

EL PROCESO FOTO-FENTON: UN ESCENARIO PARA EL ANÁLISIS DE  
PROCESOS DE MODELIZACIÓN EN LA FORMACIÓN CIENTÍFICA DE  
PROFESORES DE QUÍMICA MEDIANTE SITUACIONES EN CONTEXTO

JUAN CAMILO BARAHONA CAICEDO

OSCAR DANIEL GORDILLO CASTRO

Trabajo de grado para optar al título de Licenciado en Química

Director. Mg. Diego Alexander Blanco Martínez. Grupo  
Didáctica y sus ciencias. Línea: Interdisciplinariedad y química en contexto:  
Una perspectiva experimental en la didáctica de la química.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

BOGOTÁ, D.C, COLOMBIA

2025

## **Agradecimientos**

Agradecemos a la Universidad pedagógica nacional por brindarnos una oportunidad y un lugar donde cursar nuestros estudios de licenciatura, permitiéndonos construirnos como personas críticas y abriéndonos las puertas del conocimiento, la moral, el amor y la lucha por la verdad. A nuestro director de tesis que con su sabiduría nos guío y corrigió a lo largo del camino y a todos y cada uno de los profesores que, durante nuestro paso por la gloriosa educadora de educadores se convirtieron en un referente del cual aprender y en algunas ocasiones, desaprender.

### **Agradecimientos de Camilo:**

Agradezco principalmente a mis padres, abuelos y mi hermano, siendo fueron parte fundamental de este trabajo de grado y de mi paso por la universidad, pues el proyecto no es solo el resultado de meses de arduo trabajo sino de toda una carrera profesional en donde me apoyaron incondicionalmente y sobre todo cuando me encontraba sorteando los momentos más complejos y difíciles, también a mis amigas quienes me guiaron y aconsejaron en todo el transcurrir del proyecto y de mi vida estos últimos 5 años, pues creo firmemente que “un buen rodeado de buenos amigos”; a la universidad pedagógica por abrirme las puertas de un mundo desconocido y con orgullo poder llamarla mi alma máter; a mi pareja, quién se convirtió en un apoyo en este tiempo, animándome porque a pesar de las complejas situaciones siempre creyó en mí, deseándome lo mejor y alegrando mis días y finalmente a Daniel, mi gran amigo y ahora compañero en este trabajo de grado.

### **Agradecimientos de Daniel:**

En primera instancia, doy gracias a Dios, por permitirme la realización de este trabajo de grado, así como la culminación de la carrera; sin él puede que no haya podido tener las condiciones necesarias para continuar con el proceso de mi formación como licenciado en química.

En segundo lugar, a mis padres, por el apoyo que me brindaron durante el transcurso del tiempo, un tiempo valioso, tortuoso y de aprendizaje; por las enseñanzas que me brindaron no para la escuela, sino para la vida. De la misma manera, agradezco a todos mis familiares, en especial a mi hermano por, de alguna manera, estar ahí presente cuando necesité algo de él. En especial agradecimiento doy a mi perro, por ser quien me acompañó en aquellas noches tormentosas mientras me desvelaba culminando mis estudios.

En tercer lugar, doy gracias a todas aquellas personas quienes conocí a lo largo de estos 5 años, entre compañeros y amigos, quienes llegaron a ser partícipes en mi formación no sólo como licenciado, sino como persona; enfatizo más que a nadie a aquellos tres amigos con los que tuve la dicha de compartir, estudiar y crecer.

En cuarto lugar, doy gracias a todos aquellos docentes quienes participaron en mi formación, pues sin su guía, sin sus palabras y sin su docencia, no estaría en este momento culminando mis estudios de la manera en el que lo hago.

## Contenido

1.	INTRODUCCIÓN .....	7
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	8
3.	OBJETIVOS .....	10
3.1.	General.....	10
3.2.	Específicos .....	10
4.	JUSTIFICACIÓN .....	10
5.	ANTECEDENTES .....	12
6.	MARCO TEÓRICO.....	14
6.1.	FENOLES COMO CONTAMINANTES.....	14
6.2.	PROCESO FENTON.....	15
6.3.	PROCESO FOTO-FENTON .....	16
6.4.	FOTO-REACTOR .....	17
7.	MARCO METODOLÓGICO.....	19
7.1.	ENFOQUE DEL PROYECTO .....	19
7.2.	FASES.....	19
7.2.1.	FASE 1: Construcción del reactor fotocatalítico .....	21
7.2.2.	FASE 2: Estrategias de modelización de situaciones contextuales .....	22
7.2.3.	FASE 3: Modelización del fenómeno.....	27
8.	Fase de Análisis .....	30
8.1.	DISEÑO DEL FOTO REACTOR Y ANÁLISIS .....	30
8.2.	ANÁLISIS CINÉTICO DE LA DEGRADACIÓN DEL FENOL .....	36
8.3.	ANÁLISIS DEL INSTRUMENTO I.....	38
8.3.1.	Prueba de entrada y caracterización inicial de los modelos explicativos en estudiantes.....	39
8.4.	ANÁLISIS DEL PROCESO DE MODELIZACIÓN.....	69
8.4.1.	Rúbrica I - Diagnóstico de los Procesos de Modelización. ....	69
8.4.2.	Rúbrica II - Evaluación del Modelo Conceptual .....	80
9.	CONCLUSIONES .....	91
10.	REFERENCIAS.....	92
11.	ANEXOS .....	97

## Índice de Tablas

Tabla 1. ....	15
Tabla 2. ....	23
Tabla 3. ....	24
Tabla 4. ....	25
Tabla 5. ....	26
Tabla 6. ....	26
Tabla 7. ....	28
Tabla 8. ....	30
Tabla 9. ....	30
Tabla 10. ....	33
Tabla 11. ....	34
Tabla 12. ....	36
Tabla 13. ....	38
Tabla 14. ....	46
Tabla 15. ....	48
Tabla 16. ....	51
Tabla 17. ....	53
Tabla 18. ....	60
Tabla 19. ....	61
Tabla 20. ....	66
Tabla 21. ....	68
Tabla 22. ....	70
Tabla 23. ....	70
Tabla 24. ....	71
Tabla 25. ....	72
Tabla 26. ....	74
Tabla 27. ....	76
Tabla 28. ....	77
Tabla 29. ....	79
Tabla 30. ....	81
Tabla 31. ....	81
Tabla 32. ....	81

Tabla 33. ....	83
Tabla 34. ....	85
Tabla 35. ....	87
Tabla 36. ....	88
Tabla 37. ....	90

## Índice de Figuras

Figura 1. ....	18
Figura 2. ....	19
Figura 3. ....	20
Figura 4. ....	21
Figura 5. ....	31
Figura 6. ....	33
Figura 7. ....	33
Figura 8. ....	34
Figura 9. ....	35
Figura 10. ....	35
Figura 11. ....	36
Figura 12. ....	37
Figura 13. ....	37
Figura 14. ....	38
Figura 15. ....	39
Figura 16. ....	40
Figura 17. ....	43
Figura 18. ....	44
Figura 19. ....	45
Figura 20. ....	47
Figura 21. ....	47
Figura 22. ....	49
Figura 23. ....	52
Figura 24. ....	52
Figura 25. ....	55
Figura 26. ....	55

Figura 27.....	56
Figura 28.....	57
Figura 29.....	58
Figura 30.....	62
Figura 31.....	62
Figura 32.....	63
Figura 33.....	64
Figura 34.....	65
Figura 35.....	66
Figura 36.....	67
Figura 37.....	69
Figura 38.....	72
Figura 39.....	73
Figura 40.....	75
Figura 41.....	76
Figura 42.....	78
Figura 43.....	79
Figura 44.....	82
Figura 45.....	84
Figura 46.....	86
Figura 47.....	87
Figura 48.....	89
Figura 49.....	90

## 1. INTRODUCCIÓN

La modelización refiere al diseño de modelos de enseñanza que tienen como objetivo realizar un solapamiento de la teoría en la realidad, permitiendo al docente realizar un análisis profundo de la práctica pedagógica y didáctica, mejorando así los procesos comunicativos que resultan indispensables a la hora de enseñar y que contribuyen al desarrollo de habilidades en los estudiantes (Abella-Peña, 2022). Algunos autores como Caamaño (2018) desarrollan la idea de química contextualizada, donde existe un mediador entre la ciencia y el estudiante que es por supuesto, el contexto, este nos permite relacionar la ciencia con la vida cotidiana del estudiante, haciéndola más atractiva por su cercanía con los contextos sociales, culturales, políticos y familiares donde este participa; de esta manera, la química en contexto sedimenta sus bases en el aprendizaje situado y para este caso representa el enfoque didáctico preciso, ateniendo las problemáticas ambientales actuales al incorporar técnicas orientadas a procesos de descontaminación del agua; en específico, el uso de una técnica oxidativa moderna mayormente empleada en la Unión Europea, que corresponde a los tratamientos más avanzados en las plantas de tratamiento de aguas (PTAR), así como lo refiere (Jurik et al., 2024), el proceso foto-fenton permite el rehúso del agua degradando sustancias tóxicas como el fenol por medio de algunos procesos oxidativos.

Los procesos oxidativos y en específico los que corresponden a oxidación avanzada representan una alternativa viable para la degradación de compuestos contaminantes en aguas, siendo esta una problemática que aqueja al mundo en la actualidad; en este caso, el proceso Fenton clasificado como de oxidación avanzada que se fundamenta en una reacción química entre el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y el iones ferroso ( $Fe^{2+}$ ), generalmente catalizados por diferentes factores como la radiación UV, han sido referenciados en diferentes investigaciones como un método viable para la eliminación de agentes contaminantes en el agua.

En ese sentido, a través del trabajo de investigación que se centró en la caracterización de los modelos explicativos que construyen un grupo de profesores en formación de Licenciatura en Química al abordar situaciones relacionadas con el proceso foto-Fenton se configuró el siguiente documento que contiene cinco secciones o capítulos. En el primer capítulo se aborda, el problema de investigación, relacionado con los modelos explicativos, el discurso químico y la necesidad de utilizar enfoques integrales en la enseñanza de la química; además de la formulación de la pregunta problema, los objetivos de investigación y la justificación desde el aporte a las líneas de investigación, permitiendo identificar el objeto de estudio. En el segundo capítulo se describen los antecedentes del problema; donde se evidencia que no existen investigaciones que relacionen todas las variables de interés de esta investigación, sin embargo, se plantean antecedentes desde los modelos explicativos, la estructura lógica de la química, la enseñanza de nanopartículas y el uso de la metodología ABP para la enseñanza de las ciencias; además del marco referencial, donde se exponen los modelos explicativos, las dimensiones y niveles conceptuales propuestos por Jensen (1998) para establecer una estructura lógica en la enseñanza de la química; la definición, síntesis, caracterización y

actividad antimicrobiana de nanopartículas de especies cobre, encontradas en la literatura y las características del ABP.

El tercer capítulo describe el marco metodológico, es decir, el tipo y enfoque que rige el proceso de investigación, además de las fases de investigación, los participantes, los instrumentos de recolección de datos y las rúbricas de análisis de estos. Para el desarrollo de la presente investigación se propuso un enfoque metodológico de tipo cualitativo, el cual se desarrolló en cuatro fases de investigación: 1) planeación; 2) caracterización de los participantes; 3) diseño y aplicación; 4) evaluación. Dentro de los instrumentos de recolección se diseñaron criterios de análisis a partir de los referentes conceptuales asociados a los modelos explicativos entre las dimensiones estructura/composición y energía a nivel molecular y eléctrico; además del uso de entrevistas semiestructuradas y la observación de las sesiones.

En el cuarto capítulo se describen los resultados y el análisis de estos, desde la prueba inicial, cada una de las actividades de la secuencia didáctica, la prueba final y la construcción de modelos explicativos. Finalmente, en el quinto capítulo se describen las conclusiones de la investigación cimentadas en los objetivos que orientaron este trabajo.

## **2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La enseñanza de las ciencias con la llegada de las nuevas tecnologías que han conFigurado un nuevo reto para los docentes que, cada vez más, parecen estancarse en metodologías que no propician el aprendizaje, convirtiéndose exclusivamente en un transmisor de conocimientos y técnicas (Arteaga et al., 2016), dejando a un lado esa labor característica, donde se promulga la búsqueda del conocimiento del estudiante facultándolo para su vida cotidiana, en los diversos espacios que esta comprende, impulsando, por ejemplo, la toma de decisiones fundamentadas y el pensamiento crítico, teniendo en cuenta la importancia de este porque constituye una habilidad fundamental en la resolución de problemáticas y desafíos del siglo XXI (Guaña, 2024)

Entendiendo que el ser humano está poniendo en peligro no solo la vida de su especie, sino, la del resto de seres vivos que conviven con él en el planeta tierra, al contaminar el agua, actividad que resulta potencialmente peligrosa al ser un foco de propagación de enfermedades según la organización mundial de la salud, OMS (2023), debido principalmente al impacto de las actividades humanas de tipo socioeconómico y a la emisión continua de residuos de fuentes móviles y fijas que en muchos casos resultan altamente contaminantes, convirtiéndose en un problema de salud pública; en particular, como lo menciona Urbina y Solano (2020) la contaminación de las fuentes hídricas provenientes de diferentes industrias como la farmacéutica generan contaminantes a través de residuos químicos correspondientes a la fabricación de medicamentos incluyendo la limpieza de máquinas y utensilios, para finalmente mezclarse con cuerpos de agua, esto es complicado y peligroso por varias razones, pues este tipo de aguas presentan variabilidad no solo en el tipo de contaminantes sino en la cantidad, que aun siendo baja al ser emitida constantemente a los cuerpos de agua genera un aumento en su concentración, presentando así un alto riesgo para los organismos acuáticos y

terrestres que consuman o vivan en aguas contaminadas, esto teniendo en cuenta que, se han encontrado trazas de medicamentos como el diclofenaco en lugares inhóspitos de la vida humana como la Antártida. Es así como, consecuencia de la diversidad de sustancias encontradas en las aguas residuales de las industrias farmacéuticas, que en algunos casos son desconocidas, se dificulta la aplicación de procesos de remoción, degradación y eliminación de los contaminantes, por ejemplo, los fenoles que son sustancias químicas altamente tóxicas y residuales generadas en el proceso de extracción (Ramos, 2006). De esta manera la educación ambiental debe según (Martínez, 2010) capacitar a los estudiantes de modo que estos asuman un rol participativo para la toma de decisiones fundamentadas, críticas y reflexivas a través de sus experiencias de aprendizaje promoviendo sus habilidades para resolver problemas que aquejan a su propia comunidad, considerando al ambiente no como una temática representativa exclusiva de la biología sino de las demás ramas del saber cómo la química, contribuyendo a la interdisciplinariedad en el aula de clase.

Los trabajos más recientes refieren a la existencia de soluciones para mitigar el impacto de los residuos por contaminantes orgánicos, como los compuestos fenólicos. Estas soluciones pueden ser por tratamientos convencionales o por tratamientos de oxidación avanzada como es el interés investigativo para este trabajo, el proceso foto-Fenton. Los procesos de adsorción, por ejemplo, con carbón activado, se fundamentan en la formación de una capa del adsorbato en la superficie de la fase adsorbente (Delgado, 2021). Estos residuos, pueden ser retirados mediante una desorción; sin embargo, se debe plantear la pregunta si ¿realmente llegan a eliminar residuos contaminantes? y ¿qué tratamiento puede hacerse para eliminar este subproducto de la descontaminación del agua? Por otro lado, los procesos oxidativos son cuestionados por la formación de sustancias no deseadas, o subproductos (Delgado, 2021); por lo que, se han desarrollado técnicas y métodos para evitar estas especies no deseadas, como en este caso el proceso Fenton, que representa una alternativa para la eliminación de contaminantes, como lo menciona Rakshit Ameta (2018), ya que no producen subproductos al oxidar la materia orgánica, o degradan la misma a un nivel en donde dejan de ser denominados contaminantes. La oxidación avanzada por medio del proceso foto-fenton es una técnica usada en países desarrollados de la Unión Europea; sin embargo, para América Latina es prácticamente desconocido en las PTAR, a pesar de su alta eficiencia, pues tiene la facilidad de atacar contaminantes fuertes incluso a muy bajas concentraciones, a diferencia de la técnica biológica de tratamiento, debido a que esta última es funcional solo en altas concentraciones, de una manera más concreta, el proceso foto-fenton es capaz de degradar contaminantes refractarios y esto resulta idóneo para dar una mirada diferente a los procesos de descontaminación que se imparten comúnmente en el aula.

