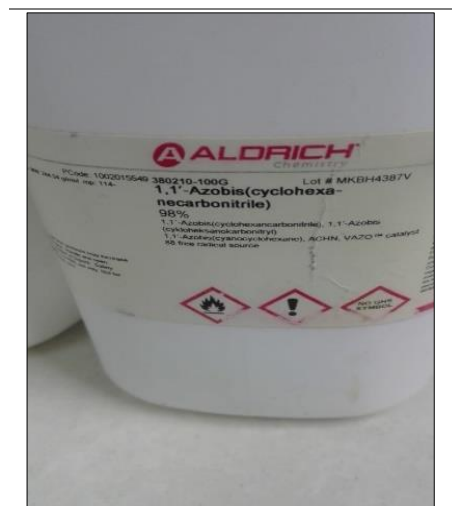
Figura 10

1,1' Azobis (ciclohexanocarbonitrilo) (ABCN)



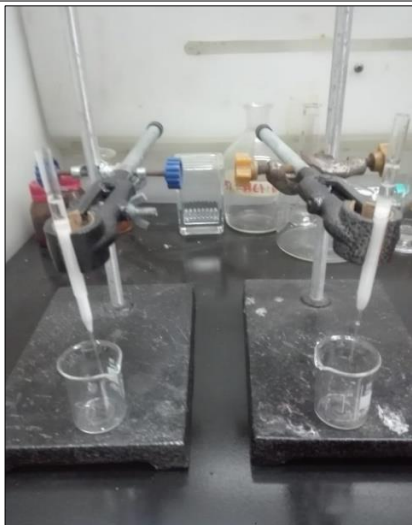
Fotografía 29

Presentación comercial del ABCN



Fotografía 30

Retiro del inhibidor en simultáneo



En la fotografía 30 se ve el proceso de separación del inhibidor en dos experimentos simultáneos.

Fotografía 31

Proceso de polimerización del PBMA en simultáneo



En la fotografía 31 se muestra el proceso de polimerización del PBMA, también en simultáneo

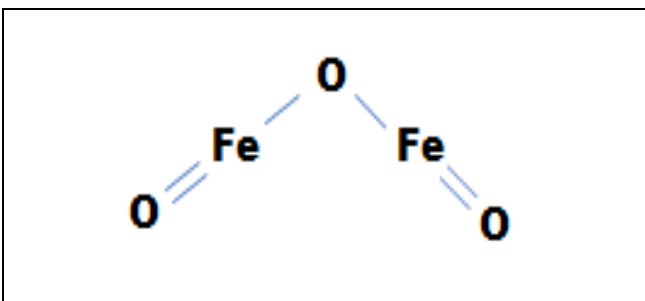
Síntesis del Polí(butilmetacrilato) Modificado con Óxido Férrico (PBMA + Fe₂O₃)

Procedimiento 1: El primer procedimiento para la obtención del polímero modificado consistió en efectuar la reacción de polimerización descrita en el ítem (Obtención del Polímero sin Modificar (PBMA)), es decir, los mismos pasos descritos, pero con la diferencia de que se agrega en el proceso óxido férrico, cuya molécula se muestra en la figura 11. La fotografía 32 muestra un recipiente que contiene esta sustancia.

Procedimiento 2: Este procedimiento, consistió en hacer una trituration al polímero obtenido con óxido férrico, en un mortero con mazo, el producto se trató de dejar lo más uniforme posible para su caracterización por infrarrojo.

Figura 11

Molécula de óxido férrico



Fotografía 32

Óxido férrico (Fe_2O_3)



La fotografía 32 muestra una presentación comercial de óxido férrico

Fotografía 33

Inicio del proceso de polimerización en simultáneo de PBMA + Fe_2O_3



En la fotografía 33 se observa el proceso de polimerización del PBMA + Fe_2O_3 en reacciones simultáneas

Fotografía 34

PBMA + Fe₂O₃, ya casi formado



En la fotografía 34 se observa el proceso de polimerización del PBMA + Fe₂O₃ donde se muestra el polímero ya casi formado.

Una vez se acabe el proceso de polimerización se procede a la filtración del polímero que contiene el óxido férrico. Esta filtración se realiza a presión reducida, para esto se utiliza etanol como solvente para filtrar el polímero. El producto obtenido se lava en etanol.

Fotografía 35

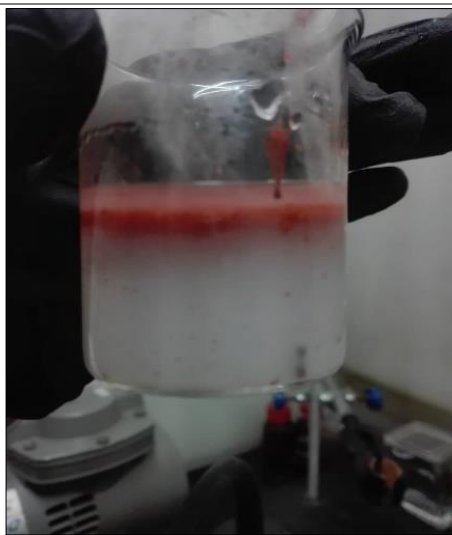
Inicio de filtrado de PBMA + Fe₂O₃



En la fotografía 35 se observa el momento en el que se está vaciando el contenido del balón de fondo redondo con el polímero formado (PBMA + Fe₂O₃), para dar inicio al proceso de filtrado.

Fotografía 36

PBMA + Fe₂O₃ en etanol

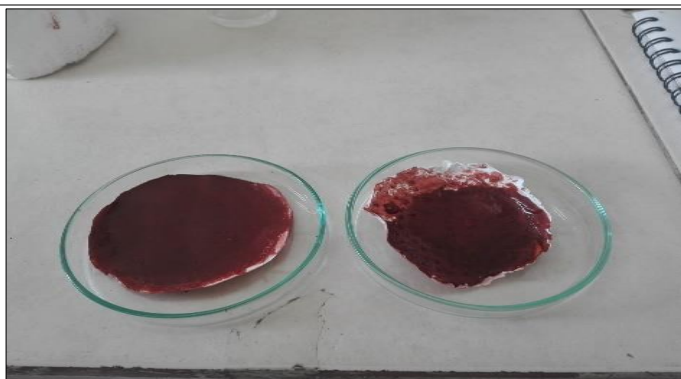


La fotografía 36 muestra el compuesto en un lavado con etanol

Como producto de este proceso se obtiene un total de 11,2g de PBMA + Fe₂O₃. Se lleva el polímero obtenido al horno a 60°C por 15 horas para secarlo, una vez transcurrido este tiempo se saca del horno se hace un raspado para obtener el polímero.

Fotografía 37

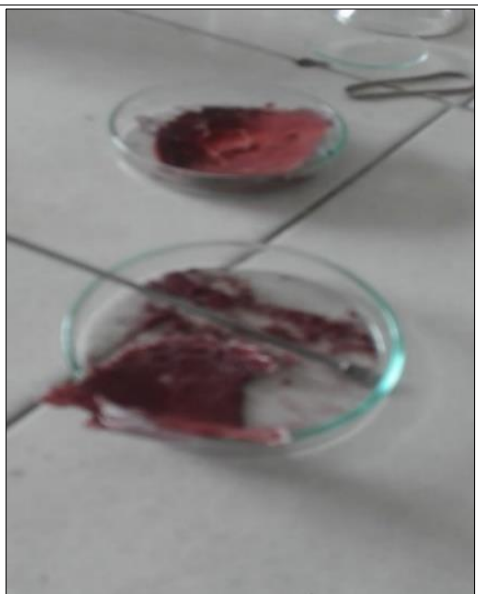
PBMA + Fe₂O₃ después del filtrado



En esta imagen se muestra el polímero después de filtrado y aun en el papel de filtro

Fotografía 38

Raspado



El polímero se extrae del papel de filtro por raspado

Fotografía 39

Horno de secado



El polímero se introduce en el horno de secado por cinco horas

Fotografía 40

Proceso de trituración del PBMA + Fe₂O₃



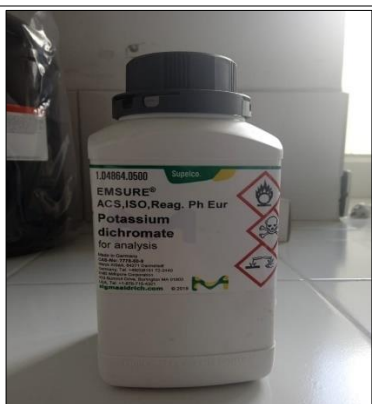
El polímero modificado en proceso de trituración

Técnica de Análisis del Ion Dicromato

Como problema de esta investigación, de acuerdo con el (Árbol de Problemas) es la “Contaminación de las fuentes de agua por efluentes industriales con cromo hexavalente producto de los procesos productivos de las industrias que utilizan estas especies de cromo como materia prima”, por lo que se hará especialmente importante la determinación de la eficiencia del proceso de adsorción de la especie de cromo hexavalente.

Fotografía 41

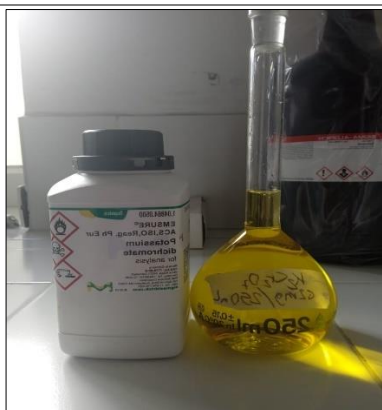
Presentación comercial del $K_2Cr_2O_7$



Dicromato de potasio

Fotografía 42

$K_2Cr_2O_7$ en solución

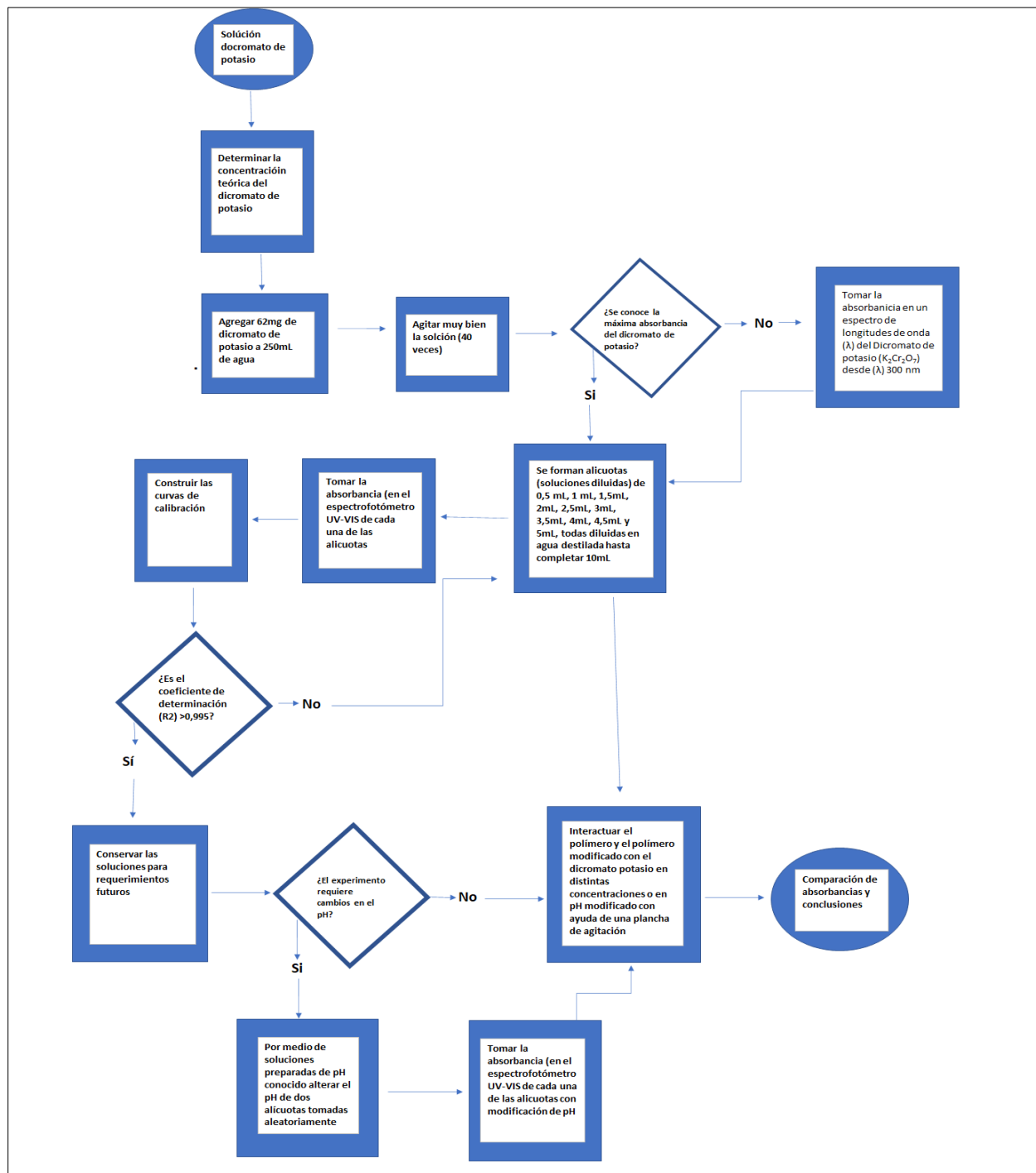


Dicromato de potasio y solución stock o madre

Diagrama de flujo del Proceso de Uso del Dicromato de Potasio

Esquema 16

Diagrama de flujo uso $K_2Cr_2O_7$



Fuente: Autor

Espectro UV – VIS del K₂Cr₂O₇

La tabla siguiente muestra un espectro de longitudes de onda (λ) del Dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) desde (λ) 300 nm hasta (λ) 700 nm con el fin de determinar la longitud de onda donde está la mayor absorbancia.