Al estudiar situaciones relacionadas con el proceso foto-Fenton este puede convertirse en un ambiente educativo propicio para el desarrollo de procesos de modelización de las fases implicadas en este, orientado a la resolución de problemáticas ambientales que los profesores en formación de Licenciatura en Química deben abordar de manera integral e interdisciplinar, reconociendo las implicaciones didácticas asociadas a la enseñanza de temas de la química moderna. Asimismo, el aprendizaje se contextualiza dentro de la situación problema que conlleva el estudio de los enigmas entorno a esta, contribuyendo al proceso de aprendizaje

activo del estudiante; por ende, se logra romper la barrera de considerar el aprendizaje como una simple transmisión de conocimientos, a considerar el conocimiento como una entidad abstracta que se encuentra en la mente de los individuos (Caamaño, 2018)

Desde esta perspectiva, la pregunta de investigación que orientó este trabajo es ¿Cómo el abordaje de situaciones contextualizadas relacionadas con el proceso foto-Fenton mediante un enfoque de química en contexto contribuye en los procesos de modelización de un grupo profesores en formación de 7° semestre de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional?

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. General**

Analizar los procesos de modelización de un grupo de profesores en formación de 7° semestre de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, al abordar situaciones contextualizadas relacionadas con el proceso foto-Fenton mediante un enfoque de química en contexto.

#### **3.2. Específicos**

- Definir las condiciones óptimas en el diseño de un prototipo de reactor relacionado con el proceso foto-Fenton para delimitar el componente conceptual y metodológico que articula las situaciones en contexto.
- Caracterizar los modelos explicativos que construyen un grupo de profesores en formación cuando analizan una situación contextualizada relacionada con los procesos de oxidación avanzada de compuestos fenólicos.
- Determinar los procesos de modelización que construyen un grupo de profesores en formación al implementar el proceso foto-Fenton en la degradación de fenol con el prototipo de reactor construido.

### **4. JUSTIFICACIÓN**

La concepción social que tienen los alumnos sobre las ciencias es realmente un factor determinante en el interés que demuestran para su comprensión, en disciplinas como la Física y Química pues según Solbes et al., (2007) alrededor del 70% de los alumnos creen que estas áreas no son solo excesivamente difíciles, sino también, que no aportan mucho para un futuro profesional pues no creen que se tenga éxito al estudiar algunas de estas áreas del conocimiento y sobre todo, piensan que estas no se relacionan con su vida cotidiana; por lo que, no tiene una importancia significativa para aprenderla además, la idea preconcebida que tienen es el gran impacto contaminante que produce desarrollar actividades científicas y su relación con el desarrollo bélico. Así, resulta imperante para los docentes en ciencias, ser el ente mediador entre el conocimiento y los estudiantes, sin dejar de un lado la relevancia de continuar enseñando esta ciencia y, por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta ¿Cómo enseñar ciencias significativamente? Evidentemente la respuesta a esta pregunta es compleja en varias dimensiones debido a que atañe a una larga discusión en torno a la razón de enseñar

ciencias, el concepto de ciencia y en particular, cómo hacerlo. En ese sentido, existe una gran cantidad de estudios, de hecho, toda una rama del conocimiento en ciencias acerca de metodologías y enfoques para enseñar ciencias, uno de ellos y ampliamente estudiado es la modelización

Los procesos de enseñanza-aprendizaje en ciencias han sido desarrollados desde diferentes enfoques, los cuales, han establecido sus metodologías con base en parámetros puntuales; entre estos, la química en contexto propone una visión de la ciencia relacionada con la vida cotidiana de los estudiantes, un aprendizaje situado (Caamaño, 2018). Los tres enfoques de la química en contexto que menciona Caamaño son: 1) A partir de los conceptos es posible interpretar y explicar el contexto; 2) El contexto permite desarrollar conceptos y modelos; 3) El contexto nos permite llegar a los conceptos y estos, a su vez explica nuevos contextos, para este proyecto se incorporó el segundo enfoque, aquel que parte del contexto para introducir y desarrollar los conceptos y modelos, teniendo en cuenta la aplicabilidad de este, pues será el contexto donde se desarrollan los estudiantes lo que nos permitirá que estos comprendan y desarrollen modelos. A su vez, los procesos de modelización situados bajo la mirada de la química en contexto contribuyen con el aprendizaje del estudiante en la medida en que explica el contexto conforme interpreta, caracteriza y analiza, pues como lo menciona Abella (2021) la caracterización de la modelización en estudiantes es de suma importancia, pues qué posibilita un acercamiento a la forma en que los estudiantes piensan, interpretan fenómenos y problemas científicos, así, el docente puede aproximarse a los aprendizajes que cobrarían importancia en la vida del estudiante; de esta manera, la química en contexto como enfoque didáctico proporciona elementos clave, vinculando los conceptos teóricos con la realidad del estudiante.

En el marco de los procesos de modelización mediados por la contextualización, las fuentes hídricas que sirven como punto de partida para desarrollar ambientes de aprendizaje situado, pues de esta manera la problematización del contexto podrá generar nuevos modelos (Caamaño, 2018) que son propuestos por los estudiantes en la búsqueda de una solución para combatir los residuos contaminantes. Por lo tanto, resulta imperante comprender las propuestas que se han centrado en la eliminación de los contaminantes, en mayor medida, mediante dos métodos: oxidación avanzada y por adsorción, métodos que hacen parte del tratamiento de aguas residuales; sin embargo, un proceso completo de degradación de sustancias requerirá de un conjunto de técnicas mayor, entre ellas las anteriormente mencionadas. Las técnicas por adsorción retiran el agente contaminante, aun manteniendo su identidad química, por lo que se debería construir otro sistema para eliminarlo o degradarlo. Con la oxidación avanzada, se llegan a generar subproductos, pero difieren según la técnica empleada. Si se utiliza el método Fenton, se pueden llegar a oxidar sustancias que, difícilmente son oxidables, como los compuestos orgánicos clorados (Méndez, R. et al, 2010), sin generar subproductos nocivos y/o contaminantes. Como alternativa, o complemento, se han llegado a realizar técnicas que adicionan parámetros fisicoquímicos al proceso Fenton: Foto-Fenton, electro-Fenton, sonoro-Fenton y electro-foto-Fenton. De entre las técnicas, se seleccionó para este trabajo el foto-Fenton debido a la facilidad de construir el sistema de degradación de sustancias orgánicas, y de la misma manera su bajo costo por

sobre las demás, lo que permitirá generar un entorno educativo que promueva el desarrollo de habilidades científicas para la interpretación, descripción y predicción de los mecanismos de interacción de las especies reactivas en el foto-reactor para la caracterización de los procesos de modelización que construyan los profesores en formación de Licenciatura en Química. Cabe mencionar que la muestra elegida para este proyecto ( profesores en formación de Licenciatura en Química de 7° semestre de la Universidad pedagógica Nacional) nace a partir de la revisión del pensum de la universidad pues en este semestre se encuentran en la fase de profundización y presuponiendo que poseen dominio y/o conocimiento de ciertas habilidades y conceptos teóricos como la cinética química requeridos para mejor entendimiento y desarrollo de los instrumentos propuestos.

## 5. ANTECEDENTES

En el presente trabajo de investigación los antecedentes involucrados citados en el cuadro son: Química en contexto, docentes en ciencias, modelización, proceso foto-Fenton, así, estos conceptos orientadores se tomaron en consideración para la búsqueda bibliográfica con relación a estudios acerca de la descontaminación de fuentes hídricas y los estudios de caso acerca de la modelización en escuelas ; debe mencionarse que no se encontraron registros de trabajos donde las temáticas tratadas se relacionen, sin embargo, se hará referencia a los artículos que se acercan lo más posible a los ejes investigativos ya mencionados anteriormente.

Título del artículo	Con relación al proceso Foto-Fenton Autor(es)	Descripción
ELIMINACIÓN DE NANOPLÁSTICOS MEDIANTE EL PROCESO FOTO-FENTON	Jorge García Martín	Discute el alcance de los procesos de oxidación avanzada, en específico, el proceso foto-Fenton a su relativa fácil implementación y bajos costes. Se encontró que el proceso foto-Fenton comparado con otros procesos de oxidación avanzada (POAs) que solo empleaban radiación de tipo UV-C y peróxido de hidrógeno (UV-C/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) resultó ser el más eficaz comprendiendo una remoción del 70% de plásticos y más del 79% en la mineralización de los mismos. En esta investigación también fue posible entrever la eliminación de microorganismos patógenos presentes en aguas, pues, el proceso foto-Fenton también refiere una gran capacidad para eliminar la carga microbiológica de aguas contaminadas. De este modo se exponen algunas de las bondades de la implementación del mencionado proceso en el tratamiento de aguas residuales, así como se sugiere a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) la implementación de un tratamiento terciario mediado por el proceso foto-Fenton para la eliminación de nanoplasticos y microorganismos patógenos.
PROCESO FENTON y FOTOFENTON PARA LA REMOCIÓN DE FENOLES DE EFLUENTES GENERADOS DE UNA PLANTA DE CELULOSA KRAFT	Alejandro Enrique Muñoz Satibañez	Se evaluaron en escala de laboratorio las alternativas presentes al tratamiento de aguas provenientes de efluentes permitiendo así la degradación de compuestos fenólicos y coloreados, de esta manera describe los proceso de oxidación avanzada como una buena alternativa para la degradación de sustancias contaminantes

APLICACIÓN DEL FOTOFENTON VIS PARA  
LA REMOCIÓN DE SULFUROS y DQO EN  
AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRE

Rafael Nikolay Agudelo  
Valencia  
Diana Paola Ovalle  
González  
Luis Felipe Rodriguez  
Rodriguez

presentes en agua. La degradación de compuestos  
fenólicos fue posible y alcanzó un alto umbral,  
también mencionó que al usar altas  
concentraciones iniciales del ion Fe (II) la  
coloración final sería proporcional; es decir, a  
mayor concentración mayor coloración y esto es  
posible argumentarlo debido a la formación mayor  
o menos de compuestos férricos luego del proceso.  
Finalmente aclara que el proceso foto-Fenton es  
efectivo para la degradación de compuestos  
fenólicos en cortos periodos de exposición al  
proceso

La producción de cueros es una actividad  
altamente demandante para los cuerpos de agua  
que se encuentren cercanos a las industrias donde  
se realizan estas actividades, puesto que se vierten  
altas cargas de contaminantes que pueden afectar  
la vida de los seres vivos que habiten o consuman  
de dicha agua. Se pretende eliminar los  
compuestos contaminantes por medio del proceso  
foto-Fenton, por medio de un reactor artesanal se  
inició el proceso y se evidenció que hubo una  
degradación del 73% de los sulfuros presentes y  
una remoción del 56% correspondiente a la  
concentración de DQO. Finalmente describen la  
importancia e injerencia del pH al realizar este tipo  
de proceso de oxidación avanzada

### Con relación a la Modelización

APORTES A LA MODELIZACIÓN SEGÚN EL  
CAMBIO QUÍMICO

Mercé Izquierdo, *et al*

Realiza una serie de estudios según unos campos  
que traza: fenomenologías, perfiles conceptuales,  
influencia del contexto, análisis del discurso del  
aula, y conocimiento pedagógico del contenido;  
enmarcados en la construcción de una actividad  
científica escolar para investigar cómo los  
estudiantes realizan procesos de modelización.  
Para esto, los investigadores decidieron emplear  
una serie de instrumentos, como la realización de  
experimentos y elaboración de maquetas, para  
efectuar una serie de actividades en donde el  
estudiante debe representar (y en últimas  
instancias modelizar) el fenómeno químico del  
pirólisis de la madera según los experimentos lo  
mostraban. Se encontró que, a pesar de que se  
intentaba dar una cierta parametrización y  
modelización, no se logró, por lo que simplemente  
llegó a una representación.

Su aporte permitió evidenciar cómo a pesar de  
tener una estructura sólida en la metodología, se  
podían llegar a resultados no esperados al  
intervenir variables propias del estudiante, por lo  
que es crucial para la investigación tener presente  
que nada asegura un resultado ideal.

**Diego Aristóbulo, et al (2016)** en su trabajo de  
grado de magister titulado “la disolución como  
concepto estructurante en química una estrategia  
didáctica centrada en la modelización”, ejecuta  
una estrategia didáctica, en donde por medio de  
pruebas de ideas previas, ejercicios de secuencia  
de modelización y prácticas de laboratorio, logra  
efectuar un cambio en la manera cómo los  
estudiantes observan y analizan el fenómeno de la  
disolución.

LA DISOLUCIÓN COMO CONCEPTO  
ESTRUCTURANTE EN QUÍMICA UNA  
ESTRATEGIA DIDÁCTICA CENTRADA EN  
LA MODELIZACIÓN

Diego Aristóbulo, *et al*

Su aporte se enfoca en connotar el desarrollo  
secuencial que se tuvo en la investigación, ya que  
este permite dar cuenta del proceso que tuvieron  
los estudiantes para, al final, evidenciar la  
evolución respecto a sus niveles de competencia y

conceptualización del componente químico al realizar los procesos de modelización.

### Frente a la Formación de Docentes en Ciencias

TRES ELEMENTOS FUNDAMENTALES EN LA FORMACIÓN DE DOCENTES DE CIENCIAS

Vicente Talanquer

Da a entrever tres ejes o “áreas críticas en la formación docente”: la conceptualización de la disciplina como forma productiva de pensar y actuar sobre el mundo; la habilidad para seleccionar y/o diseñar tareas instruccionales retadoras; la capacidad de implementar tareas instruccionales de manera responsable, desde un modelo de evaluación formativa.

Su aporte se dio debido a que estos ejes se ejecutan desde una formación de maestros, para así lograr una construcción de argumentos que respalden aquellos modelos propuestos como parte de una investigación.

### Con respecto a la Química en Contexto

CARACTERIZACIÓN DE HABILIDADES DE PENSAMIENTO CRÍTICO MEDIADAS POR LA QUÍMICA EN CONTEXTO EN RELACIÓN CON LA ADSORCIÓN DE  $Hg^{2+}$  SOBRE  $\alpha-Fe_2O_3$ -NANO SOPORTADAS EN MATRIZ BIOPOLIMÉRICA.

Giovanni Andrés Pérez Cortés  
Charlinne Valeria Pérez Nahar

La investigación se centró en la caracterización de habilidades de pensamiento crítico, en interpretación y análisis en un grupo de profesores en formación, abordando problemáticas de contaminación del agua con mercurio y su remoción a través de nanopartículas de hematita en matriz biopolimérica; todo esto enmarcado en el enfoque de química en contexto. Se demostró que la implementación de actividades experimentales contextualizadas facilitó la comprensión de conceptos químicos y promovió el análisis crítico y la interpretación entre los estudiantes.

Su aporte se dio en la medida en cómo el enfoque permitió cambios significativos en las habilidades de análisis y una notable mejora en la capacidad de interpretación, ya que se motivó a los estudiantes a ver la química como un componente integral de su vida cotidiana.

## 6. MARCO TEÓRICO

Al requerirse un sustento conceptual para darle fundamentos teóricos al trabajo de investigación, se presentan los conceptos relacionados a la enseñanza de las ciencias y la propia disciplina. Esto con el fin de sentar las bases teóricas desde donde se partirá para el desarrollo de la investigación y, de esta manera, se sustente la metodología propuesta y el análisis de los datos obtenidos.

### 6.1. FENOLES COMO CONTAMINANTES

Dentro de los agentes contaminantes hídricos, se encuentran los fenoles, sustancias que llegan a alterar las propiedades organolépticas del agua y ser nocivos para la salud (OMS, 1994), además, de ser un cristal altamente tóxico y nivel 3 de cancerígeno por la OMS (Zong, et al, 2024); por ende, es de interés investigativo buscar alternativas para su remoción. En el contexto del trabajo, se opta por su degradación por medio de procesos de oxidación avanzada y fotocatalisis, para lo cual, el interés químico es el proceso foto-Fenton.

Se han encontrado en varias investigaciones y trabajos de grado referentes a este caso (Rubiano, et al, 2005; Moreno, et al, 1992; Forero, et al, 2005; Rodriguez, 2019) que es posible realizar una remoción del agente contaminante en mayor o menor medida dependiendo del método que se esté empleando. Para esto, se encontró que de los mejores

métodos está el foto-Fenton, ya que no sólo degrada la sustancia, sino que tiene una gran eficacia en un corto tiempo, baja toxicidad y amigable con el medio ambiente (Zong, et al, 2024).

## 6.2. PROCESO FENTON

La reacción de Fenton fue elaborada por H. Fenton en 1894, describiendo cómo el gran potencial oxidativo de la molécula  $H_2O_2$ , cuando el hierro es usado como catalizador en condiciones ácidas, llega a efectuar una serie de reacciones de interés investigativo. Las reacciones involucradas en el proceso Fenton están descritas por Haber y Willstätter, 1931 (como se citó en Ameta, et al, 2018) y son las siguientes:



Este proceso llega a oxidar el contaminante orgánico presente en la muestra, por lo que su aplicación en procesos de descontaminación del agua es viable (Vermilyea; Voelker, 2009); sin embargo, la producción de intermediarios que ralentizan el proceso perjudica la viabilidad, en consecuencia, se han propuesto diversas alternativas agregando otros parámetros al método, como radiación UV, corriente eléctrica, y sonido. De esta manera, actualmente se trabajan técnicas de diferentes naturalezas (Tabla 1), como el electro-Fenton, sonoro-Fenton, y foto-Fenton, este último siendo el método de degradación de agentes contaminantes orgánicos escogido como aquel en donde está presente el fenómeno de oxidación avanzada.

### Tabla 1.

*Diferentes tipos de procesos que liberan el radical hidroxilo.*

Processes of free radical generation <sup>a</sup>	Type of external energy supply <sup>b</sup>					
	Without	Solar irradiation	UV lamp irradiation	Cavitation	Heat/pressure	Ionizing irradiation
<i>Homogeneous oxidant type addition</i>						
No addition			V-UV irradiation	Acoustic cavitation Hydrodynamic cavitation		Electron beam
Ozone	Ozonation		UV/cavitation O <sub>3</sub> /UV	O <sub>3</sub> /cavitation	Pressurized ozonation	
Hydrogen peroxide			H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /cavitation		
Combined oxidants	Fenton H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub>	Photo-Fenton	Photo-Fenton H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> /UV	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> /cavitation		
<i>Heterogeneous oxidant type addition</i>						
No addition	Zero valent Fe Fe- $\gamma$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub> /solar	TiO <sub>2</sub> /UV	UV/cavitation		Cu (Loprox) Cu (wet air oxidation)
Ozone	O <sub>3</sub> /activated carbon	O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> /solar		UV/cavitation/ ozone		
Hydrogen peroxide	het. <sup>c</sup> Fenton H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /activated carbon H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /transient metal	Het. photo-Fenton	Het. photo-Fenton		OMP process	

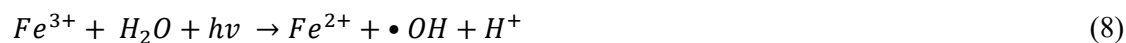
Nota. Elaboración propia a partir de Sievers, M. (2011)

### 6.3. PROCESO FOTO-FENTON

El proceso Fenton tiene la particularidad de presentar ciertas deficiencias, al producirse Fe<sup>3+</sup> y ralentizar el proceso, se propone una reacción fotoquímica mediante el método foto-Fenton para regenerar el Fe<sup>2+</sup> e hidroxilo y así, convertir parte del sistema en uno cíclico; todo esto a modo general según la siguiente ecuación química planteada por Abad y Toro (2013).



Además, la combinación del peróxido de hidrógeno y la radiación Ultravioleta (UV) con los iones Fe<sup>2+</sup> o Fe<sup>3+</sup> produce más radicales hidroxilos, en consecuencia, aumenta la tasa de degradación de compuestos orgánicos (Ameta, 2018). La regeneración fotoquímica del ion Fe<sup>2+</sup> por fotoreducción del ion Fe<sup>3+</sup> ocurre en la reacción del proceso foto-Fenton dadas por las siguientes ecuaciones químicas propuestas por Ameta (2018)



A su vez, estudios realizados por Kavitha y Palanivelu (2004) demuestran la efectividad del método foto-Fenton por medio de radiación UV para degradar fenoles, concluyendo que la eficiencia de degradación es mayor cuando se emplea radiación UV específica por sobre la radiación solar.

De esta manera, y para que se efectúe el estudio de las reacciones que ocurren en el proceso foto-Fenton, es necesaria la construcción de un fotoreactor, ya que, en este, se presenta la

regeneración fotocatalítica del ion  $\text{Fe}^{2+}$  usando generalmente una lámpara de mercurio, cuya longitud de onda que emite coincide con la longitud de onda necesaria para que ocurra la foto-reducción. Este foto-reactor es, en consecuencia, el instrumento necesario para el estudio de los fenómenos involucrados, y, por ende, es necesario su uso para demostrar el efecto que produce las reacciones del proceso Fenton y foto-Fenton para la degradación de fenoles.

Las investigaciones llevadas a cabo sobre el proceso Fenton, y sus respectivas variantes, han permitido concretar un eje investigativo en la química. Su articulación con la problemática ambiental es posible en tanto estas investigaciones han sido estudiadas y aplicadas para degradar agentes contaminantes, presentes en afluentes producto de residuos de diferentes industrias, por ende, se han venido desarrollando e investigando métodos y procesos cuya eficiencia sea mucho mayor al degradar la sustancia problema. Del mismo modo, la construcción de los equipos ha estado guiada por diferentes variables, en este caso el proceso foto-Fenton, la investigación se guía, bajo este eje investigativo del ámbito de la química, por la construcción de un foto-reactor.

#### **6.4. FOTO-REACTOR**

El foto-reactor es un instrumento ampliamente usado en las reacciones fotoredox, de modo que, a partir de este se proporciona un medio integral capaz de llevar a cabo las reacciones necesarias catalizadas de manera estable y reproducible. Así, las reacciones ocurridas y su eficiencia estarán relacionadas con la cantidad de luz emitida por el fotoreactor, aunque como lo menciona Marti et al. (2022) los diseños de reactores no pueden garantizar que la luz recibida por cada una de las muestras sea la misma, por lo tanto, es necesario aplicar diferentes pruebas si la muestra va a variar. También se mencionan algunos parámetros necesarios para el diseño y construcción de un fotoreactor, como lo son: la temperatura, la longitud de onda, el medio químico, una correcta homogeneización, etc.

Un fotoreactor, comprendido como un equipo dedicado al tratamiento de la molécula contaminante mediante la fotocatalisis de un catalizador (Shivappa y Kumar, 2020). El proceso fotocatalítico puede llevarse a cabo simplemente usando una suspensión fina de partículas del material semiconductor sólido dispersas en la fase líquida de un reactor irradiado con radiación, sea directa o indirectamente (Saharan et al, 2014). La dispersión adecuada del catalizador en la fase líquida puede efectuarse mediante agitadores mecánicos o magnéticos, por lo general se mantiene una aireación para eliminar los electrones (provenientes de radicales  $\text{HO}_2^{\cdot}$ ) y evitar la recombinación de carga electrón/hueco, contribuyendo a la dispersión del catalizador (Saharan et al, 2014).

Para Saharan et al, (2014), en el proceso de construcción de un fotoreactor es importante tener en cuenta seis parámetros clave:

##### **Cantidad de catalizador**

Se debe usar una concentración óptima de catalizador, ya que el exceso de catalizador reduce la cantidad de <<foto-energía>> transferida en el medio debido a la opacidad de las propias partículas. Es importante que se definan las condiciones óptimas en ensayos de laboratorio previos, ya que dependerán en gran parte del tipo, la concentración del contaminante, y la

tasa de generación de radicales libres. Shivappa y Kumar, (2020) mencionan haber realizado los ensayos a concentraciones del ion  $\text{Fe}^{2+}$  a 10 ppm, obteniendo porcentajes de degradación bastante altos. Por su parte, Rubio-Clemente et al. (2014) plantea una relación 1:10 entre el Sulfato de Hierro y el Peróxido de Hidrógeno.

### Cantidad de agente oxidante

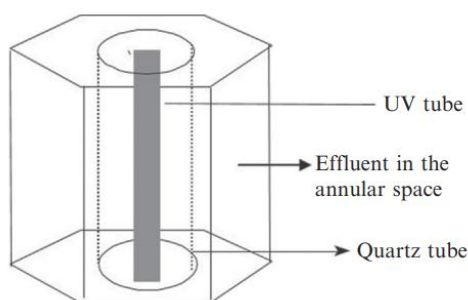
En los reactores basados en la oxidación avanzada, se utiliza ozono o peróxido de hidrógeno para oxidar la materia orgánica (Sievers, 2011). El agente oxidante es el encargado de oxidar o degradar la sustancia orgánica, para lo cual se emplea generalmente  $\text{H}_2\text{O}_2$  debido a que es comercialmente disponible, térmicamente estable y con una capacidad de almacenamiento in situ aceptable. El peróxido tiene la particularidad de ser, tanto oxidante como reductor  $E^\circ = -0,7 \text{ V}$  (Sievers, 2011), y tiene ventaja en comparación del ozono al no tener la limitación de su solubilidad en agua. Lo importante, y relevante de esta molécula, radica en su capacidad de generar radicales hidroxilo mediante la radiación de luz UV. Para el diseño del fotocatalizador, se busca que la longitud de onda ( $\lambda$ ) sea a 253,7 nm, debido al alto coeficiente de absorción molar del anión peróxido (Glaze et al., 1987).

### Diseño del reactor

Usualmente, los diseños de los reactores deben garantizar una irradiación uniforme de toda la superficie del catalizador con la intensidad y longitud de la luz incidente. Se busca con este diseño la constante exposición a la mayor cantidad de catalizador activo posible entre la superficie iluminada. Un ejemplo de ello presenta la Figura 1, la cual muestra cómo la radiación de luz UV ocurre por medio de un tubo de cuarzo (material que no absorbe en el espectro UV) hacia la matriz o fuente de agua con la sustancia a tratar.

#### Figura 1.

*Diseño de un foto-reactor de forma hexagonal.*



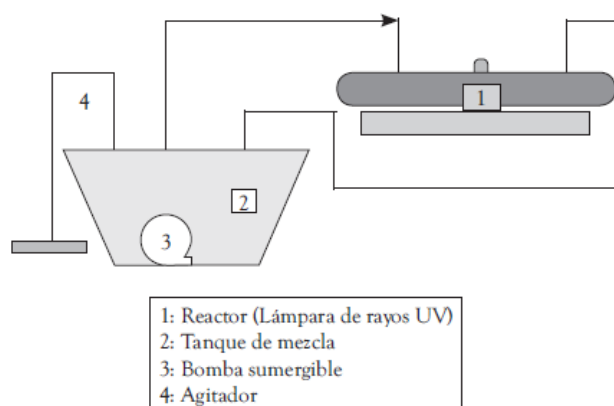
*Nota.* Adaptado de Saharan et al, (2014)

Otros diseños del foto-reactor (descrito por Silva, et al. 2009) constan de dos partes. La irradiación de la luz se realizó mediante una lámpara de mercurio de baja presión Atlantic Ultraviolet®, la cual está rodeada por una carcasa de acero inoxidable, con una entrada y salida de agua; La lámpara tiene una radiación UV monocromática a una longitud de onda de 254 nm. Además, el sistema incluye un tanque de almacenamiento, una bomba de recirculación sumergible y un sistema de agitación para garantizar la homogeneización de la

muestra. En la Figura 2 se observa el diagrama de flujo que diseñaron para ejemplificar el diseño experimental.

### Figura 2.

*Diseño del esquema del foto-reactor.*



*Nota.* Tomada de Silva, et al. (2009)

## 7. MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación se desarrolló en el marco del grupo Didáctica y sus Ciencias, en la línea de investigación de Interdisciplinariedad y química en contexto: Una perspectiva experimental en la didáctica de la química del departamento de química de la Universidad Pedagógica Nacional, de tal forma que se propuso integrar los problemas ambientales en contextos de problemas didácticos bajo un enfoque de química en contexto, para el análisis de procesos de modelización. En este sentido, se plantean 3 fases, en correlación con las etapas que describe Caamaño (2011) para contribuir a los estudiantes a modelizar un fenómeno.

### 7.1. ENFOQUE DEL PROYECTO

El proyecto contará con un enfoque cualitativo, ya que se pretende dar una mirada del problema tanto objetiva, como subjetiva; por ende, no se puede catalogar como cuantitativo o cualitativo. Además, según las categorizaciones hechas por Hernández y Mendoza (2018) se piensa más desde una mirada de las subcategorías, un enfoque cuantitativo mixto. Correspondiendo con este enfoque, el paradigma que subyace la investigación será el pragmatismo.

La categoría del análisis es el proceso de modelización. Los niveles de análisis son: nivel 1 el tipo de modelización explicativa que emplean los profesores en formación de Licenciatura en Química; el nivel 2 la calidad de los modelos que construyen a partir del proceso Foto-Fenton. Las unidades de análisis son: el modelo que propone el profesor en formación, y el proceso de modelización que se identifica.

### 7.2. FASES

En primera instancia, se formuló y planteó el problema, en conjunto con las implicaciones frente a una problemática clave: la contaminación de los cuerpos hídricos por fenoles. Como primera fase, justamente se ahondó en la problemática y se integraron trabajos de investigación claves que sirvieron como antecedentes al proyecto de investigación. Se estructuró la propuesta con base en dos ejes, por un lado, el componente disciplinar fue un diseño de fotoreactor capaz de degradar los fenoles presentes en el agua, y por otro lado el componente didáctico fue la modelización, o proceso de modelización que efectúa el grupo de profesores en formación de Licenciatura en Química. Esto conformó el planteamiento inicial y sentó las bases de la investigación.

Como segunda fase, se realizó a modo de implementación todas las actividades planteadas. Esta fase se divide en tres fases a su vez, cada una correspondiendo a un momento de la investigación. En la primera fase de la implementación, se desarrolló el prototipo de fotoreactor, en la segunda se caracterizaron los modelos explicativos que implementaba el grupo a la hora de presentarse una situación contextual; por último, en la tercera fase, se determinaron los procesos de modelización que efectuaron los estudiantes al realizar una práctica de laboratorio empleando el prototipo de fotoreactor diseñado.

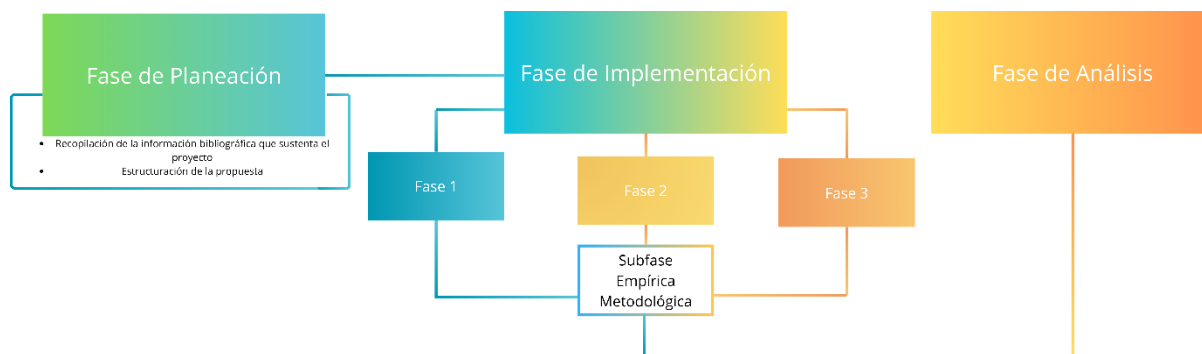
Dadas las características del proyecto, los participantes fueron aquellos que tenían conocimientos previos de reacciones REDOX y procesos de fotocatalisis, incluyendo ser estudiantes de algún programa formativo de docentes de ciencias, para lo cual se escoge como participantes a los estudiantes del espacio académico Sistemas Físicoquímicos II, materia orientada a verse en 7° semestre del actual pénsum del programa Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional.