Tabla 7***Espectro UV-VIS del K₂Cr₂O₇***

λ (nm)	Absorbancia	λ (nm)	Absorbancia	λ (nm)	Absorbancia
300	2,711	430	0,474	530	0,056
310	1,830	435	0,471	535	0,051
320	1,710	440	0,463	540	0,048
325	1,922	445	0,451	545	0,045
330	2,191	450	0,431	550	0,044
340	2,769	455	0,408	555	0,044
350	3,000	460	0,378	560	0,043
360	2,890	465	0,346	565	0,043
365	2,654	470	0,313	570	0,043
370	2,331	475	0,280	575	0,043
380	1,849	480	0,248	580	0,043
385	1,606	485	0,215	590	0,043
390	1,300	490	0,186	600	0,042
395	1,065	495	0,159	610	0,043
400	0,843	500	0,134	620	0,043
405	0,689	505	0,113	630	0,043
410	0,573	510	0,097	640	0,043
415	0,518	515	0,083	650	0,043
420	0,487	520	0,070	680	0,043
425	0,477	525	0,061	700	0,043

Espectro de longitudes de onda (λ) del K₂Cr₂O₇ desde (λ) 300 nm hasta (λ) 700 nm

Curvas de Calibración del dicromato de potasio

Fotografía 43

K₂Cr₂O₇ para preparar la solución madre



Muestra de dicromato de potasio, 62mg

Fotografía 44

Alícuotas de K₂Cr₂O₇



Alícuotas (disoluciones de distintas concentraciones) de dicromato de potasio y solución stock o madre

Para obtener los datos que se requieren para hacer la curva de calibración se necesita formar alícuotas provenientes de la solución madre (62,5mg de $K_2Cr_2O_7$ en 250 mL de agua destilada). Por lo tanto, se obtienen las soluciones diluidas de 0,5 mL, 1 mL, 1,5mL, 2mL, 2,5mL, 3mL, 3,5mL, 4mL, 4,5mL y 5mL, todas diluidas en agua destilada hasta completar 10mL. Estas soluciones preparadas se muestran en la fotografía 44.

Para esto se utiliza una bureta de precisión, un beaker y 10 matraces aforados de 10mL. Una vez se tengan las alícuotas preparadas se procede a tomar muestras de cada uno de los matraces, llevarlos a una celda de lectura para medir la absorbancia utilizando el Espectrofotómetro UV - Vis.

Fotografía 45

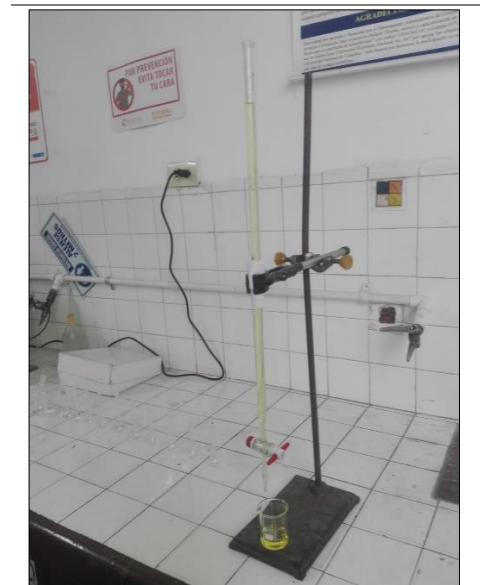
Preparación de alícuotas de $K_2Cr_2O_7$



Se usa una bureta para medir con exactitud las cantidades de dicromato de potasio en solución

Fotografía 46

Alistamiento de muestra para toma de absorbancia

**Fotografía 47**

Degradé de las alícuotas $K_2Cr_2O_7$



Muestra del degradé de las alícuotas $K_2Cr_2O_7$ con las que se construirá la curva de calibración

A estas alícuotas o soluciones diluidas se les debe determinar teóricamente la concentración molar, dato que se requiere para construir la curva de calibración. Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Siendo

$C_1 =$ Concentración stock o madre [$3,4 * 10^{-3} M$]

$V_1 =$ Volumen que se extrae de la solución madre

$C_2 =$ Concentración molar de cada solución diluída

$V_2 =$ Volumen al que se lleva la solución diluída

Tabla 8

Curva de calibración $\lambda = 350 \text{ nm}$

Solución	Volumen (mL)	Concentración (M)	Absorbancia $\lambda = 350 \text{ nm}$
1	0,5	0,00017	0,247
2	1,0	0,00034	0,389
3	1,5	0,00051	0,549
4	2,0	0,00068	0,666
5	3,0	0,00102	0,980

La tabla 8 muestra la absorbancia vs. concentración para una longitud de onda de $\lambda = 350 \text{ nm}$

De la misma manera se realizó la curva de calibración para las mismas alícuotas, pero con una longitud de onda - $\lambda = 380 \text{ nm}$

Tabla 9

Curva de calibración $\lambda = 380 \text{ nm}$

Solución	Volumen (mL)	Concentración (M)	Absorbancia $\lambda = 380 \text{ nm}$
1	0,5	0,00017	0,193
2	1,0	0,00034	0,306
3	1,5	0,00051	0,360
4	2,0	0,00068	0,450
5	2,5	0,00085	0,494
6	3,0	0,00102	0,621
7	3,5	0,00119	0,715
8	4,0	0,00136	0,784
9	4,5	0,00153	0,875
10	5,0	0,0017	0,959

La tabla 9 muestra la absorbancia vs. concentración para una longitud de onda de $\lambda = 380 \text{ nm}$

Condiciones de Extracción

Todas las soluciones que se utilizaron fueron tomadas de una solución madre o stock de $K_2Cr_2O_7$. La que fue preparada pesando 62,5 mg de $K_2Cr_2O_7$ y llevándola a un volumen de 250 mL. La concentración de la solución madre se determinó teóricamente en $[3,4 \cdot 10^{-3} \text{ M}]$

Comportamiento del Composito en Alícuotas 5,0 mL y 12,5 mL Llevados a 50mL

Tabla 10

Comportamiento del composito en alícuotas 5,0 mL y 12,5 mL llevados a 50mL

Concentración	Absorbancia de alícuotas		Absorbancia de $K_2Cr_2O_7$ en los polímeros			
	$K_2Cr_2O_7$		PBMA		PBMA + Fe_2O_3	
	Absorbancia a $\lambda = 380 \text{ nm}$	Absorbancia a $\lambda = 350 \text{ nm}$	Absorbancia a $\lambda = 380 \text{ nm}$		Absorbancia a $\lambda = 350 \text{ nm}$	
0,00034 M (5 mL)	0,247	0,360	0,187	0,187	0,204	0,201
0,00085 M (12,5 mL)	0,494	0,829	0,490	0,489	0,619	0,612

La tabla 10 muestra el comportamiento de la absorbancia que registra el $K_2Cr_2O_7$ cuando se cambia la concentración

Evaluación del Composito Teniendo en Cuenta el pH

Tabla 11

Comportamiento del composito en condición de variación de pH

Solución	Absorbancia soluciones diluidas K ₂ Cr ₂ O ₇ variando pH		Absorbancia polímero (PBMA) sin modificar		Absorbancia polímero modificado (PBMA + Fe ₂ O ₃)	
	Absorbancia a λ = 380 nm	Absorbancia a λ = 350 nm	Absorbancia a λ = 380 nm	Absorbancia a λ = 350 nm	Absorbancia a λ = 380 nm	Absorbancia a λ = 350 nm
Stock pH 4,89	0,623	0,748	0,665	0,643	0,514	0,574
pH 10,33	0,439	0,585	0,333	0,225	0,375	0,439
pH 2,17	0,239	0,423	0,106	0,268	0,046	0,203

La tabla 11 muestra el comportamiento de la absorbancia que registra el K₂Cr₂O₇ cuando se cambia el pH

Para obtener los datos de la Tabla 11 se tomó una muestra de la solución madre (62mg de $K_2Cr_2O_7$ en 250 mL) a la que se le mide el valor de pH 4,89 y a dos soluciones que previamente se habían preparado con soluciones amortiguadoras de pH 2,17 y pH 10.33.

Fotografía 48

Solución de $K_2Cr_2O_7$ a pH 2,17



En la fotografía 48 se observa la preparación y medida de la solución de $K_2Cr_2O_7$ a pH 2,17

Fotografía 49

Solución $K_2Cr_2O_7$ a pH 4,89



En la fotografía 49 se observa la preparación y medida de la solución $K_2Cr_2O_7$ a pH 4,89

Fotografía 50

Soluciones preparadas a valores de pH distintos



En la fotografía 50 se observan soluciones de $K_2Cr_2O_7$ preparadas con distintos valores de pH, junto a la solución madre o stock

Para lograr las soluciones muestra se agregaron 50mg tanto al polímero modificado (PBMA + Fe_2O_3), como al polímero sin modificar (PBMA) a las soluciones de pH conocido. Se colocan en una plancha de agitación simultánea a 1400rev/min. Luego se filtra para eliminar los sólidos que contenga la mezcla que se ha sometido a agitación y se llevan al UV -Vis para determinar su absorbancia.

Fotografía 51

Interacción del $K_2Cr_2O_7$ con los polímeros



En la fotografía 51 se observa la interacción del $K_2Cr_2O_7$ con los polímeros, tanto PBMA como del PBMA + Fe_2O_3 en simultáneo por dos horas para estudio de la matriz acuosa

Fotografía 52

Filtrado de la matriz acuosa



En la fotografía 52 de muestra el filtrado de la matriz acuosa después de las dos horas de agitación e interacción con los polímeros

Valores Porcentuales de la Absorbancia en Función de la Concentración

Tabla 12

Absorbancia porcentual del $K_2Cr_2O_7$ variando la concentración

Concentración	Absorbancia $K_2Cr_2O_7$ variando la concentración			
	Absorbancia a $\lambda = 380 \text{ nm}$		Absorbancia a $\lambda = 350 \text{ nm}$	
	PBMA	PBMA + Fe_2O_3	PBMA	PBMA + Fe_2O_3
0,00034 M (5 mL)	24%	24%	43%	44%
0,00085 M (12,5 mL)	1%	1%	25%	26%
Promedio			34%	35%

La Tabla 12 está basada en la Tabla 10 (Comportamiento del Composito en Alícuotas 5,0 mL y 12,5 mL Llevados a 50mL) y muestra el porcentaje de reducción de la absorbancia variando la concentración del $K_2Cr_2O_7$. Los valores de 34% y 35% es un promedio entre los valores de las dos concentraciones

Valores Porcentuales de la Absorbancia en Función del pH

Tabla 13

Absorbancia porcentual del $K_2Cr_2O_7$ con variación pH

Solución	Absorbancia polímero (PBMA) sin modificar		Absorbancia polímero modificado (PBMA + Fe ₂ O ₃)	
	$\lambda = 380 \text{ nm}$	$\lambda = 350 \text{ nm}$	$\lambda = 380 \text{ nm}$	$\lambda = 350 \text{ nm}$
Stock pH 4,89	0%	14%	18%	23%
pH 10,33	24%	62%	15%	25%
pH 2,17	56%	37%	81%	52%

Los resultados de la tabla 13 están basados en la Tabla 11 (Evaluación del Composito Teniendo en Cuenta el pH) y muestran la reducción porcentual de la absorbancia del $K_2Cr_2O_7$ cuando de varía el pH

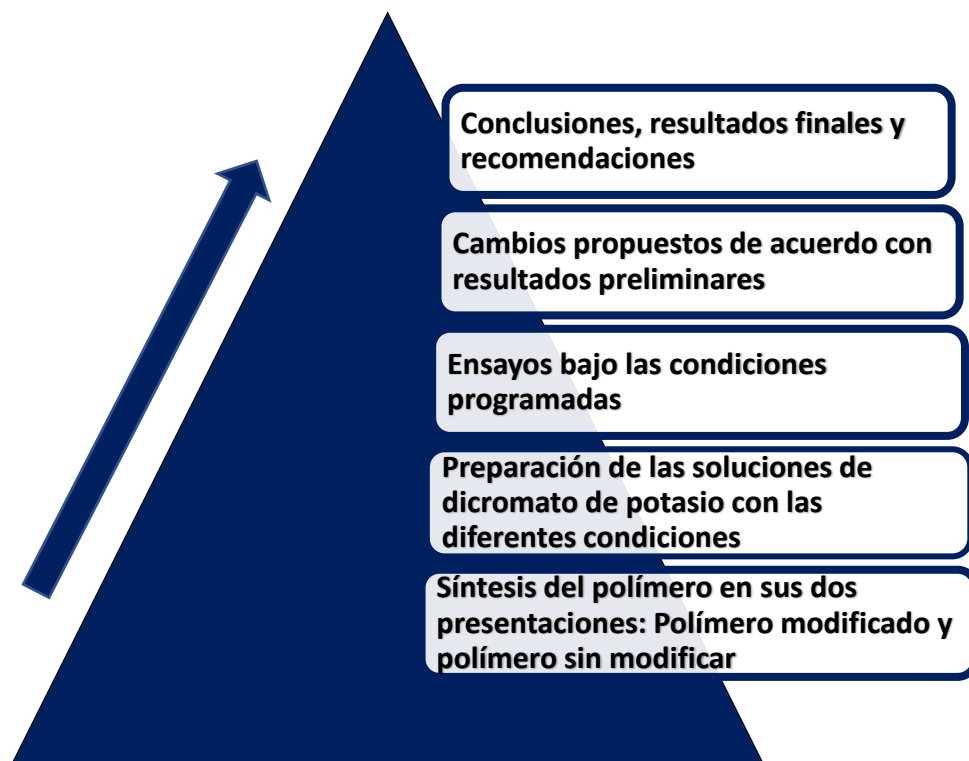
Análisis de Resultados

Esquematización del Desarrollo de la Investigación

La investigación se ha basada principalmente en el estudio de la adsorción del material polimérico previamente sintetizado en sus dos variantes polímero modificado (PBMA + Fe₂O₃) y polímero sin modificar (PBMA). Para esto se han hecho diferentes procedimientos tanto para la obtención y caracterización del polímero como para la extracción del dicromato de potasio, acorde con las absorbancias obtenidas de soluciones patrón de dicromato de potasio con el fin de determinar la eficiencia de la extracción del cromo hexavalente por parte del polímero. El esquema 17 muestra los procesos que se llevaron a cabo para obtener los resultados finales.

Esquema 17

Desarrollo de la investigación



Fuente: Autor

Evaluación de la Síntesis de Polí(butilmetacrilato)

En cuanto a la elección del poli(butilmetacrilato) para este estudio se debe principalmente a que este polímero es tolerante a diferentes valores de pH, condición que se plantea cambiar en varias etapas del trabajo experimental. Además, la presencia de la presencia de grupos funcionales para modificación potencial (Tsvetkov, Vitovskaya, & Lyubina, 1962) Estructuralmente tienden a formar materiales de alta porosidad que pueden permitir mejores procesos de interacción y difusión ya que la superficie polimérica presentará mayor área superficial lo que permite una mayor eficiencia de transferencia de masas y un mejor anclaje entre el analito (ion dicromato) y la fase estacionaria. Adicionalmente, el metacrilato presenta una polaridad deseable (Mexpolimeros, 2023) para interactuar con sustancias inorgánicas como el óxido férrico presentando un tipo de interacciones entre cargas inducidas que se pueden generar por la alta polaridad del grupo carbonilo a lo largo de la estructura polimérica. Finalmente, este polímero se escogió también debido a su valor de Tg (temperatura de transición vítrea) que se da alrededor de los 20°C (Rodríguez & Santana, 2015), lo que permite un adecuado trabajo a temperatura ambiente.

La temperatura de transición vítrea permite que el polímero tenga sus moléculas dispuestas en forma aleatoria lo que podría permitir una mayor superficie y unas mejores condiciones de adsorción. En comparación con otros polímeros, el PBMA tiene una cadena más larga, lo que lo hace más insoluble en agua, lo que puede servir en el momento de permanecer en la matriz acuosa reteniendo los iones Cr^{6+} de los dicromatos.

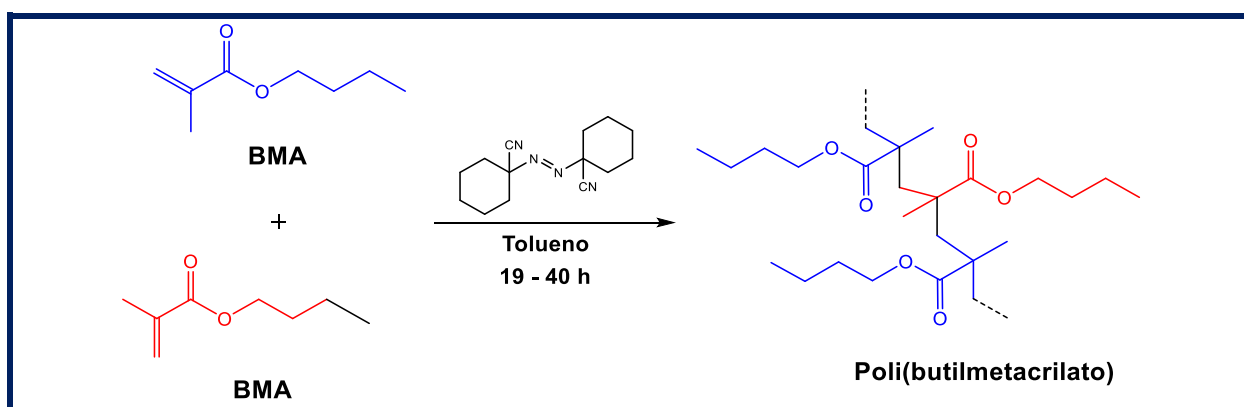
Inicialmente la polimerización se realizó usando como iniciador peróxido de benzoilo, la reacción demoró 72 h, el producto era irregular en forma y dureza, adicionalmente con un

rendimiento muy bajo en el proceso de polimerización, razón por lo cual se decidió realizar el procedimiento usando 1,1'-Azobis(ciclohexanocarbonitrilo) (ABCN).

Para la obtención del polímero usando el iniciador ABCN, se empleó la metodología planteada por (Yang & Hu, 2006) en el cual se hace reaccionar una mezcla compuesta por butilmetacrilato (BMA) y tolueno, para el iniciador se calculó el 1% de la mezcla de monómero en el disolvente, la reacción se representa en la siguiente figura:

Figura 12

Reacción general de polimerización



Fuente: Autor

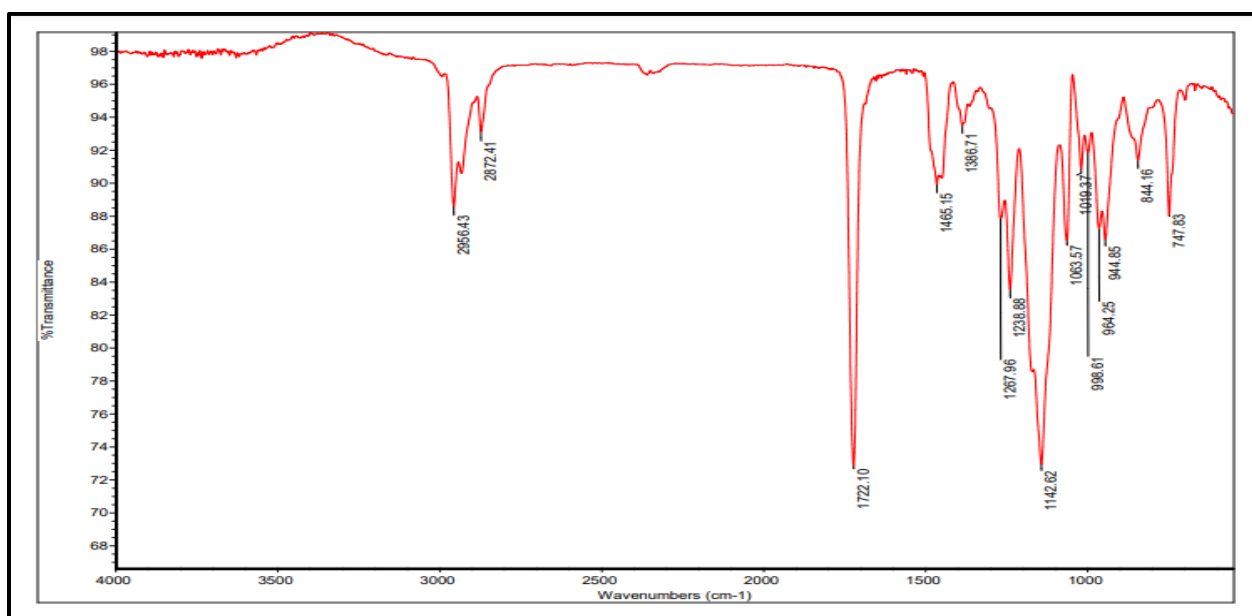
Para caracterizar el polímero obtenido se utilizó la técnica IR-ATR (Infrarrojo - Attenuated Total Reflection), que como se indicó anteriormente, permite reconocer los grupos funcionales de un compuesto. Esta técnica se escogió porque es esencial para el análisis de materiales poliméricos, es una técnica muy sensible, es económica y de fácil acceso, el módulo ATR permite alistar fácilmente la muestra con lo que se logra hacer seguimiento a los procesos de modificación planteada.

El polímero que se obtuvo fue de color blanco, con muy buen rendimiento, con moderada resistencia mecánica y se caracterizó empleando IR-ATR (Figura 14). En el espectro IR (ATR) se observan las señales características del estiramiento C-H alifático entre $2956\text{-}2872\text{ cm}^{-1}$, en

1722 cm^{-1} la señal correspondiente al estiramiento C=O, en 1465 cm^{-1} el pico correspondiente a la flexión C-H alifático, en 1142 la señal correspondiente al estiramiento C-O (ver anexo 1) No se observan señales de estiramientos o flexiones C=C insaturado, lo cual indica que el método de polimerización fue efectivo.

Figura 13

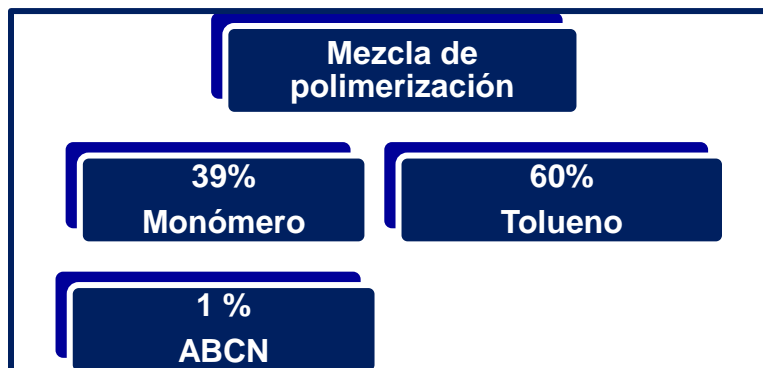
Caracterización del poli(butilmetacrilato) (PBMA)



Adicional a lo anterior, el iniciador ABCN no afecta el tamaño de los poros ya que esto afectaría la resistencia mecánica del polímero en los procesos de extracción. La mejor mezcla para la polimerización se resume en el Esquema 18.

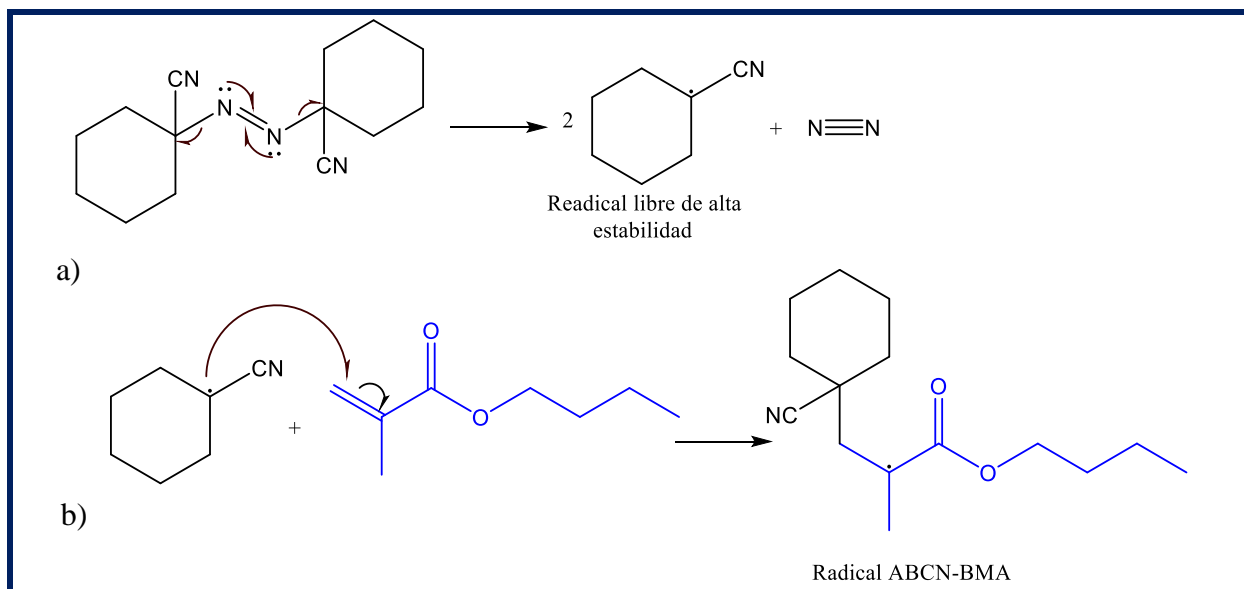
Esquema 18

Mezcla de reacción para la polimerización



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta estos resultados en los cuales la polimerización con ABCN resulta más efectiva que la polimerización con peróxido de benzoilo, se puede entender que por la estabilidad del radical libre generado por el ABCN resulta muy reactivo ya que este radical se puede estabilizar durante las etapas iniciales de la reacción en cadena. La polimerización, de acuerdo a lo descrito en la literatura (Yang & Hu, 2006) procede por radicales libres, el iniciador, en este caso 1,1'-Azobis(ciclohexanocarbonitrilo) (ABCN), se escinde cuando el par de electrones del enlace $-N=N-$ se rompe, produciendo dos fragmentos de iniciador, cada una con un electrón desapareado, el cual ataca al doble enlace vinílico, formándose un nuevo radical, reacción que se muestra en la figura 15, a). Esta etapa resulta más eficiente que con el peróxido de benzoilo, ya que la generación del radical peróxido es considerablemente menor

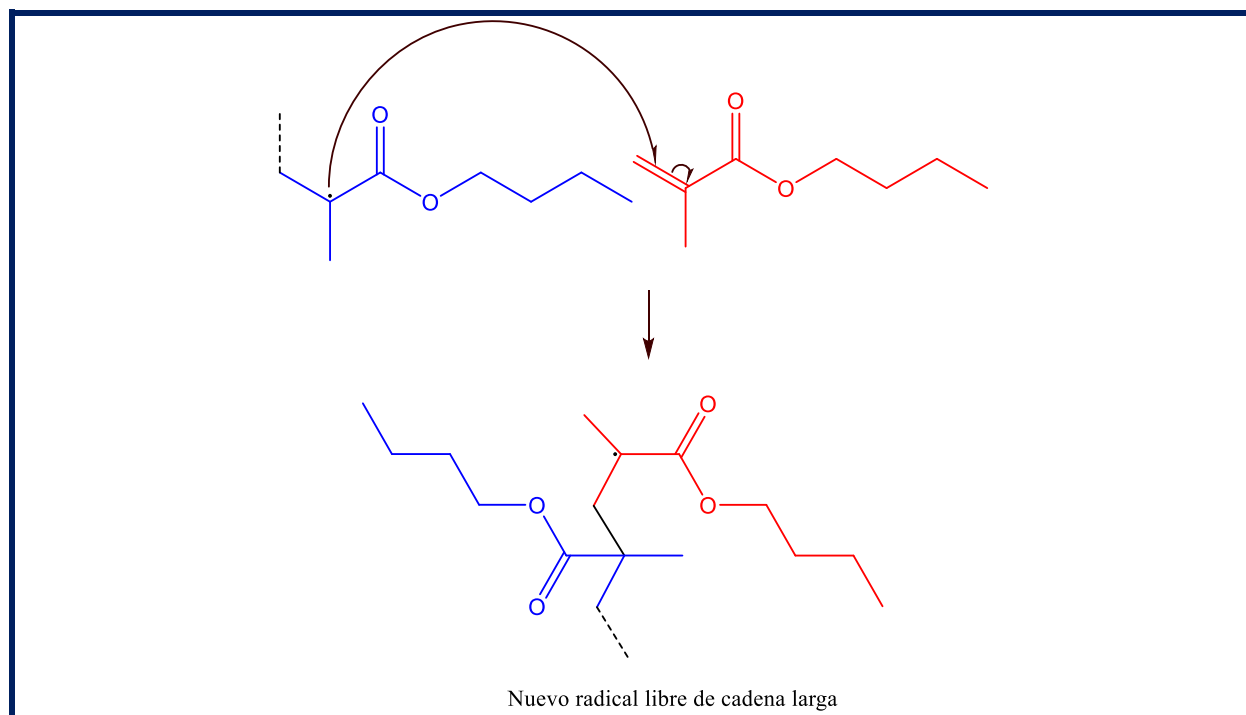
Figura 14*Etapa inicial del proceso de polimerización*

Fuente: Autor

El radical ABCN-BMA formado (Figura 15, b) reacciona con otro doble enlace de alguno de los monómeros presentes en la mezcla de polimerización, este proceso se repite varias veces y se conoce como propagación.