En la tercera y última fase, se realizó la recopilación de los datos obtenidos mediante la fase 2, y se realizaron los respectivos análisis e interpretaciones de acuerdo con la bibliografía. Se empleó una rúbrica diseñada para las dos últimas fases de la implementación, cumpliendo el objetivo del instrumento en conformidad con lo establecido por esa fase; si se caracterizó o si se determinó algo en específico. Además, se realizó una representación gráfica a modo de árbol para ejemplificar el nivel de profundidad de acuerdo con los parámetros que establece cada rúbrica.

Dado lo anterior, y a modo de ejemplificación, se expone un esquema general de las fases que componen la investigación. Este marco metodológico ha sido construido con base en las diferentes propuestas planteadas por Hernández y Mendoza (2018), del cual se hace énfasis en el diseño explicativo secuencial. La metodología se plantea y describe en la Figura 3. siendo un esquema adaptado del propuesto por Hernández y Mendoza (2018):

### **Figura 3.**

*Esquema de fases*



*Nota.* Elaboración propia.

### 7.2.1. FASE 1: Construcción del reactor fotocatalítico

Esta fase se basa en el diseño del prototipo de reactor fotocatalítico, determinando sus condiciones óptimas para comprenderlas y determinar su reproducibilidad, teniendo en cuenta el componente conceptual y metodológico para las situaciones contextuales que se presentó a los 6 profesores en formación de Licenciatura en Química; caracterizando su funcionalidad en correlación con la eficiencia al degradar los compuestos fenólicos, y un estudio cinético de la degradación.

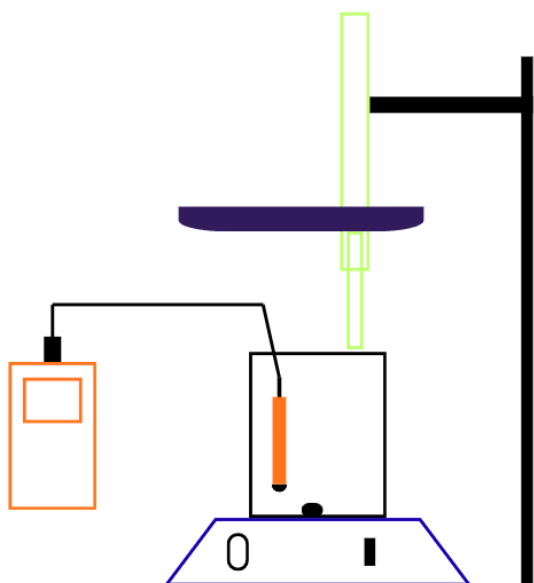
El prototipo de reactor fotocatalítico, o fotoreactor, está fundamentado conceptualmente bajo el proceso foto-Fenton para la degradación de fenoles presentes en aguas residuales, lo cual ha sido descrito en el Marco Teórico.

#### 7.2.1.1. Subfase Metodológica

El fotoreactor fue diseñado bajo una estructura que sigue las indicaciones de lo expuesto en las subfase conceptual, pero teniendo variaciones conforme se debía adaptar a los materiales y equipos que dispuso la universidad. En general, en la Figura 4, se muestra cómo se diseñó el fotoreactor, para lo cual se tuvo en cuenta las siguientes características.

#### Figura 4.

*Diseño experimental del foto-reactor.*



*Nota.* Elaboración propia

- Tanque de mezcla (color negro): Se empleó un Beaker de 400 mL para contener las diferentes soluciones. Es el medio en donde ocurre la oxidación avanzada y la fotocatalisis del  $\text{Fe}^{3+}$  al ser colocado bajo la radiación de la lámpara UV
- Dosificador de peróxido (color verde): Se utilizó una bureta de 50 mL con goteo constante de peróxido, aproximadamente 1 gota cada 3 segundos
- Agitador magnético (color azul): La mezcla siempre debe estar en constante agitación para garantizar una homogeneidad
- Potenciómetro (color naranja): Se midió en cada momento del experimento el pH de la mezcla para corroborar que se encuentre en los valores establecidos (cerca de 3)
- Lámpara UV (color violeta): Se empleó una lámpara UV libre de ozono que emite una luz a la longitud de onda de 253.7 nm a 8 watts de potencia

Cabe mencionar que el montaje experimental del reactor debe estar siempre sin recibir luz directa, de hecho, en lo posible que se encuentre en oscuridad total para evitar la fotorreacción del fenol con la luz ambiente y garantizar la correcta cuantificación del analito.

Se realizó adicionalmente un diseño experimental de Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) para cuantificar con mayor selectividad la degradación de fenoles. La separación óptima de los patrones estudiados fue con una fase móvil: agua/metanol (7:3), pH 4,0 ajustado con  $\text{H}_3\text{PO}_4$  0,1 M, con un flujo de 0,5 mL/min,  $\lambda = 220$  nm. Para el análisis cinético, se midieron los picos cromatográficos en tres tiempos: al inicio, 15 minutos y 30 minutos para estudiar el porcentaje de degradación de la muestra.

Este montaje se basa en el mencionado anteriormente para el foto-reactor, usando las mismas condiciones. En cuanto a las especies, se empleó una concentración de Fenol de 50 ppm, 200 ppm de peróxido de hidrógeno, y 55 ppm de sulfato de hierro II.

### **7.2.2. FASE 2: Estrategias de modelización de situaciones contextuales**

En esta segunda fase, se plantean una situación contextual (Anexo B) partir de los dos ejes constituyentes del proceso foto-Fenton; oxidación avanzada y fotocátalisis. Esta fase permitió definir cómo el estudiante explica desde varios aspectos los dos conceptos clave involucrados en el proceso foto-Fenton: oxidación avanzada y fotocátalisis; del mismo modo cómo se efectúa el proceso de modelización explicativa frente a la situación contextual. Cabe señalar que aún no se hará el acercamiento frente al fotoreactor, sino será simplemente una intervención conceptual.

#### **7.2.2.1.Subfase Metodológica**

La situación contextual, entendida como parte del Instrumento 1 (Anexo B) y en concordancia con el enfoque didáctico de química en contexto, se propuso con el objetivo de plantear en primera instancia las diferentes temáticas que se presentarán al estudiante para que este caracterice el fenómeno. Como se mencionaba en la introducción a la Fase 2, aquellos ejes conceptuales son la oxidación avanzada (proceso Fenton), y fotocátalisis (proceso foto-Fenton). Los aspectos teóricos fueron contemplados como “porción de mundo” (Chamizo, 2010) en donde coexisten en el contexto planteado de una problemática ambiental. En esta problemática se les expone el caso hipotético de una empresa que tiene un problema: el uso del colorante textil púrpura industrial 7 (molécula hipotética y problema). Esta molécula es orgánica, no biodegradable y persistente; a su vez, tiene una alta toxicidad en las especies endémicas de la región. Se propone el proceso foto-Fenton como alternativa para mitigar el impacto que se tiene al tener presente altas concentraciones de esta molécula en las aguas residuales que emite la empresa.

En el Instrumento 1, se dan los cuatro componentes clave dentro del método: el contaminante, catalizador, agente oxidante y activador energético. Cada uno de los componentes son detallados, asimismo como el mecanismo de degradación de la sustancia problema hipotética mediante un texto (no hay lenguaje simbólico más allá de la fórmula de las sustancias mencionadas). Del mismo modo, y a modo de dar información útil para una posible matematización, se muestran datos de un estudio cinético a forma de Tabla con valores que cambian la concentración de Sulfato de Hierro II, peróxido, pH, tiempo de irradiación de la radiación, y porcentaje de degradación.

Para complementar el Instrumento 1, y en cuestión de corresponder con el enfoque planteado, se propone realizar integración conceptual entre Química en Contexto, y Modelos y Modelización; lo cual sugiere Caamaño (2011) en el texto enseñar química mediante la contextualización. En la literatura se encuentra cómo han surgido diferentes investigaciones sobre modelización en pedagogía y/o como enfoque didáctico (Oliva, 2018), por otra parte, Campbell y Zuwallack (2015) han concluido en que existen cinco tipos de modelización (Tabla 2) que realizan los científicos en su trabajo y pueden ser igualmente considerados en la enseñanza y aprendizaje de la ciencia.

#### **Tabla 2.**

*Cinco tipos de Modelización.*

	Tipo	Característica
Modelización	Exploratoria	Los estudiantes investigan las propiedades de un modelo existente interactuando con este y observando sus efectos.
	Expresiva	Los estudiantes expresan sus ideas para describir o explicar eventos o fenómenos científicos mediante la formulación de modelos existentes o nuevos.
	Experimental	Los estudiantes formulan hipótesis o predicciones a partir de modelos y los ponen a prueba a través de la experimentación con el fenómeno.
	Evaluativa	Los estudiantes comparan modelos alternativos que explican el mismo fenómeno o problema, evalúan sus ventajas y limitaciones, y eligen el más apropiado para explicar el fenómeno.
	Cíclica	Los estudiantes participan en ciclos completos de modelización: desarrollo, evaluación y mejora de modelos.

*Nota.* Elaboración propia a partir de Amador (2021).

Entre estos tipos de modelización que se plantean, Amador (2021), centra la investigación en la propuesta del modelo explicativo partiendo de la premisa de que en la actividad científica y actividad científica escolar (Chamizo y García, 2010), se elaboran modelos que se construyen y se reconstruyen con la idea de generar argumentos de los fenómenos que se estudian; a su vez, con respecto a lo que menciona Gilbert et al. (2004) al proponer una serie de tipologías de las explicaciones que generan los científicos. Este modelo se basa en la puesta en escena dentro del aula de las explicaciones dadas por los científicos que menciona Gilbert, lo que se evidencia en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Tipología de modelos explicativos.*

Modelo explicativo	Pregunta a explicar	Característica
Intencional	¿Cuál es el propósito por explicar un fenómeno?	La explicación dada incluye una declaración del propósito que se aborda y otorga una idea de la importancia del fenómeno que se quiere explicar. En la explicación proporcionada se manifiesta el origen, el alcance y los límites del fenómeno. En relación con la enseñanza de las ciencias, es una justificación de las acciones realizadas en la actividad científica escolar por los estudiantes.
Descriptivo	¿Cuáles son las propiedades de un fenómeno?	Es un resumen de las medidas o características de las partes que componen al fenómeno. Un fenómeno que aparentemente no cambia se le determina reiteradamente un valor o característica, el cual será tan cierto como el instrumento lo permita. En relación con la enseñanza de las ciencias, es una aclaración del significado del fenómeno estudiado por los estudiantes en la actividad científica escolar.

Interpretativo	¿De qué se compone el fenómeno?	Son declaraciones no solo sobre la naturaleza del fenómeno sino también sobre cómo es su distribución en el espacio y como esa distribución cambia con el tiempo. En otras palabras, los estudiantes recurren a la teoría para explicar el fenómeno estudiado.
Causal	¿Por qué el fenómeno se comporta como lo hace?	Es la formulación de un mecanismo explicando el comportamiento observado a través de la operación de causa y efecto en las entidades de las cuales está compuesto el fenómeno. Es decir, si el estudiante explica el fenómeno por medio de la causalidad: el fenómeno sucede ya que una causa puede producir un evento o varios.
Predictivo	¿Cómo se comportará el fenómeno bajo otras condiciones específicas?	Una predicción significa anticipar el comportamiento del fenómeno a futuro, partiendo de la idea que será diferente a uno conocido, pero los modelos construidos permiten tomar decisiones, por ejemplo, generar una explicación.

*Nota.* Elaboración propia a partir de amador (2021).

Con esta tipología, se diseñan las diferentes preguntas que deberán responder los profesores en formación, partiendo de los cinco modelos explicativos. Por cada modelo explicativo, se diseñaron dos preguntas en función de caracterizar los procesos de modelización que construyen un grupo de profesores en formación de Licenciatura en Química cuando analizan un fenómeno asociado a los procesos de oxidación avanzada de compuestos fenólicos en inmediaciones de situaciones problema contextualizadas. En la Tabla 4 se expone la respectiva categorización que se tuvo con respecto a la tipología.

**Tabla 4.**

*Preguntas en relación con la tipología de modelos explicativos.*

Modelo Explicativo	Pregunta
Intencional	¿Por qué considera importante estudiar la problemática de contaminación de las aguas residuales de la empresa de productos textiles Texti-Bogotá S.A.S desde la química?
	¿Cuál es la finalidad que tiene emplear el proceso Foto-Fenton como alternativa de tratamiento en este contexto ambiental?
Descriptivo	¿Cómo podría describir los fenómenos de oxidación avanzada y fotocatalisis que se presentan en el proceso foto-Fenton?
	¿Cómo el proceso foto-Fenton degrada los compuestos como el colorante púrpura industrial 7?
Interpretativo	¿Cómo podría explicar, a nivel molecular, el comportamiento del colorante púrpura industrial 7 en el medio acuático y su interacción con radical hidroxilo ( $^{\circ}\text{OH}$ )?
	Con base en tu conocimiento teórico ¿Cómo podrías explicar el proceso foto-Fenton que ocurre en el sistema de degradación del colorante púrpura industrial 7?
Causal	¿Cómo explica que la aplicación del proceso Foto-Fenton puede causar la reducción de los contaminantes en el agua?
	¿Qué implicaciones conllevan el uso de la lámpara UV en el proceso?

Predictivo

Si tomo una muestra del agua del río y varío sus condiciones de pH a 2, 6 y 12 ¿Qué resultado espero obtener a los valores de pH correspondientes?

Si durante la aplicación del proceso foto-Fenton se cambiaron las concentraciones de Sulfato de Hierro al doble de lo establecido ¿Qué alteración podría ocurrir?

*Nota.* Elaboración propia.

En primera instancia, se les entregó un consentimiento informado a los participantes que exprese su autorización para ser partícipe de la investigación (Anexo A). Luego, se aplicó el instrumento 1, el cual presenta la situación problema y una serie de preguntas como se observa en el Anexo B y se explicó en la subfase conceptual.

Para caracterizar los modelos explicativos, se siguió la rúbrica para la caracterización de estrategias de modelización en estudiantes abordando situaciones problemáticas contextualizadas relacionadas con el proceso foto-Fenton, propuesta en el Anexo B. Esta rúbrica consta de tres partes, la rúbrica en sí, los indicadores para el nivel de profundidad en cada modelo explicativo (Tabla 5), y los indicadores para caracterizar los diferentes modelos explicativos (Tabla 6). De esta manera, se caracteriza al estudiante dando un acercamiento respecto a cómo modeliza el fenómeno.

**Tabla 5.**

*Indicadores para el nivel de profundidad conforme la rúbrica propuesta*

Indicadores para el nivel de profundidad en cada tipo de modelo explicativo			
1	2	4	5
Bajo	Insuficiente	Aceptable	Excelente
Utiliza el modelo explicativo, sin embargo, la respuesta no es clara, ni coherente desde el nivel y la dimensión de la Química establecidos para la categoría.	Utiliza el modelo explicativo, pero lo hace de forma insuficiente, presentando una respuesta superficial, o poco coherente desde el nivel y dimensión conceptual de la Química establecidos para la categoría.	Utiliza el modelo explicativo de forma aceptable, presentando una respuesta clara, desde el nivel y dimensión de la Química establecidos para la categoría, sin embargo, falta profundidad o análisis en sus explicaciones.	Utiliza el modelo explicativo de forma excepcional, evidenciado una comprensión significativa del fenómeno, presentando una respuesta clara, coherente y acertada, expresada tanto desde el nivel como desde la dimensión de la Química establecidos para la categoría.

*Nota.* Elaboración propia

**Tabla 6.**

## Indicadores para caracterizar los diferentes modelos explicativos

Modelos explicativos				
Intencional	Descriptivo	Interpretativo	Causal	Predictivo
El estudiante justifica el propósito y la importancia de la explicación, estableciendo el origen, el alcance y los límites del fenómeno que se quiere explicar.	El estudiante detalla, a modo de resumen, las características o las partes que componen el fenómeno, aclarando su significado.	El estudiante explica el fenómeno recurriendo a la teoría, describiendo su naturaleza y cómo su distribución cambia en el tiempo y el espacio.	El estudiante formula un mecanismo que explica el comportamiento observado a través de la operación de causa y efecto.	El estudiante anticipa el comportamiento del fenómeno a futuro bajo condiciones específicas, usando el modelo para generar una explicación o tomar una decisión.