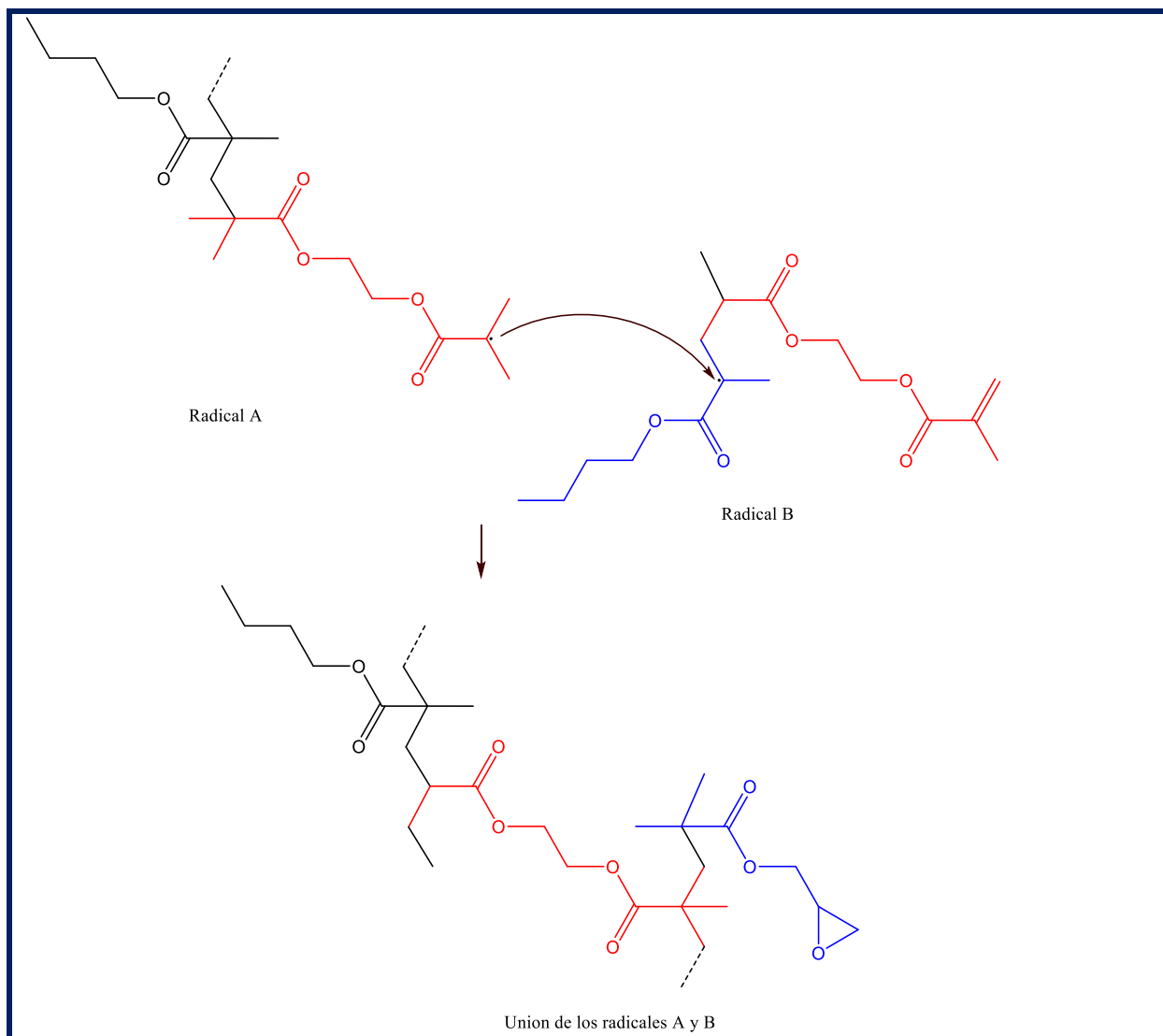
Figura 15

Etapa de propagación en la polimerización



Fuente: Autor

Los radicales son inestables y encuentran la manera de aparearse sin generar un nuevo radical, esto puede ocurrir mediante acoplamiento y es la reacción entre dos cadenas en crecimiento. Los dos electrones desapareados formarán un nuevo enlace finalizando la polimerización como se muestra en la siguiente figura (Figura 17).

Figura 16*Etapa de finalización de la polimerización*

Fuente: Autor

Modificación Física de Poli(butilmetacrilato) con Óxido Férrico

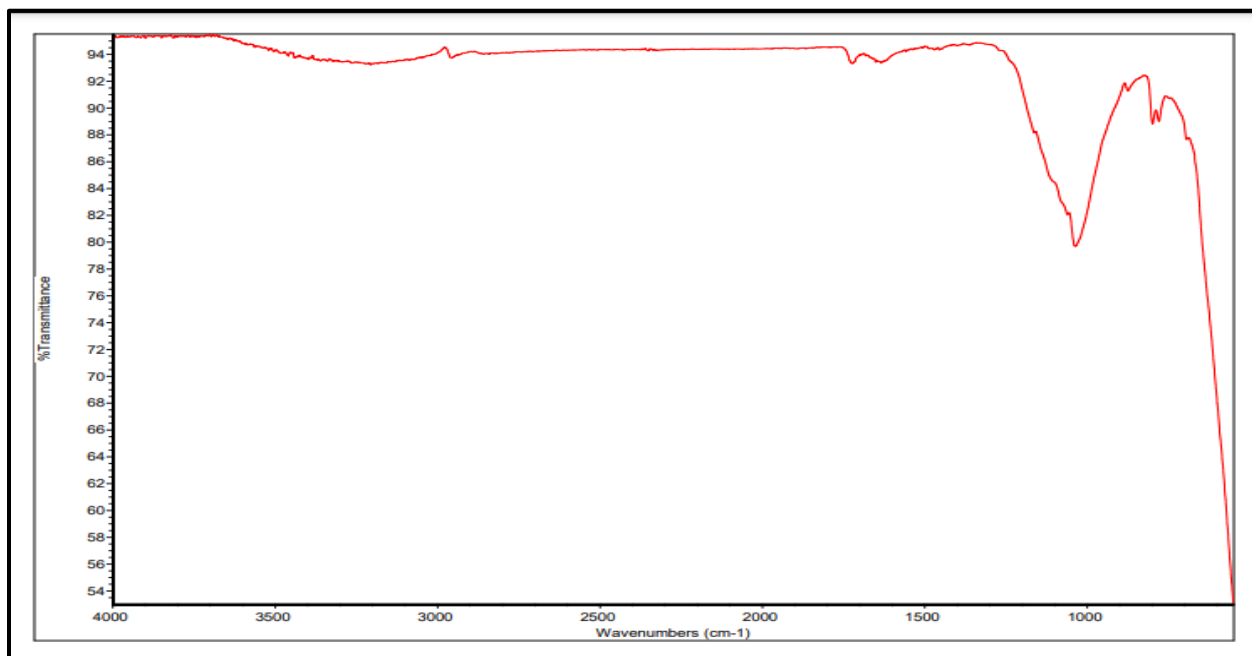
Una vez estandarizado el proceso de obtención de poli(butilmetacrilato), se planteó realizar la modificación física del polímero por adición de óxido férrico mediante un procedimiento físico que permita una distribución uniforme del material inorgánico en la matriz polimérica. El Óxido férrico se escogió dado el inmenso interés científico que ha despertado

especialmente con el uso de nanopartículas magnéticas (NPMs) de óxidos de hierro (Angélica, Pizzioa, & Ronanelli, 2019), por lo que se quería evaluar si al mezclarlo con PBMA se puede obtener un material compuesto de alta uniformidad y estabilidad y que mantenga la alta afinidad con iones dicromato como algunos estudios anteriores lo han evidenciado (Shan, Zeng, Zhao, & Zhan, 2020) y (Ullah, y otros, 2021).

El primer procedimiento realizado, consistió en hacer una mezcla íntima en un mortero poniendo el material polimérico fácilmente quebradizo en contacto con el óxido férrico que se obtuvo en polvo. Para evaluar el grado de interacción entre los dos componentes se decidió obtener el espectro Infrarrojo del óxido férrico, aprovechado el hecho de que el óxido férrico presenta actividad en la región infrarroja, este espectro se muestra a continuación:

Figura 17

Espectro Infrarrojo del óxido férrico

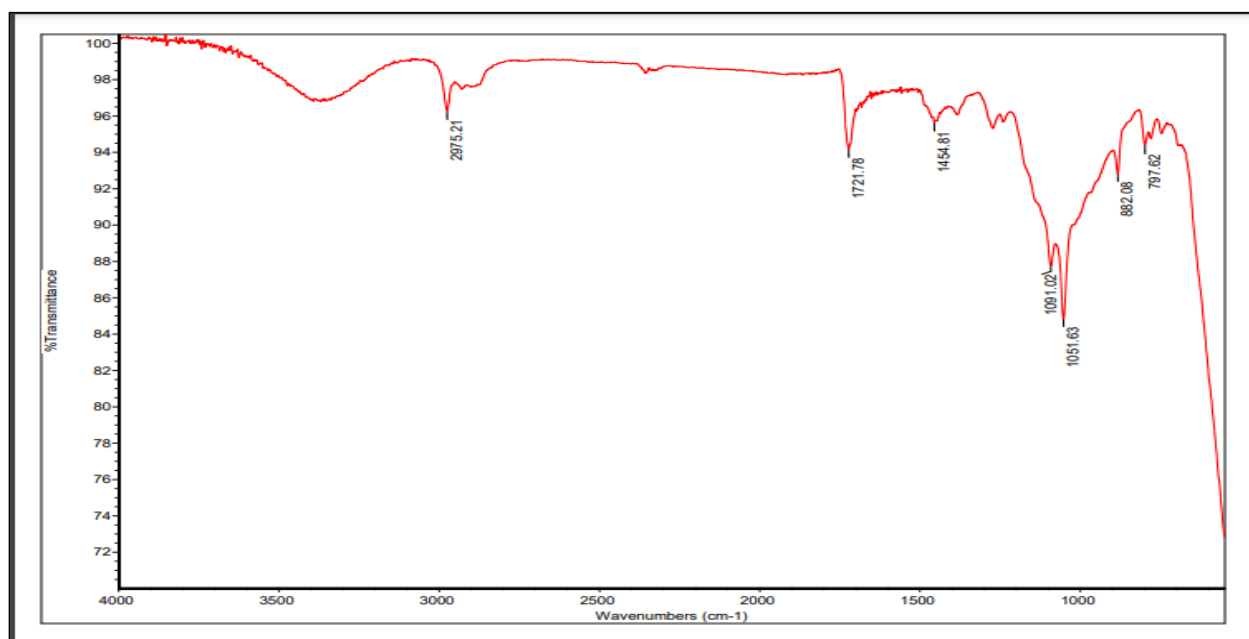


Fuente: Autor

Como se puede ver, el espectro Infrarrojo presenta una única señal alrededor de los 1051 cm^{-1} que de acuerdo a la estructura de este óxido corresponde al estiramiento Fe-O (Cely, 2014), y que servirá de referente para establecer por su intensidad si la interacción física entre los dos componentes se ha dado de manera eficiente. Al evaluar el primer procedimiento de obtención del material modificado se encuentra que, al tomar el espectro Infrarrojo, este presenta las señales de los dos componentes, pero con cambios de intensidad notables en sus señales, a continuación, se muestra un ejemplo (Figura 18)

Figura 18

Espectro Infrarrojo del material obtenido por mezcla simple



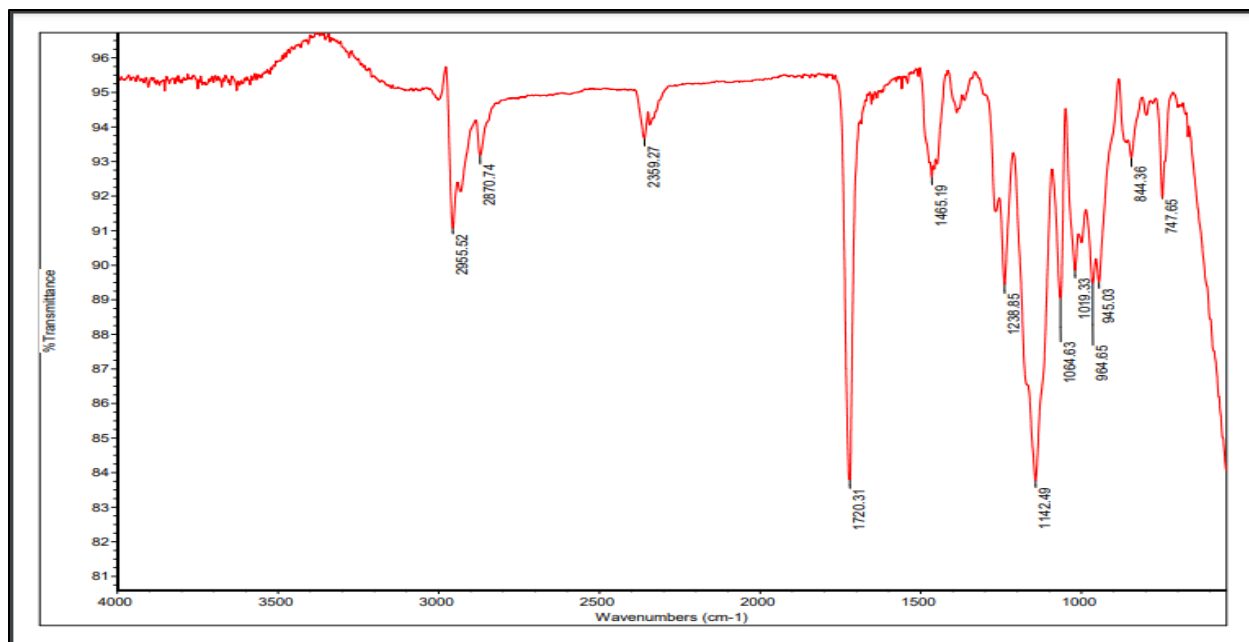
Fuente: Autor

Como se puede ver en el espectro Infrarrojo, esta parte de la muestra presenta una alta composición de óxido férrico (señal en 1051 cm^{-1}) pero las señales del polímero están notablemente disminuidas. Al obtener el espectro con otra muestra, fue evidente que la tendencia cambió con lo cual se concluye que a pesar del cuidado que se tuvo en homogenizar la muestra esta no tenía una distribución uniforme del óxido en el polímero.

El segundo método que se ensayó, consistió en hacer la polimerización del metacrilato de butilo en presencia de óxido férrico como se presentó en la sección experimental, en este caso se logró obtener un sólido de color rojizo por la presencia del óxido férrico y brillante por la presencia del polímero en este material, el infrarrojo se analizó encontrando las señales características del polímero en $2956-2872\text{ cm}^{-1}$ que como se mencionó anteriormente se asignó a los enlaces C-H de la estructura polimérica, en 1722 cm^{-1} la señal correspondiente al estiramiento C=O, en 1465 cm^{-1} el pico correspondiente a la flexión C-H alifático, en 1142 la señal correspondiente al estiramiento C-O (ver anexo 1), y claramente también la señal en 1054 cm^{-1} que correspondió efectivamente al óxido férrico (Figura 18).

Figura 19

IR del polímero modificado con óxido férrico



Fuente: Autor

Al repetir los espectros Infrarrojo con varias muestras del producto obtenido se encuentra que los espectros son notablemente similares, con lo cual se concluye que el material polimérico modificado es altamente uniforme (figura 20).