*Nota.* Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 5, los diferentes indicadores generalizan el uso del modelo explicativo de acuerdo con las dos preguntas. Si bien, el estudiante puede llegar a tener en diferentes modelos explicativos igual nivel de profundidad, Wendy (2024) confirma que no es usual ver esto. A su vez, en la Tabla 6, se evidencia qué diferencia hay entre los diferentes modelos, llevando con esto a que los estudiantes puedan ser categorizados entre el/los modelo(s) explicativo(s) que más nivel de profundidad presente; confiriéndole una característica específica en relación con la situación problema. Si el estudiante modeliza de cierta manera el fenómeno propuesto en la situación contextual, se espera que realice lo mismo en la Fase 3, al presentarse la porción de mundo objeto de modelizar y su respectivo modelo creado.

El instrumento 1 fue validado de acuerdo con la rúbrica de validación del instrumento 1, la cual se muestra en el Anexo B, por dos expertos.

### 7.2.3. FASE 3: Modelización del fenómeno

Para esta tercera fase, se implementan dos instrumentos asociados con la caracterización de los procesos de modelización que se llevan a cabo cuando los participantes interactúan con la teoría y fundamentos conceptuales, llevándolo a cabo en el foto-reactor propuesto en la Fase 1. El enfoque didáctico de química en contexto se resalta en esta fase, ya que los participantes entran en el estudio del concepto de la oxidación avanzada y fotocatalisis, lo cual se evidencia en el contexto del foto-reactor.

La metodología de química en contexto es, en síntesis, un acercamiento del estudiante a una situación para que, a partir del contexto, se desarrollen los conceptos y modelos (Caamaño, 2018). A su vez, el autor cita las etapas de la modelización escolar por parte de Justi (2011), las cuales son:

1. La elaboración de un modelo mental del estudiante a partir de sus ideas previas, la información externa obtenida a partir de evidencias experimentales y por otros

medios, y la utilización de un razonamiento analógico en el proceso de relacionar informaciones.

2. La representación del modelo mental mediante dibujos, esquemas, ecuaciones, maquetas y demás.
3. La puesta a prueba del modelo sea de manera empírica o mental.
4. La evaluación del alcance y de las limitaciones del modelo elaborado.

En la Fase 3 se alinean estas etapas en la medida en que son presentados los diferentes instrumentos, aunque se complementa con la transición del modelo mental al conceptual, lo que vendría siendo las siguientes etapas adicionales:

5. La representación del modelo conceptual sea de tipo material o matemático, integrando la teoría o Marco Teórico para tener una base conceptual.
6. La evaluación de la validez conceptual, representacional, relacional, multimodal y capacidad predictiva.

En esta fase, se plantea a modo de informe de laboratorio, la construcción de un modelo siguiendo una serie de respuestas a preguntas planteadas. Luego, se emplea tanto la rúbrica de diagnóstico del modelo conceptual (Anexo D) para diagnosticar el modelo mental propuesto representando lo que ocurre en el foto-reactor, como la rúbrica de evaluación del modelo conceptual (Anexo D) para evaluar el modelo conceptual conforme se integra la teoría.

### 7.2.3.1.Subfase Metodológica

A modo de situación contextual del fenómeno de oxidación avanzada y fotocátalisis presente en el proceso foto-Fenton, se plantea una práctica de laboratorio (Anexo C) para su reconocimiento, intervención, y manejo. En esta práctica de laboratorio, los estudiantes son divididos en tres grupos, quienes irán a tener diferentes parámetros de concentración en alguna sustancia implicada a la hora de realizar el proceso foto-Fenton (Tabla 7). Cada grupo realizó una prueba en el fotoreactor durante 30 minutos, tomando alícuotas de 5 mL cada 5 minutos para obtener los datos suficientes como para realizar un estudio cinético. Las lecturas y el procedimiento se realizaron siguiendo la misma técnica que en la Fase 1, con la variación de que se leyó la absorbancia en el equipo Hitachi® (Anexo D), por lo que se tuvo que realizar una nueva curva de calibración.

**Tabla 7.**

*Grupos de trabajo con sus respectivos parámetros.*

Grupo	Parámetro		
	FeSO <sub>4</sub> (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ppm)	Fenol (ppm)
1) Estudiante 5 y 6	20	200	50
2) Estudiante 2 y 4	20	200	40
3) Estudiante 1 y 3	28	200	50

*Nota.* Elaboración propia

Como segunda parte de la fase 2, se realizó la implementación del instrumento 2 (Anexo E) a modo de informe de laboratorio. Para evaluar los diferentes modelos que proponen y

construyen, se decidió partir de la idea de Chamizo y García (2010) al partir de un modelo conceptual y transitar hacia uno conceptual. Para esto, se desarrollaron una serie de preguntas divididas en tres partes. La primera está orientada a la construcción del modelo mental que posee el estudiante al representar bajo los conocimientos de ese momento el proceso foto-Fenton que ocurre en el fotoreactor al degradar Fenol (ácido fénico). Esto debe resultar en su respectiva representación que incluya la resolución a las preguntas, ya que este modelo es análogo estructurante del mundo (Jhonson-Laird, 1983).

En la segunda parte del instrumento, se hace referencia a cómo, mediante una consulta bibliográfica, se argumenta y/o explica el fenómeno que ocurre. Se parte de la construcción de un Marco Teórico, el cual tiene como ejes conceptuales la oxidación avanzada y fotocatalisis, trabajados en la fase 2, así como abordar una vista en conjunto de la constante oxidación del fenol mientras se foto-reduce el ion  $Fe^{3+}$  por medio de la irradiación con luz UV. Si bien, parece ser muy similar en cuanto a lo propuesto en la fase 2, se diferencia precisamente en la interrelación de estos dos acontecimientos en el fotoreactor, ya que en conjunto forman parte del proceso foto-Fenton, siendo eje central de esta fase, y se evidencia en la última pregunta.

En la tercera parte del instrumento, se orienta hacia el desarrollo del modelo conceptual, siendo ahora una representación externa (Jhonson-Laird, 1983). Si bien se menciona que un modelo mental también puede ser una representación externa, no está completo, es inestable y fluctúa debido a los conocimientos propios del individuo, por lo que la representación difiere una de la otra en su sustentación, explicación y argumentación. Para esta representación, se tiene sólo una pregunta <<¿Cómo representaría lo que ocurre en el fotoreactor?>>. Esta pregunta es clave, ya que indica el modelamiento de todos los conceptos que se han mencionado en la Fase 2, en simultáneo, y habiendo hecho una consulta previa de la información la cual respalde y sustente la representación que se haga.

En tercera instancia, se diseñó un cuestionario de percepción muy similar al tipo Likert, para identificar cómo los estudiantes percibieron su proceso de modelización. Este consta de tres partes: bibliografía encontrada; a lo fácil que es explicar el fenómeno; a lo fácil que es diseñar un modelo que represente el concepto; a lo fácil que es relacionar las propiedades de las sustancias participantes para explicar el fenómeno que ocurre en el proceso foto-Fenton. Todo esto se ejemplifica en la Tabla 8.

**Tabla 8.***Categorización con respecto a los conceptos implicados en el Instrumento II*

Categoría - ¿Qué tan fácil es?	Concepto		
Consulta Bibliográfica	Oxidación avanzada	Fotocatálisis	Proceso foto-Fenton
Explicar el Fenómeno			
Diseñar un modelo			
Relacionar las propiedades de las sustancias			

*Nota.* Elaboración propia.

Además, y como los participantes pertenecen a una categoría de formación de profesores, se colocó una pregunta abierta en la que enseñara, mediante el uso del modelo propuesto y una práctica de laboratorio similar a la que se formuló al principio de esta fase, a una población con sus propias palabras. El objetivo aquí es exponer la capacidad que tienen los estudiantes de hacer entender el modelo que explican en la respuesta; funcionando también a modo de cierre conforme las etapas del proceso de modelización.

## 8. Fase de Análisis

### 8.1. DISEÑO DEL FOTO REACTOR Y ANÁLISIS

Inicialmente se deben establecer los parámetros básicos para que el proceso foto-Fenton se ejecute de manera eficiente; por lo que, se deben determinar las concentraciones iniciales de cada especie, el pH al que se debe encontrar la mezcla, la temperatura y el tiempo de reacción, todos estos valores se eligen siempre y cuando se conozca el analito de interés a degradar, que en nuestro caso corresponde a Fenol (Rubio-Clemente et al., 2014). De modo que, se realizaron varios ensayos para determinar cada uno de los parámetros mencionados anteriormente, los ensayos más relevantes están expuestos en la Tabla 9:

**Tabla 9.***Variables y parámetros conforme los diferentes ensayos prácticos.*

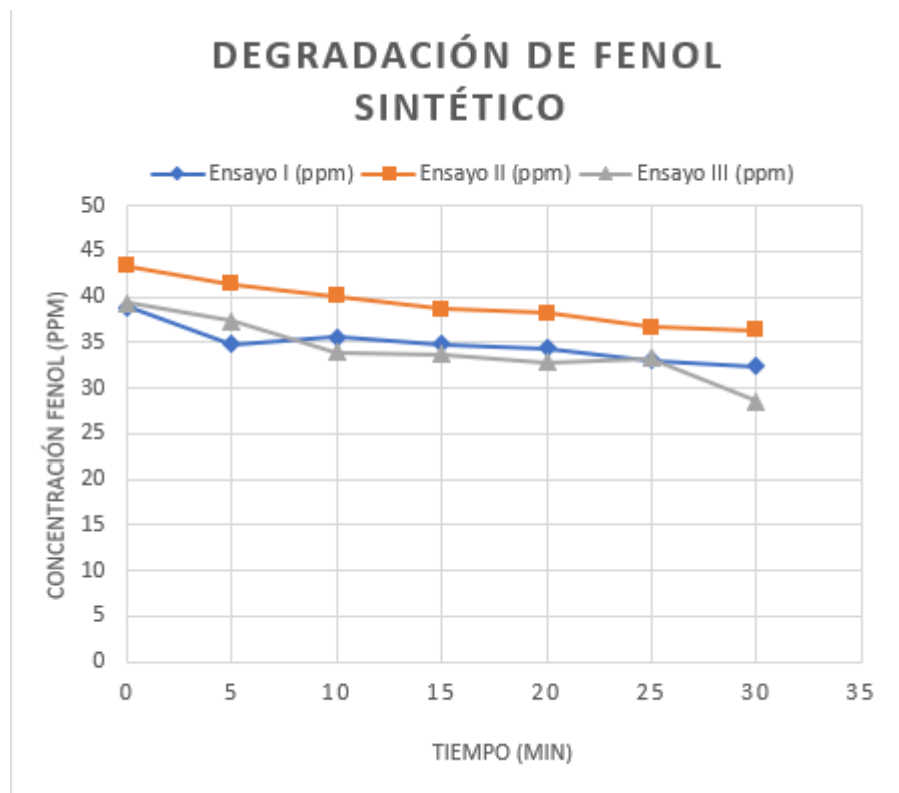
Ensayo	Especie	Concentración	pH	Temperatura	T. reacción
1	Peróxido de hidrógeno	400 ppm	3	25°C	25 min
	Sulfato de hierro	80 ppm			
	Fenol sintético	40 ppm			
2	Peróxido de hidrógeno	200 ppm	3	25 °C	30 min
	Sulfato de hierro	20			
	Fenol sintético	50 ppm			
3	Peróxido de hidrógeno	200 ppm	2,8	22°C	30 min
	Sulfato de hierro	45 ppm			
	Fenol sintético	40 ppm			

*Nota.* Elaboración propia.

Se realizaron diferentes ensayos químicos para obtener valores de degradación aceptables, en la Tabla 9 se muestran los 3 ensayos más relevantes. Cabe mencionar que nuestra mayor limitación con respecto a los ensayos de Rubio-Clemente fue la lámpara de rayos UV, pues la potencia era sustancialmente diferente, nuestra lámpara tiene una potencia de 8watts, mientras que la de los ensayos teóricos 240 watts, de modo que, debíamos realizar los ajustes pertinentes en los parámetros iniciales. Los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos se evidencian en la Figura 5.

**Figura 5.**

*Gráfica de los diferentes procesos de degradación según los ensayos.*



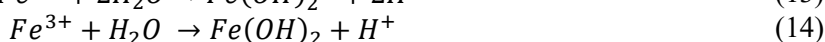
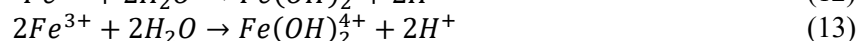
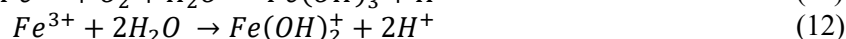
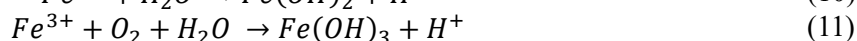
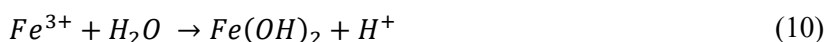
*Nota.* Elaboración propia

En la gráfica presentada observamos 3 ensayos, cada uno diferenciado por un color, el ensayo número 1 es el que evidentemente tiene menos degradación de fenoles; de hecho, si comparamos su degradación total fue de aproximadamente 6 ppm o 15%, en este caso doblamos las cantidades de reactivos mencionadas por Rubio-Clemente et al. (2014) (peróxido de hidrógeno y sulfato de hierro), en el ensayo número II la degradación fue mayor, en este caso tomamos valores similares a los teóricos; sin embargo, las partes por millón degradadas no superaba las 17,72% y finalmente el ensayo III corresponde a la curva con mayor degradación, aproximadamente de 11 ppm o 25%, en ese caso podemos afirmar que los valores más pertinentes de concentración de las especies reactivas, aunque hay que diferenciar el catalizador para degradar fenol en nuestro caso son: Sulfato de hierro 45 ppm, peróxido de hidrógeno 200 ppm y Fenol 40 ppm. Los valores de degradación son sustancialmente diferentes que los teóricos encontrados, esto se puede deber a varias razones.

**Peróxido de hidrógeno:** Es un reactivo altamente fotosensible, entonces entre más se ha expuesto al ambiente más va a tender a degradarse, por lo que su calidad se verá afectada y podrá interferir en nuestro caso con una ejecución efectiva del proceso foto-Fenton (Hunt & Taube, 1952)

**Lámpara de rayos UV:** como se mencionó anteriormente existe una gran diferencia entre la lámpara de rayos UV usada en los ensayos de Clemente (240 watts) y la lámpara de rayos empleada en esta investigación (8 watts) y como lo menciona Muñoz (2011) la potencia de la lámpara de rayos UV con la que se irradia al analito tiene un gran aporte en el proceso foto-Fenton, de modo que, a menor potencia menor será la regeneración del hierro (III), lo que provocaría una disminución en la producción de radicales hidroxilo, evitando así la degradación.

Para complementar los análisis espectrofotométricos, se realizó una prueba mediante la técnica de HPLC, en la Figura 5, se observa que hay un momento del ensayo III a los 25 minutos en el que la concentración de fenol aumenta debido a la absorbancia registrada. No es lógico pensar que, si se está degradando u oxidando el fenol, se presente este comportamiento, por lo que se llegó a considerar la acción de interferencia que podría generar las diferentes especies de hidróxido de hierro (Garisado et al, 2024), conforme las ecuaciones 10 – 14.



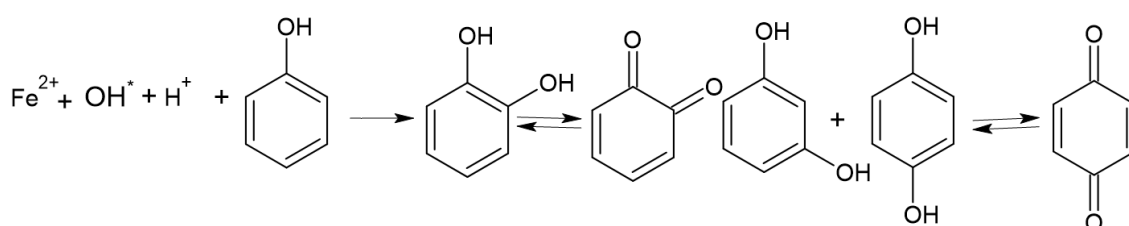
Si bien menciona Garisado, hay una reducción en la producción de radicales hidroxilo al presentarse la reacción entre el  $Fe(OH)_3$  y  $H_2O_2$  para producir agua y oxígeno molecular, también se interrumpe la foto-reducción del hierro (ecuación 7), por lo que hay interferencias en el porcentaje de degradación; sin embargo, la absorptividad molar de estas especies se

encuentra en el rango visible, lo que indica su no interferencia con las medidas de absorbancia a 269,9 nm.

Por otro lado, se consideró la posibilidad que algún producto de la oxidación del fenol fuera el responsable de absorber a la longitud de onda de la medición. En estudios realizados por Centeno et al (2020) se consolidó que, la reacción entre el radical hidroxilo y el fenol podía producir catecol, o-benzoquinona, resorcinol, hidroquinona y/o p-benzoquinona de acuerdo con la Figura 6.

**Figura 6.**

*Formación de subproductos de degradación de fenol*



*Nota.* Adaptado de Centeno et al (2020).

Las longitudes máximas de absorción ( $\lambda_{Max}$ ) de los subproductos aromáticos se muestran en la Tabla 10, correspondiendo con los trabajos de Yang (2016), Fónagy (2020) y Reinosá (2009).

**Tabla 10.**

*Longitudes de onda de máxima absorción en algunas moléculas aromáticas.*

Sustancia	$\lambda_{Max}$
Catecol	270 – 275 nm
O-benzoquinona	386 – 406 nm
Resorcinol	270 – 275 nm
Hidroquinona	270 – 275 nm
P-benzoquinona	245 – 250 nm

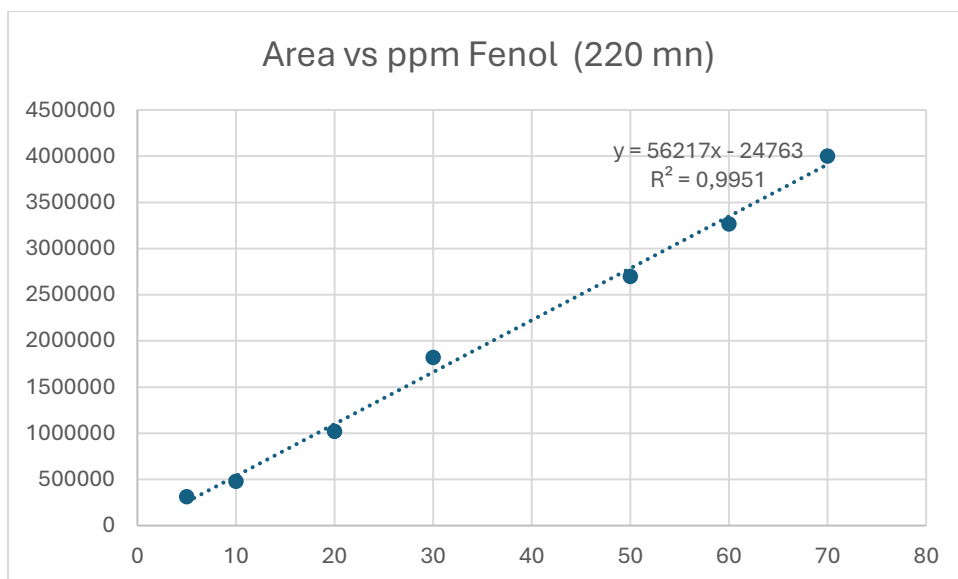
*Nota.* Elaboración propia.

Como se observa, hay presencia de sustancias como el catecol que llegan a interferir con la medición de la absorbancia, por lo que, para efectos de corroborar los datos, se realizó en conjunto un ensayo con HPLC mencionado en el apartado 8.2.1.1.

Con base en la curva de calibración (Figura 7), se estableció los valores propios de la concentración de fenoles en los tres momentos, tal como se muestra en la Tabla 11.

**Figura 7.**

*Curva de calibración del HPLC con patrones de Fenol.*



*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 11.**

*Datos obtenidos de concentración de fenol en ppm mediante la práctica con HPLC*

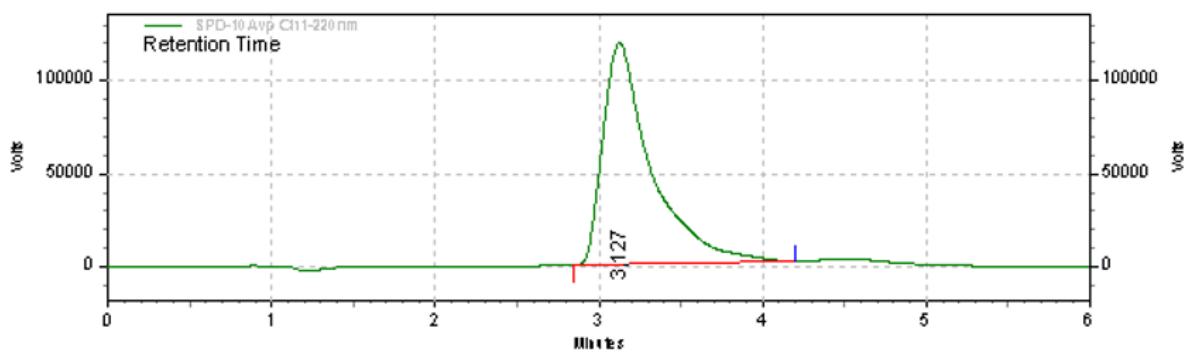
Sustancia	Concentración ppm	Concentración ppm
Fenol inicial	43,98	2447792
Fenol 15 min	37,79	2099816
Fenol 30 min	28,91	1600445

*Nota.* Elaboración propia.

En los resultados, se observa además en las Figuras 8, 9 y 10 cómo va decreciendo el pico cromatográfico a medida que pasa el tiempo, pero a su vez, se van formando especies que dan lectura a esa  $\lambda$  específica. Según los datos de concentración reportados en la Tabla 11, el porcentaje de degradación es de 34,26%. De esta manera, se comprueba que el análisis espectrofotométrico está condicionado a la aparición de esas sustancias; sin embargo, los análisis que se dieron mediante la técnica de espectrofotometría UV demuestran que, en ciertos parámetros, se puede alcanzar porcentajes de degradación de 25%, lo que es coherente con ensayos realizados por Garisado (2024) y Esplugas et al (2001). Aun así, se considera que, al ser la técnica de HPLC más selectiva que por espectrofotometría UV, el dato de % degradación de fenol reportado por HPCL es más coherente con el método de cuantificación.

**Figura 8.**

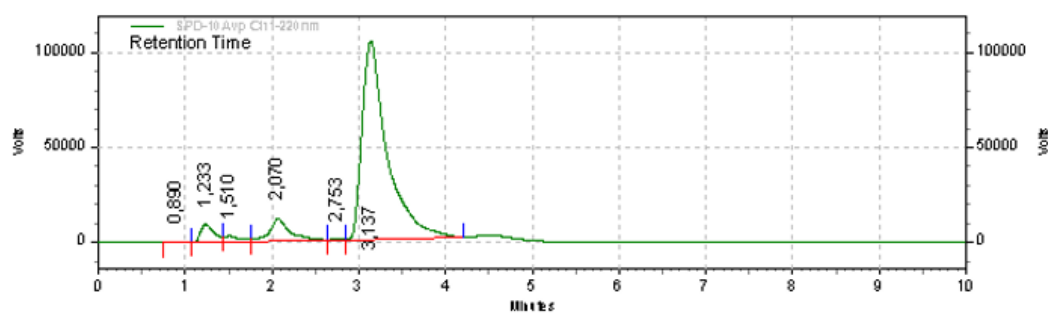
*Cromatograma del patrón de Fenol*



Nota. Elaboración propia.

**Figura 9.**

*Cromatograma de la muestra a los 15 minutos*



SPD-10Avp  
Ch1-220nm  
Results

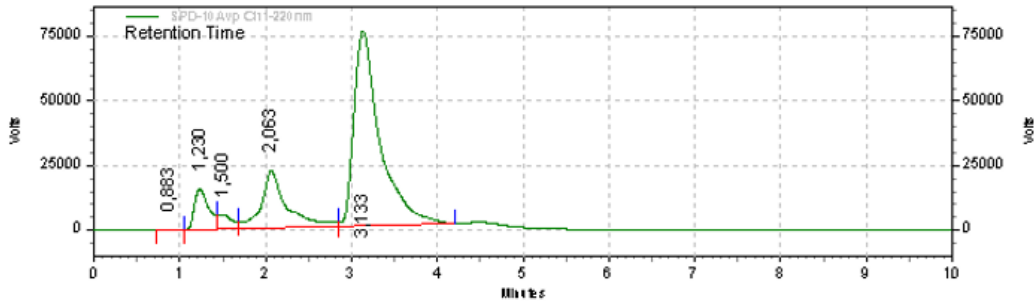
Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0,890	2094	0,09	242	0,19
1,233	101361	4,17	9402	7,30
1,510	36367	1,50	2970	2,31
2,070	187623	7,72	11618	9,02
2,753	1861	0,08	178	0,14
3,137	2099816	86,44	104374	81,05

Totals	2429122	100,00	128784	100,00
--------	---------	--------	--------	--------

Nota. Elaboración propia.

**Figura 10.**

*Cromatograma de la muestra a los 30 minutos.*



SPD-10Avp  
Ch1-220nm  
Results

Retention Time	Area	Area %	Height	Height %
0,883	1972	0,09	229	0,19
1,230	183562	7,94	15729	13,20
1,500	63965	2,77	5640	4,73
2,063	462228	19,99	22175	18,61
3,133	1600445	69,22	75403	63,27
Totals	2312172	100,00	119176	100,00

*Nota.* Elaboración propia.

## 8.2. ANÁLISIS CINÉTICO DE LA DEGRADACIÓN DEL FENOL

Se analizó el ensayo 2 mediante un estudio cinético, ya que fue aquel en donde se determinó la concentración de Fenol por medio de las dos técnicas. En primera instancia, se calculó el orden de reacción mediante el método integral, lo cual dio los valores de la Tabla 12, y las gráficas de las Figuras 11, 12 y 13.

**Tabla 12.**

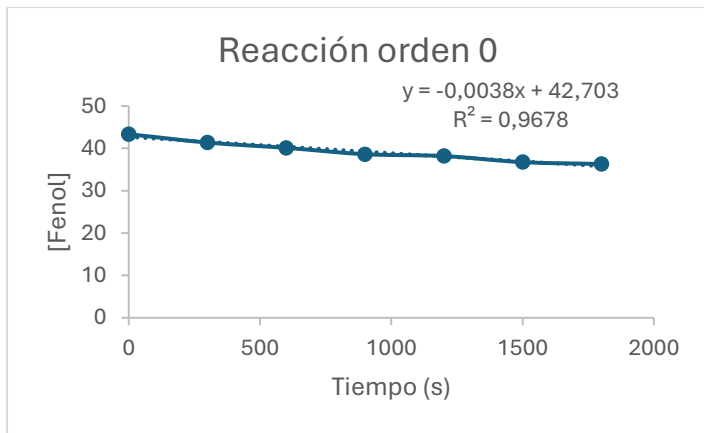
*Datos obtenidos mediante el método de integrales.*

t (s)	Orden 0	Orden 1	Orden 2
	[fenol ppm]	Ln/[fenol]	1/[fenol]
0	43,349	3,769	0,265
300	41,371	3,723	0,269
600	40,115	3,692	0,271
900	38,623	3,654	0,274
1200	38,186	3,642	0,275
1500	36,744	3,604	0,277
1800	36,313	3,592	0,278

*Nota.* Elaboración propia

**Figura 11.**

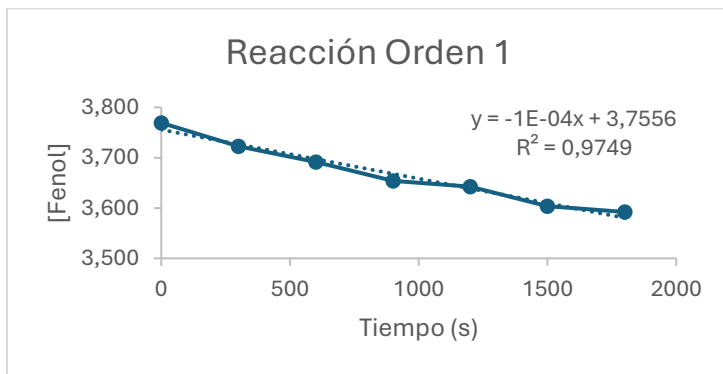
*Gráfica resultante de aplicar método de integral para reacción de Orden 0*



Nota. Elaboración propia.

**Figura 12.**

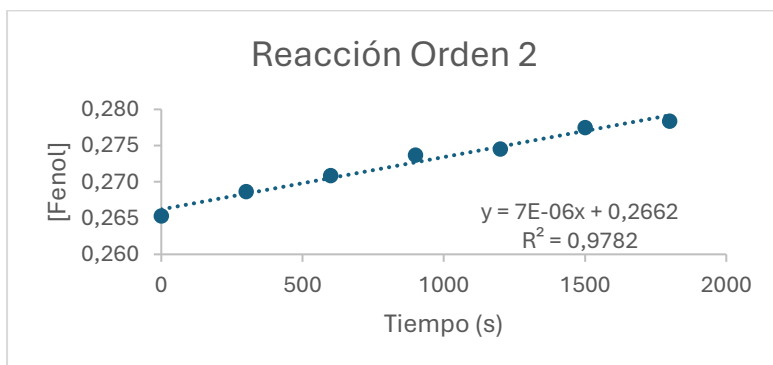
Gráfica resultante de aplicar método de integral para reacción de Orden 1



Nota. Elaboración propia.

**Figura 13.**

Gráfica resultante de aplicar método de integral para reacción de Orden 11



Nota. Elaboración propia.

Como se observa en las gráficas, la reacción que presenta mayor valor en  $R^2$  es la que corresponde con el segundo orden; sin embargo, en los diferentes ensayos como los que

realizó Esplugas (2002), se referían al proceso como una reacción de pseudo primer orden, entonces los siguientes análisis serán de acuerdo con una reacción de primer orden.

A la par, se calcularon los valores de la constante de velocidad (k) junto con el tiempo de vida media para la reacción, obteniendo los valores expresados en la Tabla 13.

**Tabla 13.**

*Datos complementarios del estudio cinético*

$T_{1/2}$	$k$
6930 s	0,0001 s <sup>-1</sup>

*Nota.* Elaboración propia

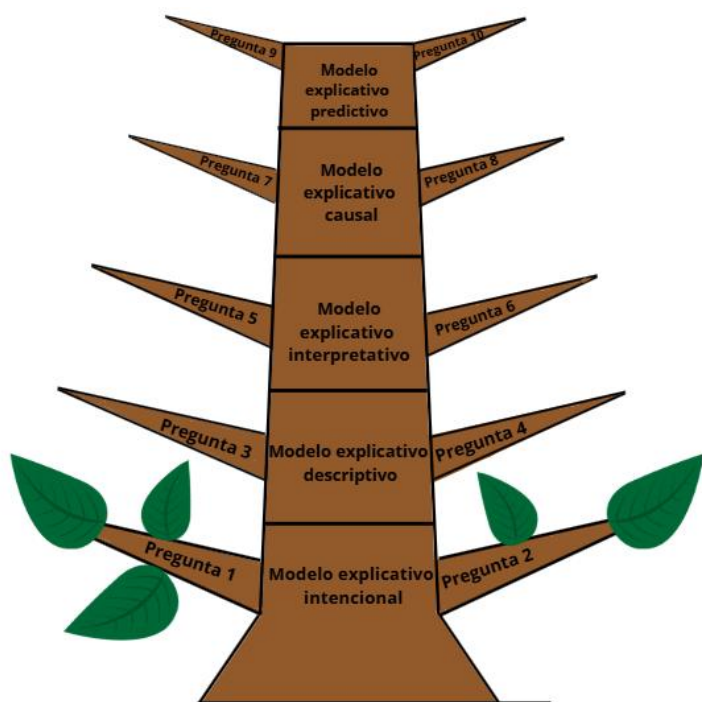
Estos valores indican que, para que teóricamente se alcance la mitad de la concentración de fenol, deberían transcurrir 6930 segundos o 1 hora con 55 minutos y 30 segundos, lo que es equivalente a afirmar que el 50% de degradación de fenol se alcanzaría a ese tiempo. A su vez, la constante de velocidad indica que, como es una reacción de primer orden y la velocidad depende únicamente de la concentración de Fenol, la velocidad a la que se está degradando el fenol es igual al 0,01% de la concentración de fenol restante en ese preciso instante; el porcentaje de concentración es el producto del valor de la constante de velocidad por cien. Esta es la razón por la cual la reacción se vuelve más lenta con el tiempo, como se observa en el ensayo II, en donde la concentración de fenol disminuye rápidamente al inicio, pero se desacelera en las muestras tomadas a los 25 y 30 minutos.