Para un mejor entendimiento y como resumen de las lecturas obtenidas en los espectros IR mostrados, entendiendo que cada molécula tiene una cierta energía de vibración, pero esta energía solamente puede variar absorbiéndose fotones de la región del infrarrojo (el ojo humano no alcanza a ver estas regiones), en el espectro infrarrojo se plasma el resultado de la interacción entre las muestras y la radiación infrarroja. “La región del espectro situada entre 4000 y 1400 cm^{-1} , es de gran utilidad para la identificación de la mayoría de los grupos funcionales presentes en las moléculas orgánicas. Las absorciones que aparecen en esta zona, provienen fundamentalmente de las vibraciones de estiramiento” (Cortez, 2017). En cuanto al óxido de hierro, se basó en los reportes de (Cely, 2014): “Los espectros IR de los óxidos se midieron en un rango completo de 400 – 4000 cm^{-1} , pero la región de interés se encuentra entre 400 – 1400 cm^{-1} , en la cual se encuentran bandas características de óxidos de neodimio, hierro”, se elabora, por tanto, la siguiente tabla:

Tabla 14

Asignación de las bandas IR para los polímeros PBMA y PBMA + Fe₂O₃

PBMA		PBMA + Fe₂O₃	
Cm^{-1}	Asignación	Cm^{-1}	Asignación
2956	Estiramiento C-H del sustituyente butil	2956	Estiramiento C-H del sustituyente butil
2870	Estiramiento C-H del sustituyente butil	2870	Estiramiento C-H del sustituyente butil
1722	Éster, estiramiento C=O	1720	Éster, estiramiento C=O
1267	Éster, estiramiento C=O	1465	Flexión del enlace C-H
1238	Estiramiento C-O	1142	Estiramiento C-O

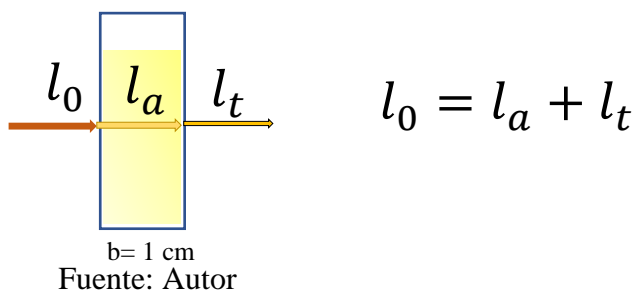
1063	Estiramiento C-O	1054	Óxido de hierro
1019	Armónicos, estructura hidrocarbonada	964	Armónicos, estructura hidrocarbonada
944	Armónicos, estructura hidrocarbonada	915	Armónicos, estructura hidrocarbonada
844	Armónicos, estructura hidrocarbonada	844	Armónicos, estructura hidrocarbonada
747	Armónicos, estructura hidrocarbonada	747	Armónicos, estructura hidrocarbonada

Análisis de Ion Dicromato

Para hacer un adecuado seguimiento del ion dicromato se optó por la técnica UV-Visible ya que presentaba varias ventajas con respecto a otras técnicas, particularmente porque permite una fácil extracción de la solución y se puede medir directamente sin necesidad de operaciones de laboratorio adicionales, ya que la separación de la solución y de la matriz polimérica se puede realizar por simple decantación o por filtración. La espectrofotometría UV Visible es una técnica que mide la cantidad de energía radiante que posee un compuesto o sustancia química, permite determinar su concentración midiendo la cantidad de luz que absorbe dicha sustancia a la que se hace pasar por un haz de luz a una determinada longitud de onda (λ). En esta técnica se utilizan longitudes de onda UV (195-400 nm) y Visible (400 – 780 nm). El equipo que se usa se denomina Espectrofotómetro UV – VIS., en donde el principio físico que se da es el siguiente:

Si se hace incidir un haz de luz l_0 perpendicular a una muestra de una sustancia, el compuesto absorberá una parte de la radiación que incide l_a y la otra parte atraviesa la celda

l_t la radiación incidente es igual a la suma de la radiación que se absorbe y la radiación que atraviesa $l_0 = l_a + l_t$



Esto sucede atendiendo a la denominada *Ley de Lambert-Beer*; esta ley muestra que hay una relación entre la absorbancia A y la concentración [C] de una solución.

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot [C]$$

ε = *coeficiente de absortividad*

ε , Indica la cantidad de luz absorbida por una sustancia cuando se encuentra en disolución

b = *Distancia que recorre el haz de luz que atraviesa la solución*

Esta ley se usa para expresar el modo en el que la materia absorbe la luz. Realmente la cantidad de luz que incide disminuye a medida que atraviesa el medio absorbente.

A este concepto se le denomina Transmitancia (T)

$$T = 10^{-\varepsilon \cdot b \cdot [C]} \quad \rightarrow \quad T = 10^{-A}$$

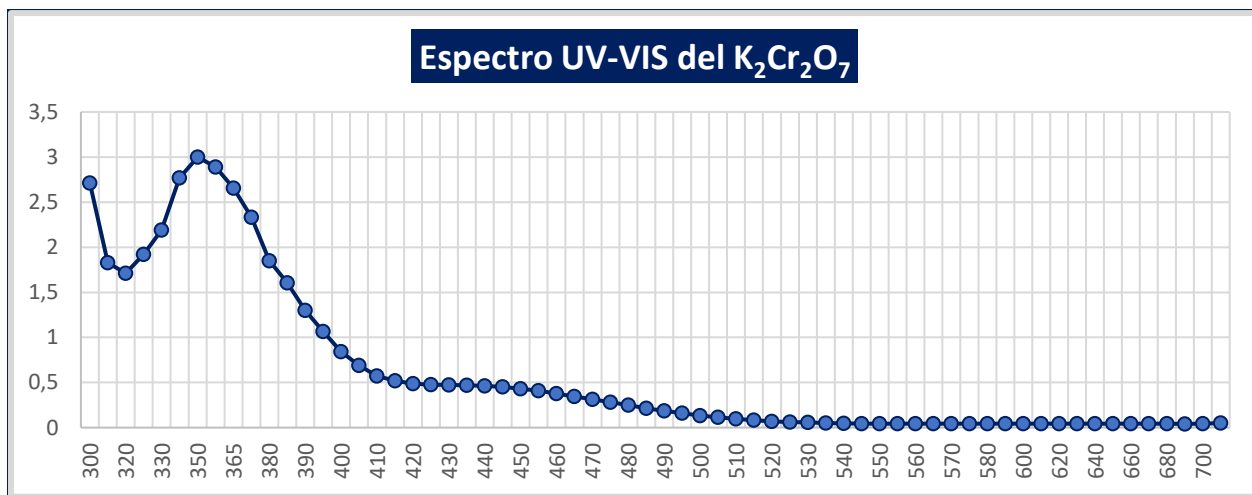
$$A = -\log_{10} \left(\frac{l_a}{l_0} \right) \quad \rightarrow \quad A = -\log_{10}(T)$$

Evaluación y Uso de la Técnica Espectroscopia UV- Visible

Lo primero fue obtener el espectro de UV-Visible del ion dicromato, como se describió en la parte experimental se realizó un barrido de longitudes de onda versus absorbancia para determinar la longitud de onda máxima.

Gráfico 1

Espectro UV-VIS del $K_2Cr_2O_7$



El gráfico 1 es realizado a partir de la Tabla 7: Espectro UV-VIS del $K_2Cr_2O_7$

De acuerdo con la tabla y el gráfico anteriores se determina que el $K_2Cr_2O_7$ tiene su mayor absorbancia en (λ) 350 nm a pH neutro. Debido a esto, para toda la investigación se trabajarán las longitudes de onda (λ) 350 nm y (λ) 380 nm, con el objetivo de ir verificando la mayor o menor absorbancia de la sustancia de acuerdo con la longitud de onda y de los cambios de pH.

El siguiente paso fue obtener las curvas de calibración del ion dicromato en las longitudes de onda mencionadas ya que se ajusten a la ley de Lambert-Beer, es decir la absorbancia es proporcional a la concentración del ion dicromato.

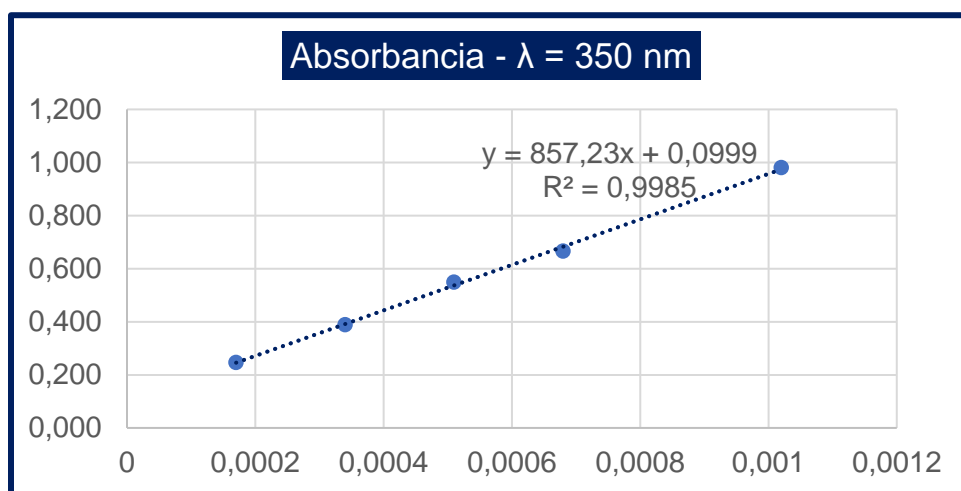
Construcción y Análisis de las Curvas de Calibración

Las curvas de calibración se construyeron teniendo en cuenta que la absorbancia de las soluciones de referencia no fuera mayor a 1,00, específicamente en un rango 0,1 a 0,9 de absorbancia. La linealidad del sistema se determinó mediante la medida de la absorbancia de soluciones de dicromato de potasio de concentración conocida como se presentó en la parte experimental. Este parámetro indica la capacidad del espectrofotómetro UV-Visible de

suministrar una señal que sea directamente proporcional a la concentración del dicromato en un rango de concentraciones cuyas absorbancias no excedan la unidad. En el gráfico 2 se presenta la curva de calibración del estándar ion dicromato (la máxima absorbancia que registró el espectro a una longitud de onda de $\lambda = 350$ nm) realizado a cinco concentraciones distintas. En el gráfico 3, se construye la curva de calibración a una longitud de onda de $\lambda = 350$ nm. Las dos gráficas, en las dos longitudes de onda medidas evidencian que el proceso presenta excelente linealidad, mostrando valores de R^2 (Coeficiente de determinación) superiores a 0,995.

Gráfico 2

Curva de calibración $K_2Cr_2O_7$ a $\lambda = 350$ nm

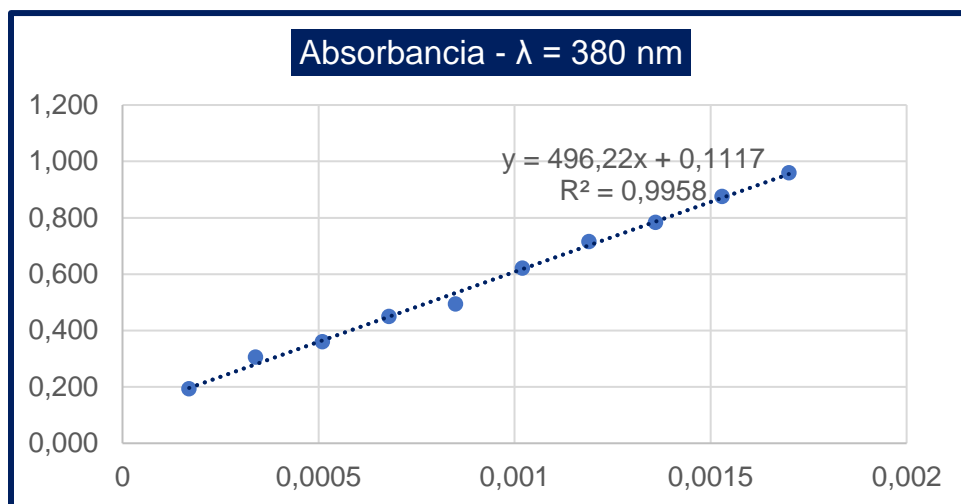


El gráfico 2 se construye a partir de la *Tabla 8: Curva de calibración $\lambda = 350$ nm*

El gráfico 2 describe el comportamiento lineal de la relación entre la absorbancia y la concentración de las diferentes soluciones de dicromato de potasio, a una longitud de onda (λ) de 350 nm. Los puntos corresponden a la medida experimental de las diferentes concentraciones del dicromato de potasio y la línea corresponde a un ajuste matemático. El coeficiente de correlación R^2 proporciona el dato de qué tan cerca están los datos de la línea ajustada. Mientras más cerca esté de 1, más cerca está de la linealidad y predice la confiabilidad de los resultados.

Gráfico 3

Curva de calibración $K_2Cr_2O_7$ a $\lambda = 380$ nm



El gráfico 3 se construye a partir de la *Tabla 9: Curva de calibración $\lambda = 380$ nm*

El gráfico 3 describe el comportamiento lineal de la relación entre la absorbancia y la concentración de las diferentes soluciones de dicromato de potasio, a una longitud de onda (λ) de 380 nm. De la misma manera que para el gráfico 2, los puntos corresponden a la medida experimental de las diferentes concentraciones del dicromato de potasio y la línea corresponde a un ajuste matemático.

La linealidad mostrada por los coeficientes de determinación (los valores de R^2): Para $\lambda = 380$ nm, $R^2 = 0,9958$ y para $\lambda = 350$ nm, $R^2 = 0,9985$, valores muy cercanos a 1 muestra la progresividad de las concentraciones utilizadas, lo cual proporciona confianza en cuanto a los datos experimentales.