### 8.3. ANÁLISIS DEL INSTRUMENTO I

El presente apartado tiene como objetivo analizar los instrumentos propuestos para caracterizar y evaluar que tipos de modelos explicativos son empleados por profesores en formación de Licenciatura en Química tomando como mediador conceptual el efecto foto-Fenton a través del enfoque didáctico química en contexto y de este modo determinar qué modelo explicativo es el más común. Además, por efectos prácticos se diseñó una metodología para el análisis (árbol de la modelización), de modo que, como se observa en la Figura 14, será un indicador del alcance de los estudiantes en cada tipo de modelo explicativo, entonces el tronco del árbol será el tipo de modelo explicativo a evaluar, las ramificaciones serán las preguntas propuestas para el modelo y las hojas serán la puntuación que obtuvieron cada uno de los estudiantes; por ejemplo, si el estudiante 1 obtuvo 5 puntos totales correspondientes a 3 puntos de la pregunta 1 y 2 puntos de la pregunta 2, entonces, por consecuencia su árbol tendrá 7 hojas distribuidas en: 3 hojas para la pregunta 1 y 4 hojas para la pregunta 2.

**Figura 14.**

*Árbol de la modelización para ejemplificación*



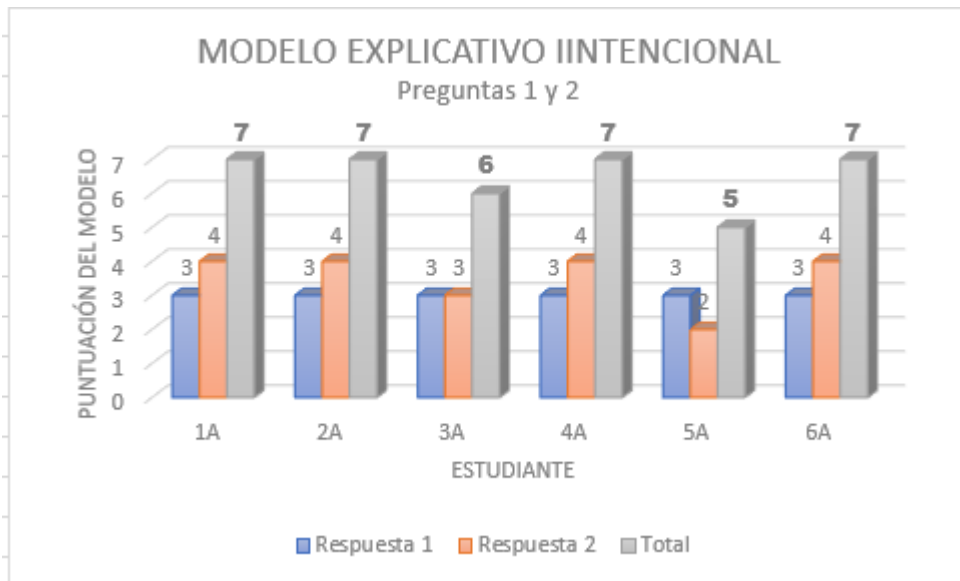
*Nota.* Elaboración propia.

### 8.3.1. Prueba de entrada y caracterización inicial de los modelos explicativos en estudiantes

Inicialmente se diseñó un instrumento en donde, por medio de un caso de la química contextual, el cual refería al proceso foto-Fenton para la degradación de un contaminante producido por una empresa textil, como se observa en el Anexo B, este constaba de 10 preguntas orientadas a la caracterización de los estudiantes teniendo en cuenta la tipología de modelos explicativos propuesta por Amador (2021), donde se exponen 5 tipos de modelos. Dos de cada diez preguntas correspondían a un modelo en específico, las primeras dos preguntas correspondían al modelo explicativo de tipo intencional; así, para el análisis de la actividad se construyó una rúbrica de evaluación, en donde, se exponían 4 indicadores con sus respectivas valoraciones, entonces, 1 punto para bajo, 2 puntos para insuficiente, 3 puntos aceptable y 4 puntos excelente respectivamente, de esta manera la puntuación máxima es de 8 (suponiendo que obtuvieran 4 puntos en cada una de las dos preguntas), mientras que la puntuación mínima corresponde a 2.

#### Figura 15.

*Gráfica del modelo explicativo intencional*



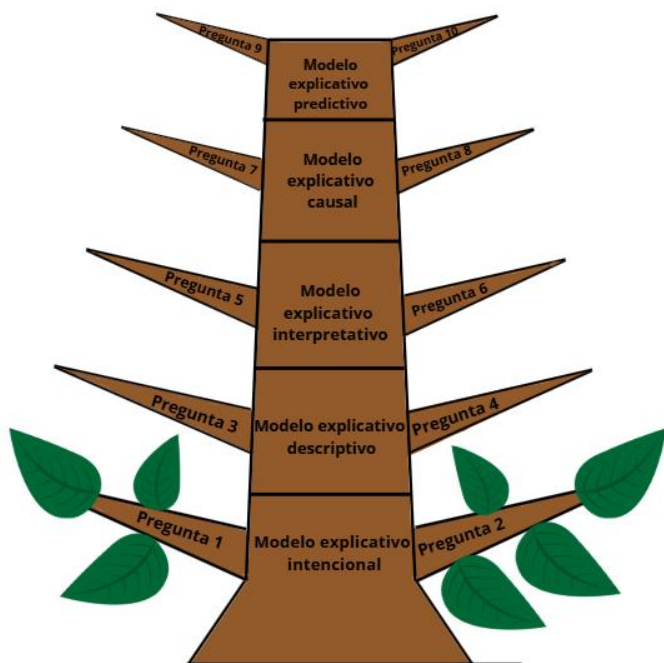
*Nota.* Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 15 que muestra la puntuación general compilada de los 6 estudiantes en torno al primer modelo explicativo, modelo explicativo intencional, entonces es posible determinar que los estudiantes tienen un manejo conceptual suficiente para que los modelos construidos cumplan con las características propias del modelo explicativo intencional, de manera que las respuestas aportadas son, casi en su totalidad superior a la puntuación 3 (aceptable), con excepción del estudiante número 5.

Teniendo en cuenta la cantidad de participantes se ampliará el análisis, de modo que se agrupen los puntajes exactamente iguales como los 4 estudiantes que tienen 7 puntos y se analizarán de manera individual a aquellos que tengan 6 y 5 puntos respectivamente.

**Figura 16.**

*Árbol de la modelización intencional*



*Nota.* Elaboración propia.

Los estudiantes 1, 2, 4 y 6 (E1, E2, E4 y E6) con 7 puntos en el modelo explicativo de tipo intencional se encuentran en un árbol de 7 hojas debido a que las respuestas aportadas por cada uno de ellos resultaron satisfactorias teniendo en cuenta diversos autores como Amador (2021), mientras que por su contraparte, los estudiantes E3 y E5 con valores de puntuación de 6 puntos y 5 puntos respectivamente, se clasificarán en un percentil más bajo; es decir, un árbol de 6 y 5 hojas; cabe aclarar que para Amador los modelos explicativos de tipo intencional abordan la descripción del propósito e importancia del fenómeno estudiado, que para esta pregunta corresponde a la contaminación de aguas residuales, así, el estudiante número dos contribuye:

*“Es importante estudiar esta situación desde la química porque permite comprender los procesos moleculares y transformaciones que tienen los contaminantes presentes en el agua... La química ayuda a identificar su estructura y en como pueden ser eliminados o transformado en sustancias menos tóxicas mediante reacciones químicas controladas”*

De acuerdo con Rubio-clemente et al. (2014) mencionan que los compuestos orgánicos de las aguas residuales son altamente contaminantes debido a las mezclas que pueden formar y a su resistencia molecular, haciendo que su remoción en aguas sea extremadamente compleja para las PTAR (plantas de tratamiento de aguas residuales), además, explican químicamente como los procesos de oxidación avanzada (POAs) tienen la capacidad de degradar el contaminante y a través de la mineralización de este, transformarlo en sustancias menos contaminantes como el vapor de agua.

Por otro lado, si analizamos al E5 donde describe la importancia y propósito:

*“Considero que es importante, porque es una problemática que, aunque parezca o sea ficticia, es una realidad que se vive en la actualidad, esto, por la contaminación de los cuerpos de agua y su importancia al descontaminarlo.”*

Si bien el estudiante atañe al propósito de la descontaminación de aguas residuales que es, en esencia, una problemática ambiental, no argumenta correctamente la importancia de llevar este tipo de procesos a cabo, al no dar una explicación de esta y por el contrario solo manifestarlo en “considero que es importante”.

Amador también habla sobre la importancia del modelo explicativo intencional en tanto este debe estar en la capacidad de explicar el origen, alcance y las limitantes que tiene el fenómeno, que para la segunda pregunta de la prueba de entrada refiere al proceso foto-Fenton. El E1 abarca la lo propuesto por Amador de manera satisfactoria:

*“En las reacción de producción de estas empresas se generan sustancias químicas muy difíciles de degradar, la literatura e investigaciones que se han realizado han demostrado que la reacción de  $Fe^{2+}$  y el  $H_2O_2$  produce el  $Fe^{3+}$  mas un ion  $OH^-$  y un radical  $^*OH$ . He aquí la finalidad del proceso fenton, ya que este radical al ser inestable y altamente oxidante puede “degradar” la sustancia nociva, siempre y cuando sea orgánica y así generar compuestos menos tóxicos hasta llegar al  $CO_2$  y agua.”*

Hincapie-Mejia et al. (2011) Describe al proceso foto-Fenton como una alternativa viable para la degradación de compuestos contaminantes de aguas, siempre y cuando estos compuestos sean orgánicos, así, por medio de la generación de radicales hidroxilos, se logrará la mineralización del agente contaminantes y posteriormente su degradación produciendo  $CO_2$ , entre otros. Así, el E1 abarcó las fases requeridas para el modelo explicativo intencional, pues definió el origen cuando habla sobre “la reacción entre  $Fe^{2+}$  y  $H_2O_2$  produce...”, también describe el alcance del proceso fenton al mencionar la “capacidad del agente oxidante para degradar la sustancia nociva” y finalmente alude a los limitantes del fenómeno pues reconoce que este solo está en la capacidad de degradar moléculas orgánicas.

El E3 respondió parcialmente bien la pregunta propuesta:

*“El proceso Fenton se usa en este proceso porque es una técnica de oxidación avanzada el cual permite desintegrar contaminantes orgánicos que son difíciles de eliminar, como el colorante púrpura industrial 7, hasta poderlos convertir en productos finales inofensivos como el dióxido de carbono y agua. Su importancia es lograr una eliminación eficiente del contaminante para cumplir con los límites ambientales exigidos.”*

Si bien abarca la primera dimensión que alude al alcance del proceso al hacer afirmaciones como “convertir los productos finales en inofensivos”, no abarca el origen del proceso pues no da cuenta de cómo este inicia y tampoco refiere en ningún momento a los limitantes del mismo; por lo tanto, no obtuvo el mejor resultado en la modelización explicativa de tipo intencional.

Finalmente, Amador menciona que debe existir una justificación de las actividades realizadas, en este caso, los estudiantes deben justificar el porqué del proceso foto-Fenton para la eliminación de contaminantes de aguas.

Es así como los estudiantes 4 y 6 (E4 y E6) los cuales tienen el mismo puntaje total (7 puntos) respondieron a la pregunta de la siguiente manera:

*“Su finalidad es eliminar los compuestos presentes que tienen una consideración tóxica y persistentes del agua residual lo cual, aprovechando la sinergia entre la reacción de Fenton y la irradiación ultravioleta, hace que aumente la eficiencia del tratamiento frente a métodos convencionales” E4*

*“La finalidad principal para poder emplear el proceso foto-Fenton es poder lograr la degradación completa del colorante púrpura industrial 7, convirtiendo este en dióxido de carbono y agua... su propósito no es solo “decolorar” el agua, sino mineralizar el contaminante, eliminando sus efectos tóxicos. En lo personal, me parece fascinante cómo una técnica química puede transformar un problema industrial en una oportunidad de aplicar la ciencia al servicio del ambiente, explicando esta técnica desde su efectividad y la importancia de en esta en la implementación para la degradación de contaminantes en la fuente hídrica” E6*

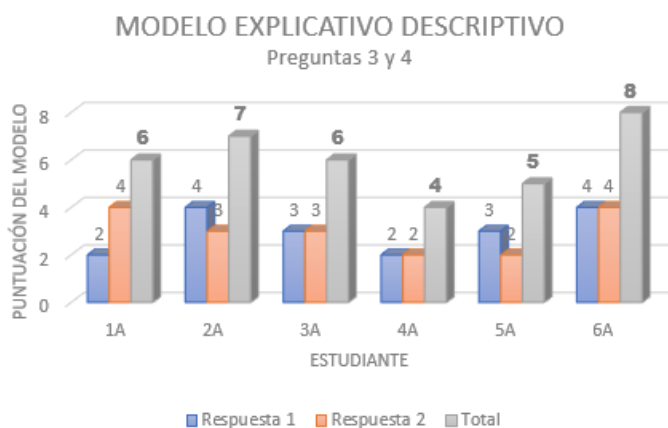
De este modo es posible afirmar que el puntaje final obtenido para los 2 estudiantes en esta etapa es una muestra de sus habilidades para responder preguntas relacionadas con el efecto foto-Fenton y la modelización, de modo que, describen con detalle la importancia y el porqué de aplicarse este tipo de técnicas para descontaminar cuerpos de agua.

El segundo tipo de modelización explicativa atañe al tipo descriptivo, que es en esencia, un resumen grosso modo de las características típicas y más influyentes del fenómeno que se estudia y que aparentemente no varía con respecto al tiempo, otorgándole así un valor o característica predefinido, entonces en relación con la enseñanza de las ciencias los estudiantes van a dar claridades acerca del significado del fenómeno estudiado (Amador, 2021); para este caso, el efecto foto-Fenton tiene características típicas que no deberían cambiar a través del tiempo, así con la ejecución de este se obtendrán los resultados esperados degradando las sustancias tóxicas.

Los resultados totales del modelo explicativo de tipo descriptivo de los estudiantes están representados bajo la Figura 17.

### **Figura 17.**

*Gráfica modelo explicativo descriptivo*

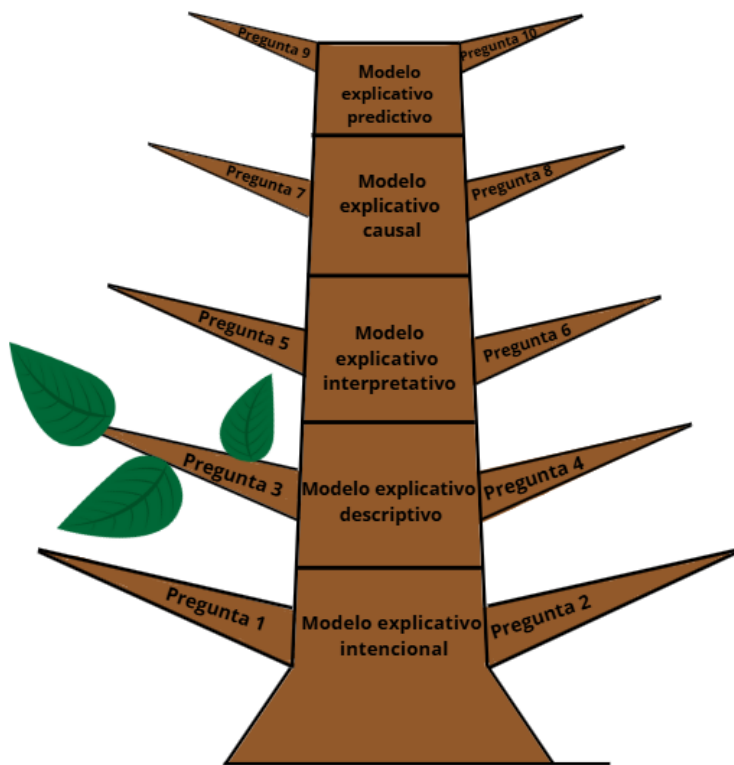


*Nota.* Elaboración propia.