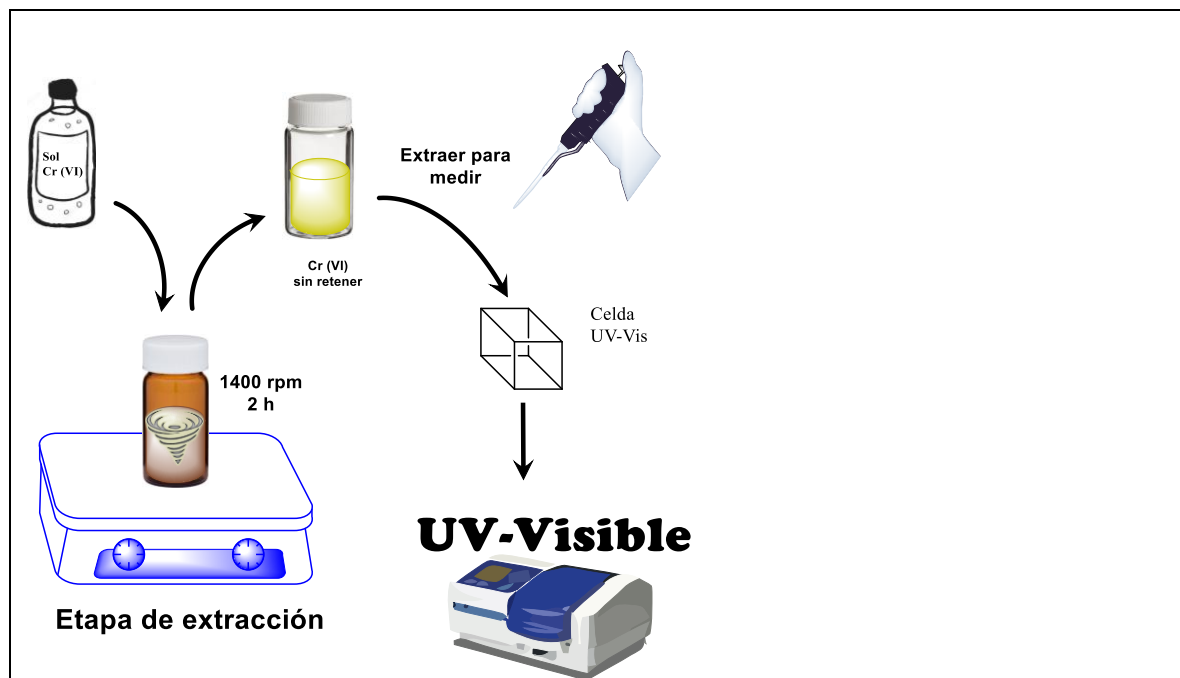
Método de Extracción

Una vez obtenidos los materiales poliméricos y después de haber definido el método de análisis por UV-Visible, el siguiente paso consistió en diseñar el método de extracción y de medida del ion dicromato en solución. Para realizar el proceso de interacción entre el material polimérico y el ion dicromato en solución, se decidió emplear la técnica moderna de extracción

en batch, por sus atributos de fácil manipulación y obtención de la muestra para poder medir fácilmente por medio de una celda de cuarzo en un equipo UV-Visible. La cuantificación por UV-Visible, es una técnica económica en comparación con otras técnicas, adicionalmente sus atributos son suficientes para el diagnóstico y monitoreo en el análisis de las muestras realizadas en este trabajo. Como se visualiza en el Esquema 19, el método que se aplicó para los dos polímeros que se han estudiado en este trabajo, se realizó haciendo una mezcla heterogénea entre la solución y el material polimérico, y se puso en un agitador magnético multipunto por un tiempo de 2 h (tiempo habitual para este tipo de determinaciones). Una vez transcurrido el proceso de interacción se retira parte de la solución de dicromato (el que no ha sido retenido por la matriz polimérica) y se toma el espectro UV-Vis en el intervalo de 200-800 nm.

Esquema 19

Protocolo general de extracción y cuantificación de ion dicromato



Fuente: Autor

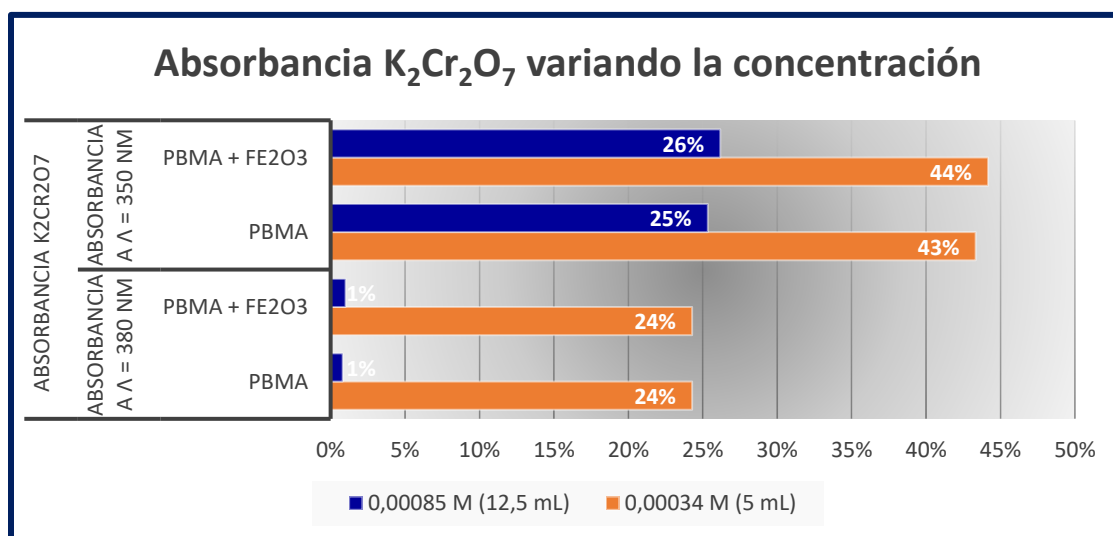
Con los polímeros obtenidos y el método de extracción y cuantificación establecidos, se procedió a determinar los factores o interacciones que tienen mayor efecto o influencia sobre el método de extracción, acorde a trabajos similares (Ullah, y otros, 2021), para luego realizar la optimización de la extracción. Para este fin, se realizó un “screening”, donde los factores experimentales seleccionados fueron: Concentración del analito y pH de la solución. Otros factores como la masa del sorbente (50 mg), tiempo de desorción (120 min), volumen de carga (5 mL) y agitación se establecieron como constantes durante todas las determinaciones. Los resultados de los dos factores evaluados se muestran a continuación.

Efecto en la Concentración del Ion Dicromato al Interactuar con los Polímeros Obtenidos

Como lo titula el apartado se va a analizar el efecto en la concentración del ion dicromato cuando interactúa con la matriz polimérica tomando la absorbancia bajo la técnica Espectrofotometría UV-Vis, tanto al PBMA como al PBMA + Fe₂O₃. Lo que se espera es que haya una reducción de los valores de la absorbancia en esta interacción.

Gráfico 4

Porcentaje de reducción de absorbancia de K₂Cr₂O₇ variando la concentración



Fuente: Autor

Es de resaltar que, efectivamente, hay una reducción de la absorbancia de 43%, en el caso del PBMA y 44% en el caso del PBMA + Fe₂O₃, a una longitud de onda de $\lambda=350$ nm, lo que indica que la retención del dicromato por parte de los polímeros es muy efectiva. En la [Tabla 12: Absorbancia porcentual del K₂Cr₂O₇ variando la concentración], se ha obtenido además el promedio de las absorbancias tomadas de los datos del polímero modificado, valores que registran 34% para PBMA y 35% cuando se trata de PBMA + Fe₂O₃, para $\lambda = 350$ nm.

Este resultado es comparado con un ensayo preliminar que se realizó en una etapa inicial de la investigación y que se registra en el siguiente apartado del cual se tienen valores muy similares. En este mencionado ensayo preliminar, para medir la absorbancia del K₂Cr₂O₇ en el polímero modificado (PMBA + Fe₂O₃) se pesaron 25mg y se adicionaron a 5mL de una disolución de K₂Cr₂O₇ (alícuota preparada de 1,0mL) Se somete a agitación por 2 horas, se filtra y se le aplica la técnica de espectrofotometría visible, en este ensayo se obtuvo el siguiente resultado de la absorbancia:

Tabla 15

Absorbancia del dicromato de potasio para la alícuota de 1,0mL e interactuando con el polímero modificado

Alícuota K₂Cr₂O₇	Absorbancia a λ 350 nm	PMBA modificado con Fe₂O₃ en solución con K₂Cr₂O₇	Absorbancia a λ 350 nm
1,0 mL	0,306	1,0mL	0,205

La Tabla 15 muestra un resultado obtenido con la alícuota de 1,0mL, con el fin de comparar los datos, que resultan muy similares con los promedios obtenidos en la *Tabla 12: Absorbancia porcentual del K₂Cr₂O₇ variando la concentración*

De acuerdo con esta tabla 15, se obtiene un 33% de disminución de la absorbancia, lo que demuestra la eficiencia global del proceso de extracción del $K_2Cr_2O_7$ por parte del (PMBA + Fe_2O_3), y que, en efecto, el experimento es reproducible.

Efecto de la Condición de pH al Interactuar con los Polímeros Obtenidos

Los resultados porcentuales de la [Tabla 13: Absorbancia porcentual del $K_2Cr_2O_7$ con variación pH] muestran que el valor de eficiencia más alta se da para el PBMA + Fe_2O_3 , en una longitud de onda de $\lambda = 380$ nm registrándose en un 80%

Tabla 16

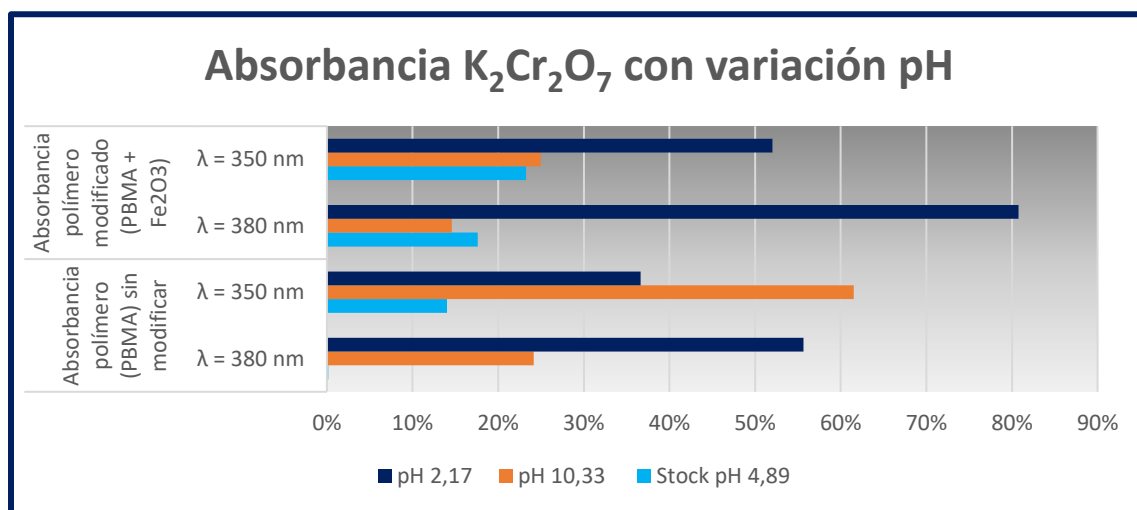
Absorbancia del dicromato de potasio interactuando con el polímero modificado para solución preparada a un pH de 2,17

Alicuota $K_2Cr_2O_7$	Absorbancia a λ 380 nm	PMBA modificado con Fe_2O_3 en solución con $K_2Cr_2O_7$	Absorbancia a λ 350 nm
pH 2,17	0,239	pH 2,17	0,046

La tabla 16 muestra una reducción de más del 80% en la absorbancia

Gráfico 5

Porcentaje de reducción de la absorbancia del $K_2Cr_2O_7$ con variación pH



Fuente: autor

Este resultado está respaldado por la literatura (Hao, Li, Yu, & Liu, 2022) donde los autores confirman la relevancia del pH en la remoción de metales pesados en fuentes de agua, en esos altos porcentajes.

Tabla Resumen de los Resultados

Tabla 17

Tabla de resultados

Actividad	Resultado
Síntesis de PBMA	Polímero con apariencia de polvo blanco, grueso, poco uniforme, caracterizado por IR-ATR como poli(butilmetacrilato)
Síntesis del PBMA + Fe ₂ O ₃	Polímero de color rojo, polvo grueso, brillante, uniforme, caracterizado como poli(butilmetacrilato) con presencia de óxido férrico confirmado por infrarrojo.
Modificación por mezcla del PBMA + Fe ₂ O ₃	Poco uniforme, evidencia en el espectro IR-ATR
Modificación del polímero con adición de óxido férrico, durante el proceso de polimerización	Material de aspecto uniforme, triturado y tamizado. El análisis por IR-ATR permite establecer la presencia de los dos componentes
Curva de calibración de K ₂ Cr ₂ O ₇ a $\lambda = 350$ nm	Obtenida por medio de la medición de la absorbancia de las soluciones diluidas de dicromato de potasio $y = 857,23x + 0,0999$ $R^2 = 0,9985$
Curva de calibración de K ₂ Cr ₂ O ₇ a $\lambda = 380$ nm	Obtenida por medio de la medición de la absorbancia de las soluciones diluidas de dicromato de potasio $y = 496,22x + 0,1117$ $R^2 = 0,9958$
Extracción en función de la Concentración para $\lambda = 350$ nm	43% en promedio en el caso de PBMA y 44% en promedio para PBMA + Fe ₂ O ₃
Extracción a pH ácido	81% en PBMA + Fe ₂ O ₃ para $\lambda = 380$ nm

Teniendo en cuenta los resultados expuestos puede afirmarse que evaluado el polímero modificado PBMA + Fe₂O₃, es eficiente en la extracción de iones cromo VI, en una matriz acuosa, principalmente en medio ácido.

Consideraciones de Acuerdo con los Resultados

La investigación ha arrojado los resultados esperados contestando la pregunta planteada como pregunta de investigación: ¿Pueden adsorberse dicromatos de forma eficiente por medio de procesos fisicoquímicos que involucren el uso de materiales poliméricos con base en metacrilato para su aplicación posterior y proyección al escalamiento industrial en el tratamiento de efluentes industriales? Cuya respuesta es afirmativa:

Los resultados obtenidos en la práctica confirman que pueden adsorberse iones dicromato por medio de procesos físico químicos utilizando una matriz polimérica conformada por el polímero PBMA + Fe₂O₃. Esto puede afirmarse respaldados en la literatura y en el resultado: 43% de disminución de la absorbancia en soluciones sin modificación de pH y 81% de absorbancia en soluciones a pH ácido (2,17)

Esquema Alcance de la Investigación

Esquema 20

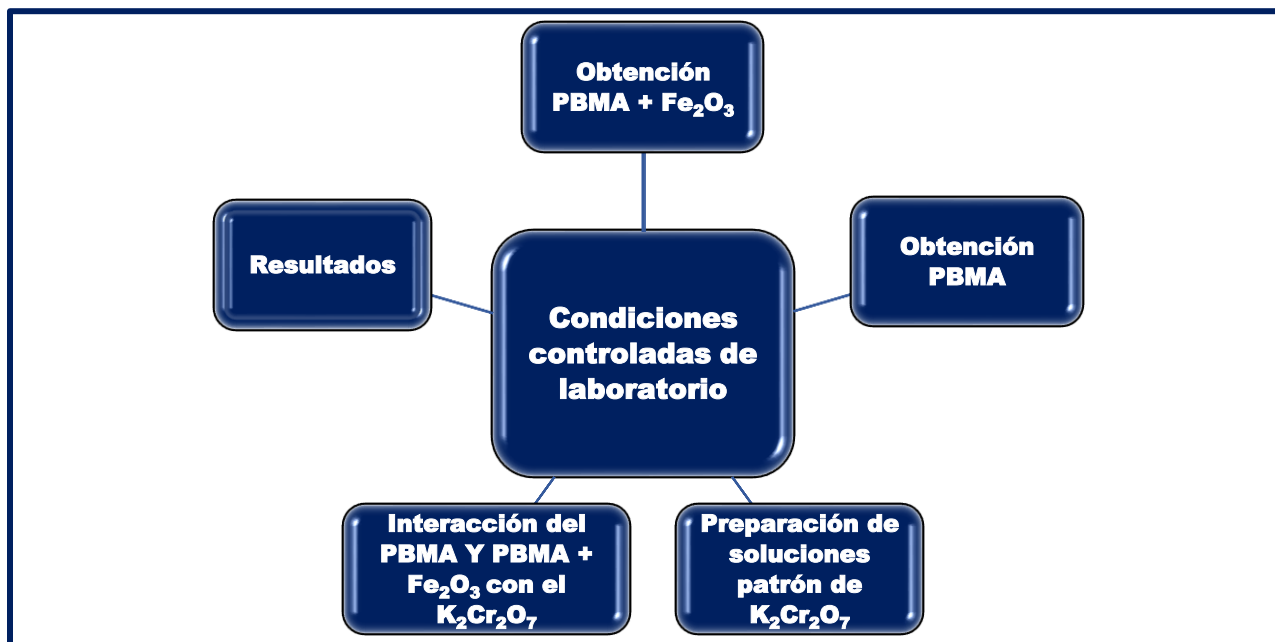
Alcance de la investigación



Fuente: autor

Esquema 21

Condiciones controladas de laboratorio



Fuente: autor

Aplicación a Procesos Industriales

Con estos resultados se puede proponer un proyecto para llevar a la industria planteado como proyecto de ingeniería, teniendo en cuenta que los problemas de contaminación producidos por las industrias son procesos que se encargan a los ingenieros industriales quienes deben encontrar mecanismos eficaces que apoyen a la administración en el cumplimiento de los fines institucionales y al mismo tiempo al cumplimiento de la normatividad y los conceptos de responsabilidad social empresarial. Por eso a partir de este proyecto, puede proponerse la realización de pruebas piloto tendientes a al escalamiento industrial en sectores como las curtiembres y otras que por medio de sus efluentes contaminan las fuentes de agua.

En la industria del cuero, por ejemplo, en su proceso del curtido se utilizan aproximadamente 1000 litros de agua por cuero empleados de modo ineficiente, los cuales

generan grandes volúmenes de efluentes vertidos diariamente (Greenpeace, 2011). También se sabe que esta industria tiene un alto índice de la Demanda Biológica del Oxígeno DBO. Por lo tanto, esta es una de las industrias que pueden beneficiarse con la implementación de estas pruebas piloto en la búsqueda de ofrecer una solución para el control de su contaminación emitida.

El uso de nuevas tecnologías en procesos sustentables, sería una gran ventaja, además se materializaría una simbiosis entre la química de laboratorio y la literatura con la aplicación en procesos industriales utilizando nuevas.

Conclusiones

El uso de poli(butilmetacrilato) modificado con óxido férrico en la adsorción de iones Cr^{6+} presentes en disoluciones acuosas es no sólo viable, sino eficiente puesto que una matriz polimérica formada por PBMA + Fe_2O_3 adsorbe dicromatos bajo distintas condiciones.

La matriz polimérica formada por PBMA + Fe_2O_3 adsorbe dicromato de potasio bajo diferentes concentraciones del analito, condición que muestra una reducción de cerca de 44% en la absorbancia medida por la técnica UV-Vis.

El polímero modificado (PBMA + Fe_2O_3) muestra su mayor eficiencia en la adsorción de Cr^{6+} en ambientes ácidos, se registra un 81% de reducción en la absorbancia a un pH de 2.17, lo que conviene aplicar a nivel industrial en el cumplimiento de la normatividad y en la responsabilidad social empresarial que debe estar en la búsqueda de mitigar la contaminación de las aguas.

El polímero PBMA + Fe_2O_3 sintetizado, caracterizado y evaluado bajo diferentes condiciones es un sistema que puede conducir después del debido proceso de pruebas piloto y escalamiento industrial a una gran aplicabilidad industrial en la mitigación de la contaminación generada en las fuentes de agua por los efluentes industriales.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Industrial se alcanzó eficientemente la meta propuesta que se basó en la evaluación de un material polimérico en la adsorción de los iones tóxicos de dicromato de potasio y queda planteada la proyección para su aplicación industrial.

Recomendaciones

Las investigaciones que busquen profundizar en la interacción de polímeros acrílicos, en especial del poli(butilmetacrilato) con óxido férrico, en la extracción de dicromatos, pueden hacer más pruebas cambiando otras condiciones como puede ser el tiempo de interacción o el volumen de carga. También se recomienda trabajar con otros metales pesados como por ejemplo cadmio y plomo.

Otras investigaciones deben trabajar en la desorción (proceso contrario) con el fin de recuperar el cromo retenido y reciclarlo para el empresario y que pueda volver a usarlo, con lo que se podría dar un gran avance en la reducción de costos de producción.

Para las industrias de curtido de cueros, galvanoplastia, cromado plástico y en la industria del acero, se recomienda ampliamente implementar un proyecto para el manejo de sus efluentes industriales, para esto se deben hacer pruebas piloto con el propósito de iniciar su escalamiento a nivel industrial; esto siguiendo todos los debidos procesos, implementando los controles de ingeniería requeridos y el ciclo PHVA

En términos de impacto se puede recomendar principalmente a las autoridades en la materia y empresarios que se aproveche el beneficio que puede generarse con la aplicación industrial de este proyecto, por supuesto después de más análisis y pruebas piloto directamente en la industria con lo que se podría proponer la mejora de los índices de contaminación por cromo hexavalente, de las aguas servidas.

Referencias

- 3M Company. (2017). *Safety-Walk' Compuesto Sellador para Bordes*. Obtenido de Solvi Mural.
- Acriformas Ltda. (2020). *Acrílico (Polimetilmetacrilato)*. Obtenido de <https://acriformas.com/2020/06/24/acrilico/>
- Admin. (12 de junio de 2020). *Tabla periódica*. Obtenido de Cromo: tipos, características, funciones, aplicaciones...: https://www.tablaperiodica.org/cromo/#google_vignette
- Amazon. (2023). *Óxido de hierro rojo - Pigmentos para hormigón, arcilla, lima, yeso, mampostería y productos de pintura natural (1 kilo | 2.2 libras)*. Obtenido de amazon: <https://www.amazon.com/-/es/%C3%93xido-hierro-rojo-Pigmentos-mamposter%C3%ADa/dp/B074LV3WZ3>
- Angélica, E., Pizzioa, L., & Ronanelli, G. (2019). Catalizadores magnéticos basados en Óxidos de Hierro: Síntesis, Propiedades y Aplicaciones. *Ciencia en Desarrollo*, vol.10 no.1 Tunja.
- Arauzo, M., Rivera, M., M. V., Noreña, C., & O. C. (2003). *Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce y en los sedimentos del río Jarama*. Obtenido de Limnética.com: <https://www.limnetica.com/documentos/limnetica/limnetica-22-2-p-85.pdf>
- Benito, J. M. (2006). *Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas*. Bellaterra: Universidd Autónoma de Barcelona.
- Burciaga, N. G., Claudio, J. A., Cano, L. F., Martínez, A., & Vega, P. (2020). Compositos en estado hidrogel con aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas

- residuales. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México*, vol. 23.
- Camacho, J. S. (2020). *Diagnóstico sobre los niveles de Cromo hexavalente (cr+6) en el tramo IV del Río Tunjuelito*. Bogotá: Repositorio Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Colección Ingeniería Ambiental [815].
- Campos, J. E., Rodrigues, A. R., & Salazar, L. C. (2013). Dermatitis de contacto alérgica a los acrilatos. *Dermatol*, 57:389-393.
- Castiblanco, D. A., Llamosa, D., & Rincón, R. J. (2020). Impacto ambiental de las curtiembres una problemática de vieja data sobre el río Bogotá. *Revista SayWa*, vol 2 No. 3, ene-jun. 2020 / Issn 1711-1571 / Issn on-line 2744-8576.
- Castillo, Maldonado, & Estes. (2022). Removal of Toxic Metal Ions Using Poly(BuMA-co-EDMA) Modified with C-Tetra(nonyl)calix[4]resorcinarene. *Toxics*, 10,204.
- Catiblanco, Y., & Perilla, A. (2019). *Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales proveniente de procesos*. Bogotá: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Cely, S. M. (2014). *Síntesis y caracterización de nano partículas magnéticas a base de óxidos de Neodimio con hierro*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Céspedes, N. E., Valencia, J. S., & Jiménez, J. d. (2007). Remoción de Cromo VI de Soluciones Acuáticas por Adsorción Sobre Carbones Activados Modificados. *Revista Colombiana de Química*, Vol. 36, No. 3 de 2007.
- Cornejo, M. d. (2016). Aplicaciones de los polímeros. *Con-Ciencia Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No 3*, Volumen 3 * No. 5 * Enero 2016 - ISSN: 2007-7653.

- Cortez, P. M. (2017). *Espectroscopia de Infrarrojo para Todos... y 51 espectros de alimentos consumidos en México*. Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C.
- Cuberos, Rodriguez, & Priet. (2009). Niveles de Cromo y Alteraciones de Salud en una Población Expuesta a las Actividades de Curtiembres en Bogotá, Colombia. . *Revista Salud Pública*, 11 (2): 278-289.
- Enlight. (29 de marzo de 2021). *Calentamiento global: los impactos de las grandes industrias*. Obtenido de Enlight: <https://www.enlight.mx/blog/calentamiento-global>
- Eroinnova. (2022). *¿Cuál es el objetivo de las buenas prácticas de laboratorio?* . Obtenido de Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL): <https://www.euroinnova.co/cual-es-el-objetivo-de-las-buenas-practicas-de-laboratorio#buenas-praacutecticas-de-laboratorionbspbpl>
- Escobaro, A. M., Pizzioa, L. R., & Romanelli, G. P. (12 de diciembre de 2018). *Catalizadores magnéticos basados en Óxidos de Hierro*. Obtenido de Scielo: <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v10n1/0121-7488-cide-10-01-79.pdf>
- Gatica, M., Pastor, M., & Silvestre, J. (2018). Dermatitis alérgica de contacto por acrilatos en esmalte de uñas de larga duración. *Actas- Dermo- Sifiliográficas*, 109(6):508-514.
- González, H. (2016). *Cromo*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- González, M. G. (08 de octubre de 2021). *Fotocatálisis heterogénea para la eliminación de contaminantes emergentes de las aguas residuales*. Obtenido de Club ¡agua: <https://www.iagua.es/blogs/miriam-gutierrez-gonzalez/fotocatalisis-heterogenea-eliminacion-contaminantes-emergentes-aguas>
- Greenpeace. (2011). Cueros Tóxicos. Nuevas evidencias de la contaminación de curtiembres en la Cueca Matanza - Ricachelo. *Greenpeace*.

- Grupo Haiyang Yin Hai España. (2022). *Características del gel de sílice/silicagel*. Obtenido de Grupo Haiyang Yin Hai España: <https://www.geldesilice.com/es/gel-de-silice/caracteristicas-del-gel-de-silicesilicagel/26>
- Gugliotta, L. M. (2013). *Polimerizaciones por Radicales Libres*. Santa Fe de la Vera Cruz, Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- Guidechem. (2010). *macromolécula de poli(butil metacrilato) 9003-63-8*. Obtenido de <https://www.guidechem.com/dictionary/es/9003-63-8.html>
- Hao, L., Li, L., Yu, S., & Liu, J. (2022). Humic acid-coated hydrated ferric oxides-polymer nanocomposites for heavy metal removal in water. *Science of the Total Environment*, Volume 834.
- Hermida, É. (2011). Polímeros. Guía Didáctica. Capítulo 9. En M. d. Tecnológica., *Guía Didáctica* (pág. Capítulo 9). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República de Argentina: Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Higuera, F., Folrez, C., & Arroyave, F. (2009). Estudio de la biosorción de cromo con hoja de café. *Revista Ingeniería e Investigación*, Vol 29 No 2, (59-64).
- Hu, I.-K. Y.-C. (2006). Preparation and rheological characterization of poly(n-butyl methacrylate)/montmorillonite composites. *European Polymer Journal* 42, 42.
- La República. (17 de septiembre de 2021). La industria del plástico creció 22,2% frente a 2020 en el primer semestre. *La República*.
- Lenntech Water Treatment solutions. (2023). *Propiedades químicas del Cromo - Efectos del Cromo sobre la salud - Efectos ambientales del Cromo*. Obtenido de Lenntech: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm#:~:text=Elemento%20qu%C3%AD>

mico%2C%20s%2C%20ADmbolo%20Cr%2C%20n%2C%20BAmero,blanco%20plateado%2C%20duro%20y%20quebradizo.

Luis Federico Sala, I. S., González, J. C., Frascaroli, M. I., Bellú, S., Mangiameli, F., Blanes, P., . . . Salas, J. M. (2010). Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *Anales de Química*, 114.

Meira, G., & Gugliotta, L. (2019). *Polímeros. Introducción a su caracterización y a la ingeniería de la polimerización*. Santa Fe, Argentina: Ediciones UNL.

Meléndez, L. A., & Milla, M. E. (2006). *Caracterización de los Procesos de Recubrimientos Metálicos Utilizados en la Empresa M.D.F. Cromatodo S.A. de C.V.* San Salvador: Universidad de El Salvador.

Mexpolimeros. (2023). *Termoplásticos. Polaridad*. Obtenido de Mexpolimeros:

<https://www.mexpolimeros.com/polaridad.html>

Montaubán, R. (2013). *Determinación de cromo (III) y cromo (VI) mediante técnicas electroquímicas de análisis*. Universidad de la República (Uruguay): Tesis de grado. Facultad de Ciencias. Obtenido de Scielo.

Naciones Unidas. (2019). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Objetivo 6:

Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

ONU - DAES. (septiembre de 2015). *Decenio Internacional para la Acción "El Agua Fuente de Vida" 2005-2015*. Obtenido de Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas: <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/>

ONU. (28 de julio de 2022). *Decisión histórica: la ONU declara que el medio ambiente*

saludable es un derecho humano. Obtenido de ONU, Programa para el medio ambiente:

<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/decision-historica-la-onu-declara-que-el-medio-ambiente-saludable>

Pabón, S., Benítez, R., Sarria-Villa, & Gallo. (2020). *Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión*. Obtenido de Scielo: <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf>

Palou, N. (22 de 03 de 2019). Las cifras del agua siguen siendo alarmantes. págs.

<https://www.lavanguardia.com/natural/20190322/461164578761/cifras-agua-siguen-siendo-alarmantes.html>.

Pariguana, M. A., & Ganzales, L. H. (2019). *Reciclaje Químico del Polímero Súper Absorbente de*. Arequ8ipa, Perú: Universidad Católica de Santa Maria.

Pinzón, L. F. (2019). Heavy Metals in the Sludge of the High Basin of the Bogotá River, between Villapinzón And Chocontá. *Revista Ambiental, agua, aire y suelo*, ISSN 1900-9178 Volumen 2.

Recursos Educativos de Química Orgánica. (2002). *Tablas de Espectroscopía* . Obtenido de https://www.ugr.es/~quiorred/lab/tablas_espec/ir.htm

Resinex. (2023). *PMMA Polimetilmetacrilato*. Obtenido de Resinex:

<https://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/pmma.html>

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., & D.-L. M. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16 (2), pp. 66-77.

Rico, M. B., & Gomis, A. M. (2012). *Tecnología de Polímeros. Procesado y propiedades*. San Vicente del Raspeig, España: Publicaciones de la Universidad de Alicante.

- Rodríguez, F., & Santana, J. (2015). *Simulación de un Proceso de Pirólisis de Plásticos empleando ASPEN – HYSYS*. Las Palmas de Gran Canaria: Escuela de Ingenieros Industriales y Civiles Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Salgado, L. V., & Hernández, C. V. (2014). Medición de la absorbancia óptica de soluciones acuosas mediante la instrumentación virtual y el control. *Scientia et Technica Año XIX, Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701*, Vol. 19, No. 1, Marzo de 2014. .
- Sánchez, J. K. (2019). *Presencia, Retención y Remoción de Metales Pesados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Revisión de una Década de Literatura*. Bogotá: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Sánchez, M. G. (2018). *Compositos poliméricos de Poli (ácido acrílico) con hidróxido férrico para el tratamiento de efluentes contaminados con arsénico*. San Luis de Potosí, México: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
- Shan, H., Zeng, C., Zhao, C., & Zhan, H. (2020). Iron oxides decorated graphene oxide/chitosan composite beads for enhanced Cr(VI) removal from aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 13.
- Tellez, J., Carvajal, M., & Gaitán, A. M. (2004). Aspectos Toxicológicos Relacionados con la Utilización del Cromo en el Proceso Productivo de Curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia*, Vol. 52 No. 1.
- Tsvetkov, V. N., Vitovskaya, M. G., & Lyubina, S. Y. (1962). The Synthesis and Investigation of the Structure of Catalytic Poly-n-butylmethacrylate-II. The Optical Anisotropy of Poly-n-butylmethacrylate Stereoisomers. *Vysokomol. soyed.*, 4: No. 4, 577-582.
- UABDivulga. (2007). *Los metales y la formación de ligandos*. Obtenido de Universitat Autònoma de Barcelona:

<https://www.uab.cat/web?cid=1096481466568&pagename=UABDivulga%2FPage%2FTemplatePageDetallArticleInvestigar¶m1=1176360504632>

- UE. (2019). *Metales Pesados. Unión Europea. Contenidos Máximos en Metales Pesados en Productos*. Obtenido de <https://plaguicidas.comercio.gob.es/es-es/contaminates/MetalPesa.pdf>
- Ullah, R., Ahmad, W., Waqas Ahmad, M. Y., Khan, M., Khattak, M. I., Jan, B. M., . . . Kenanakis, G. (2021). Fabrication of MNPs/rGO/PMMA Composite for the Removal of Hazardous Cr(VI) from Tannery Wastewater through Batch and Continuous Mode Adsorption. *Materials*, 27 Págs.
- Xu, W., Mihhels, K., Kotov, N., Lepikko, S., Ras, R. H., Johnson, C. M., . . . Kontturi, E. (2022). Solid-state polymer adsorption for surface modification: The role of molecular weight. *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 605, January 2022, Pages 441-450.
- Yallonardo, A. B. (2005). *Influencia del Método de Polimerización en las Propiedades Físicas de las Resinas para Restauraciones Provisionales Fijas*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Odontología.
- Yang, I.-K., & Hu, C.-C. (2006). Preparation and rheological characterization of poly(n-butyl methacrylate)/montmorillonite composites. *European Polymer Journal* 42 , 402–409.
- Zhao, R., Wang, B., Zhang, X., Lee, X., Chen, M., Feng, Q., & Chen, S. (2022). Insights into Cr(VI) removal mechanism in water by facile one-step pyrolysis prepared coal gangue-biochar composite. *Chemosphere*, Chemosphere 299 - 134334.

Apéndice A

Tablas de espectroscopía

Tablas de Espectroscopía



Absorciones IR para grupos funcionales representativos

Grupo funcional	Banda ^a	(cm ⁻¹)
Alcanos	C-H t	2950-2800
	CH ₂ d	~1465
	CH ₃ d	~1375
	CH ₂ d (4 ó más)	~720
Alquenos	=CH t	3100-3010
	C=C t (aislado)	1690-1630
	C=C t (conjugado)	1640-1610
	C-H d (en el plano)	1430-1290
	C-H d (monosustituído)	~990 y ~910
	C-H d (disustituído - E)	~970
	C-H d (disustituído - 1,1)	~890
	C-H d (disustituído - Z)	~700
	C-H d (trisustituído)	~815
Alquinos	C-H t (acetilénico)	~3300
	CC t (triple enlace)	~2150
	C-H d (acetilénico)	650-600
Aromáticos	C-H t	3020-3000
	C=C t	~1600 y ~1475
	C-H d (mono)	770-730 y 715-685
	C-H d (orto)	770-735
	C-H d (meta)	~880 y ~780 y ~690
	C-H d (para)	850-800

Alcoholes	O-H t	~3650 o 3400-3300
	C-O t	1260-1000
Éteres	C-O-C t (dialquil)	1300-1000
	C-O-C t (diaril)	~1250 y ~1120
Aldehídos	C-H t (aldehído)	~2850 y ~2750
	C=O t	~1725
Cetonas	C=O t	~1715
	C-C t	1300-1100
Ácidos carboxílicos	O-H t	3400-2400
	C=O t	1730-1700
	C-O t	1320-1210
	O-H d	1440-1400
Ésteres	C=O t	1750-1735
	C-C(O)-C t (acetatos)	1260-1230
	C-C(O)-C st (el resto)	1210-1160
Cloruros de ácidos	C=O t	1810-1775
	C-Cl st	730-550
Anhídridos	C=O t	1830-1800 y 1775-1740
	C-O t	1300-900
Aminas	N-H t	3500-3300
	N-H d	1640-1500
	C-N t (alquil)	1200-1025
	C-N t (aril)	1360-1250
	N-H d	~800
Amidas	N-H t	3500-3180
	C=O t	1680-1630
	N-H d	1640-1550
	N-H d (1°)	1570-1515

Haluros de alquilo	C-F t	1400-1000
	C-Cl t	785-540
	C-Br t	650-510
	C-I t	600-485
Nitrilos	C ₃ N t (triple enlace)	~2250
Isocianatos	-N=C=O t	~2270
Isotiocianatos	-N=C=S t	~2125
Iminas	R ₂ C=N-R t	1690-1640
Grupos nitro	-NO ₂ (alifáico)	1600-1530 y 1390-1300
	-NO ₂ (aromático)	1550-1490 y 1355-1315
Mercaptanos	S-H t	~2550
Sulfóxidos	S=O t	~1050
Sulfonas	S=O t	~1300 y ~1150
Sulfonatos	S=O t	~1350 y ~11750
	S-O t	1000-750
Fosfinas	P-H t	2320-2270
	PH d	1090-810
Óxidos de fosfina	P=O t	1210-1140



^a t = vibración de tensión; d = deformación

Fuente: (Recursos Educativos de Química Orgánica, 2002)

Apéndice B

Infografía

Evaluación de la eficiencia del uso de poli(butilmetacrilato) modificado con óxido férrico en la adsorción de iones cromo VI (dicromato) en una matriz acuosa

El sector industrial es generador de altos volúmenes de contaminación a nivel mundial afectando tanto el aire, el suelo y los cuerpos de agua, siendo esta última una de las preocupaciones más acuciantes para la supervivencia humana (Zhao, R et al, 2022)

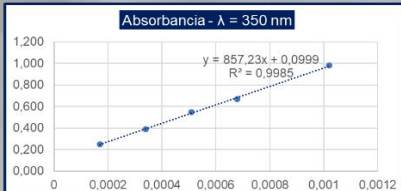
La contaminación de los cuerpos de agua generada por efluentes industriales es un problema ambiental muy significativo, entre muchas causas, por descarga de cromo hexavalente (Arauzo, Rivera, M., Noreña, & O., 2003)

Deben generarse soluciones acertadas desde la academia, el laboratorio, la literatura y la industria que impacten positivamente en la mitigación de la contaminación de las aguas producto de la descarga industrial de dicromatos.

Se propone Evaluar el uso de poli(butilmetacrilato) modificado con óxido férrico en la adsorción de iones (dicromato) presentes en disoluciones acuosas, bajo distintas condiciones en escenarios controlados de laboratorio


¿Pueden adsorberse dicromatos de forma eficiente por medio de procesos fisicoquímicos que involucren el uso de materiales poliméricos con base en metacrilato para su aplicación posterior y proyección al escalamiento industrial en el tratamiento de efluentes industriales?

El resultado: 44% de disminución de la absorbancia en soluciones sin modificación de pH y 80% de absorbancia en soluciones a pH ácido (2,17)




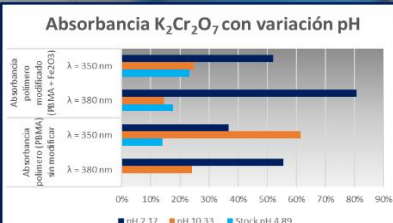
Curva de calibración λ = 350 nm

$y = 857.23x + 0.0999$
 $R^2 = 0.9985$



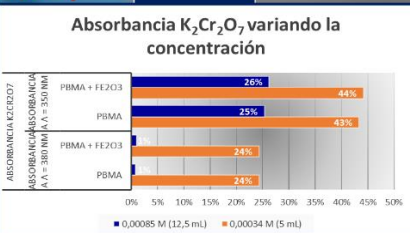
Factores experimentales: Concentración del analito y pH de la solución. Otros factores como la masa del sorbente (50 mg), tiempo de desorción (120 min), volumen de carga (5 mL) y agitación se establecieron como constantes






Absorbancia K₂Cr₂O₇ con variación pH

λ	pH 2,17	pH 10,33	Stock pH 4,89
λ = 350 nm	~55%	~25%	~25%
λ = 380 nm	~80%	~25%	~25%

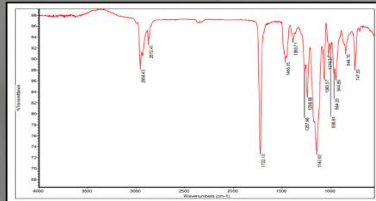


Absorbancia K₂Cr₂O₇ variando la concentración

Sorbente	0,00085 M (12,5 mL)	0,00034 M (5 mL)
PBMA + FE2O3	26%	44%
PBMA	25%	49%
PBMA + FE2O3 (sin modificar)	24%	24%
PBMA (sin modificar)	24%	24%



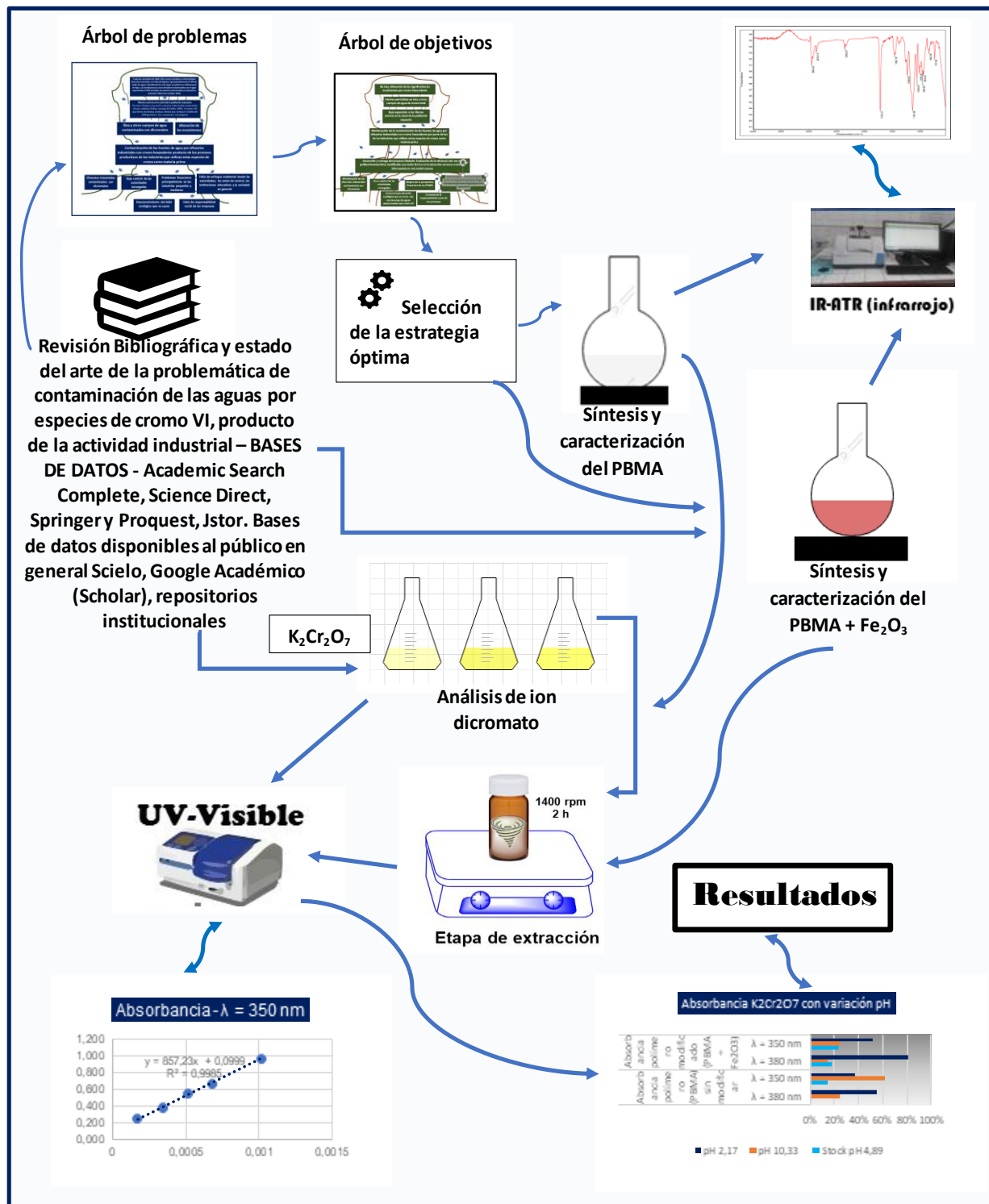
Por: Cielo Yadira Urquijo Sánchez



Fuente: autor

Apéndice C

Esquema general



Fuente: autor