Desde una perspectiva general vemos que tuvo puntajes un poco más bajos comparándolo con el tipo de modelo inmediatamente anterior (intencional); sin embargo, los resultados no son mucho menores. Para su posterior análisis se agruparán dos grupos de estudiantes de acuerdo con sus valoraciones en la pregunta número 3 y en la pregunta número 4. Para la pregunta 3 se les pedía explicar y detallar los procesos químicos que dan lugar cuando el proceso foto-Fenton inicial, estos corresponden a la oxidación avanzada y el efecto de la fotocatalisis, entonces, los estudiantes 3, 4 y 5 (E3, E4 y E5) obtuvieron valoraciones con puntajes 3, 2 y 3 respectivamente, por lo que su árbol tendrá 3 y 2 hojas en la mencionada pregunta, así como se evidencia en las Figuras 18 y 19.

**Figura 18.**

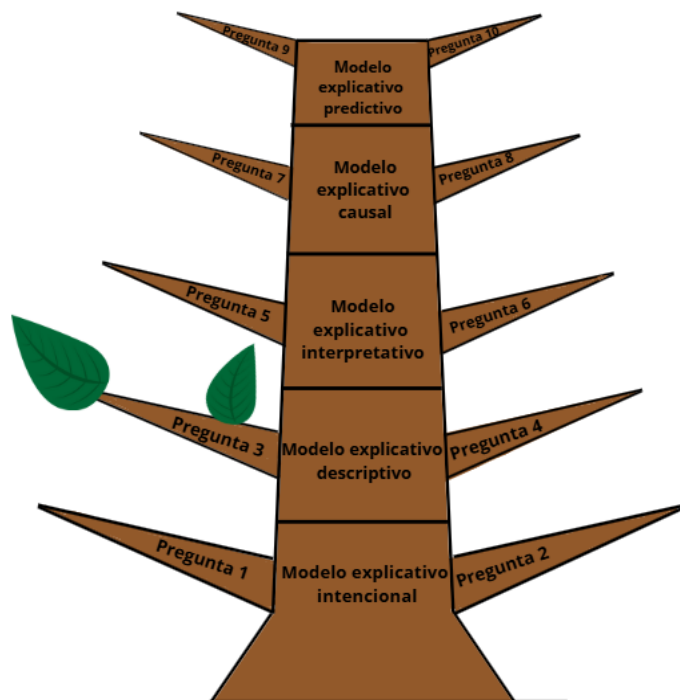
*Árbol de la modelización pregunta 3*



Nota. Elaboración propia,

**Figura 19.**

*Árbol de la modelización pregunta 3*



Nota. Elaboración propia.

Se hará un compilado de las respuestas de cada uno de los estudiantes con el fin de hacer una comparación conceptual entre sus respuestas y la teoría, en ese caso, sus respuestas están dadas en la Tabla 14.

**Tabla 14.**

*Compilado de respuestas de los estudiantes pregunta 3*

E3	En el proceso de oxidación avanzada, se producen radicales libres ( $\bullet\text{OH}$ ) que son capaces de atacar y romper enlaces C-C y C-N en moléculas orgánicas. En la fotocatalisis, la radiación UV fomenta la reducción de $\text{Fe}^{3+}$ a $\text{Fe}^{2+}$ , así regenerando el catalizador y manteniendo activa la reacción Fenton. Cada uno de estos fenómenos actúan conjuntamente para maximizar la degradación del contaminante.
E4	Las oxidaciones que son avanzadas proceden de procesos que producen radicales altamente reactivos, como el $\text{-OH}$ , capaces de atacar casi cualquier compuesto orgánico. En la fotocatalisis proceso que se está referenciando, la radiación ultravioleta actúa sobre el catalizador (en este caso $\text{Fe}^{3+}$ ), regenerándolo a $\text{Fe}^{2+}$ y manteniendo activo el ciclo catalítico. Así, la luz no solo acelera la reacción funcionando como un catalizador, sino que mejora la producción continua de radicales oxidantes en el sistema
E5	Para el caso de la oxidación avanzada, supongo que se refiere a la producción de una especie química capaz de reaccionar con casi cualquier sustancia presente, como, por ejemplo, el radical libre hidroxilo, que no es selectivo. Para el caso de la fotocatalisis lo relaciono con el uso de la lámpara de radiación UV, la cual se utiliza para reducir el ion $\text{Fe}^{3+}$ al ion $\text{Fe}^{2+}$ para formar de nuevo el catalizador y producir más radicales hidroxilo. En cierta medida, podría decirse que ambos fenómenos son "cíclicos", ya que mientras se oxida, con la reducción se puede seguir oxidando al producir el radical hidroxilo.

*Nota.* Elaboración propia.

Para Rubio-clemente et al. (2014) la oxidación avanzada resulta ser uno de los tratamientos complementarios para la eliminación de sustancias tóxicas en el agua por medio de la generación de radicales Hidroxilo, puesto que, estos tienen un alto potencial de reacción, siendo capaces de oxidar compuestos orgánicos hasta su completa mineralización y producción de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , de modo que los procesos de oxidación avanzada han demostrado ser bastante eficaces comparados con los tratamientos convencionales de aguas contaminadas. Por su parte la fotocatalisis es la generación de radicales hidroxilo por medio de reacciones de oxidación-reducción que se dan en la superficie de un fotocatalizador debido a la acción de radiación (en este caso radiación ultravioleta), es así como el hierro  $\text{Fe}^{2+}$  se oxida a  $\text{Fe}^{3+}$  permitiendo la formación de radicales hidroxilo y posteriormente, los iones  $\text{Fe}^{3+}$  por medio de su interacción con la luz ultravioleta tendrá una foto reducción  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$  la cual producirá más radicales hidroxilo (hincapié et al., 2011)

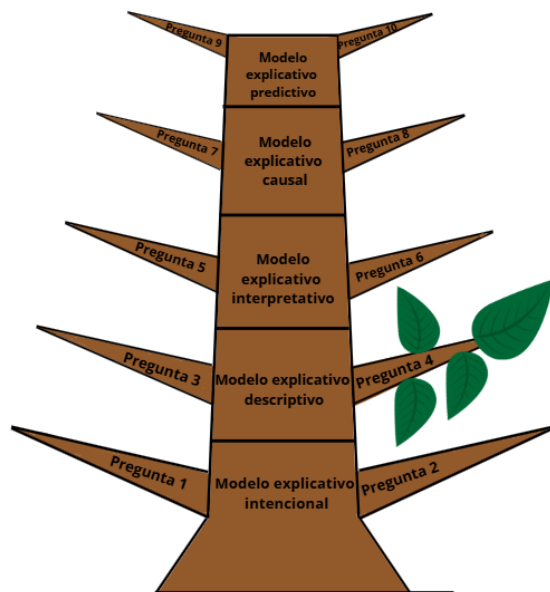
En ese orden de ideas, las puntuaciones en este caso son aceptables o insuficientes porque, el E3 si bien da una explicación de los dos procesos, esta resulta superficial, al no dar especificidad en torno a como se generan los radicales hidroxilo, entendiendo la importancia de estos en los procesos mencionados. El E4 por su parte realiza una mejor descripción en

torno a la generación de radicales OH con ayuda de la luz ultravioleta, explicando como gracias a la oxido-reducción es posible esta generación; sin embargo, en la oxidación avanzada nuevamente no da claridad de la generación de radicales hidroxilo. Finalmente, el E5 menciona la capacidad oxidativa del radical hidroxilo, pero no completamente como se genera y también posee errores conceptuales en tanto menciona “especie química capaz de reaccionar con casi cualquier sustancia presente” pero como se mencionó en anteriores apartados, este radical está en la capacidad oxidar sustancias si la molécula objetivo es de tipo orgánico. Los tres estudiantes tienen similitudes conceptuales en tanto se aproximan a la idea de la generación de radicales hidroxilo mediado por la fotocatalisis; sin embargo, el concepto de oxidación avanzada no es del todo claro para ninguno de los sujetos.

Posteriormente, la pregunta cuatro pretendía evaluar como el proceso foto-Fenton podría degradar al contaminante (púrpura industrial 7), en ese caso, los estudiantes deben dar un resumen de las características del fenómeno y como estas podrían llegar a su objetivo (Amador, 2021) Los estudiantes eran 1, 2 y 6, con puntajes de 4, 3 y 4 respectivamente; por lo tanto, su árbol se ve de la siguiente manera (Figura 20 y 21)

**Figura 20.**

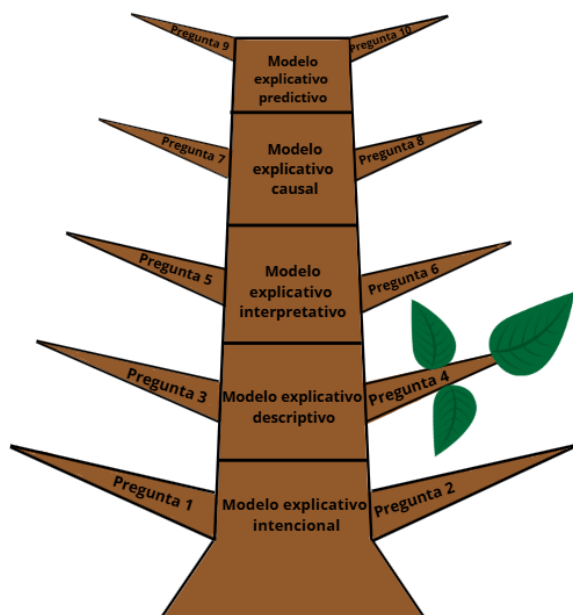
*Árbol de la modelización pregunta 4*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 21.**

*Árbol de la modelización pregunta 4*



*Nota.* Elaboración propia.

Así como lo menciona Hincapie-mejia et al. (2011) las reacciones involucradas en el proceso foto-Fenton se dan en diferentes etapas, iniciando en la reacción entre el fotocatalizador y el peróxido  $Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH\cdot + OH$  para que posteriormente ocurriera una oxidoreducción  $Fe^{3+} + H_2O + hv \rightarrow Fe^{2+} + OH\cdot + H^+$  regenerando así el catalizador y finalmente se da la mineralización de la sustancia tóxica debido a  $OH\cdot + ST \rightarrow CO_2 + \text{foto-productos}$ . De esta manera transcurre la degradación de la mencionada sustancia por medio del proceso foto-Fenton.

Del mismo modo las respuestas de los estudiantes 1, 2 y 6 para esta pregunta se encuentran en la Tabla 15.

**Tabla 15.**

*Respuesta de los estudiantes pregunta 4*

E1	En primer lugar, ocurre un ataque por adición electrofílica, donde el radical hidroxilo se adiciona directamente a los anillos aromáticos del colorante, rompiendo la estructura conjugada y eliminando progresivamente el color. En segundo lugar, tiene lugar un ataque por abstracción de hidrógeno, en el cual el $\cdot\text{OH}$ extrae átomos de hidrógeno de grupos funcionales como $-\text{CH}_2-$ o $-\text{NH}-$ , formando radicales orgánicos intermedios que se oxidan en presencia de oxígeno. Finalmente, se produce una oxidación por transferencia electrónica, donde el radical hidroxilo capta un electrón del colorante, generando cationes radicalarios altamente reactivos que sufren fragmentación y mineralización parcial o
E2	El proceso foto-Fenton degrada el colorante mediante una secuencia de reacciones químicas, donde los radicales hidroxilo atacan las moléculas del colorante. Primero, el $\text{Fe(II)}$ reacciona con el peróxido de hidrógeno para producir $\text{Fe(III)}$ y radicales hidroxilo. Luego, estos radicales disocian los enlaces dobles y aromáticos en compuestos menos tóxicos. La radiación ultravioleta regenera $\text{Fe(II)}$ a $\text{Fe(III)}$ , manteniendo el ciclo hasta lograr la mineralización total del contaminante, produciendo $\text{CO}_2$ y demás
E6	Primero, el $\text{Fe}^{2+}$ reacciona con el peróxido de hidrógeno para formar $\text{Fe}^{3+}$ y radicales $\cdot\text{OH}$ , los cuales atacan la estructura aromática del colorante rompiendo sus enlaces. Luego, la radiación ultravioleta reduce nuevamente el $\text{Fe}^{3+}$ a $\text{Fe}^{2+}$ , cerrando el ciclo catalítico y permitiendo que la reacción continúe. De acuerdo con Herney-Ramírez, Vicente y Madeira (2010), este mecanismo permite lograr altas eficiencias de mineralización en tiempos cortos, siempre que se controlen las concentraciones de hierro y el pH del sistema

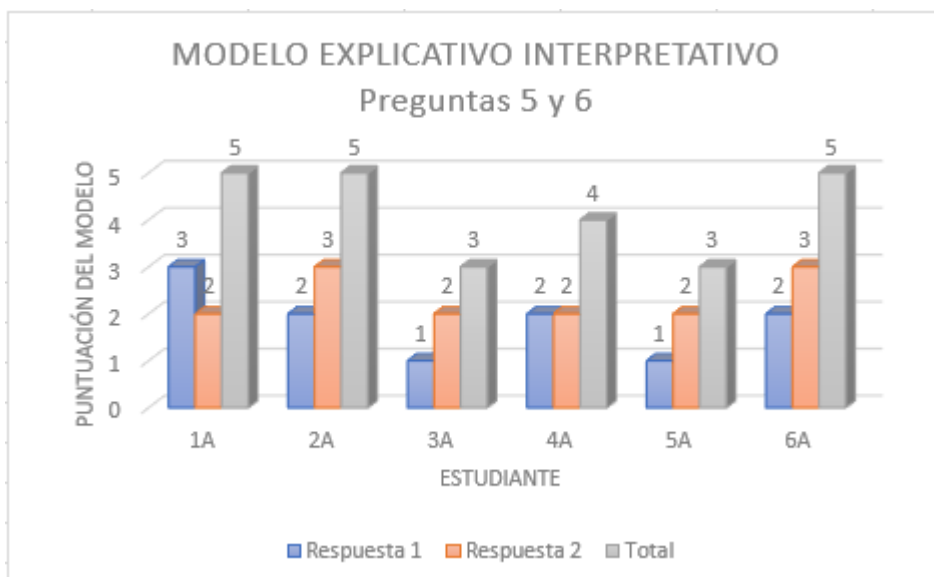
*Nota.* Elaboración propia.

Para este grupo es posible afirmar que los conceptos son bastante claros y dan respuesta a la pregunta planteada inicialmente que atañe a como el proceso foto-Fenton puede degradar el contaminante propuesto, cada uno de los participantes abarca en su totalidad los pasos propuestos por Hincapie-mejía et al. (2011). De este modo, todos los estudiantes dieron respuestas detalladas y a modo general dan cuenta del resumen de los pasos por los que tiene que transcurrir el proceso foto-Fenton para ser exitoso.

El tercer tipo de modelización alude al modelo explicativo de tipo interpretativo es el que amador (2011) describe la composición del fenómeno (en este proceso foto-Fenton), en donde el estudiante hace declaraciones no sobre la naturaleza de este sino también en su distribución espacio temporal; es decir, como los estudiantes recurren a la teoría para explicarlo. De esta manera los resultados expuestos en la Figura 22, dan cuenta del total de la puntuación obtenida por cada uno de los estudiantes en este tipo de modelo explicativo.

### **Figura 22.**

*Gráfica modelo explicativo interpretativo.*



*Nota.* Elaboración propia.

Este tipo de modelo si tiene una reducción sustancial en el total de los puntos obtenidos por cada uno de los estudiantes, pues como se observa, los estudiantes con la mejor calificación no superan los 5 puntos, mientras que, los estudiantes con la calificación más baja rondan los 3 puntos. Estas calificaciones se deben principalmente a la naturaleza del modelo explicativo, pues como se observará más adelante no cumplieron con los requisitos adecuados del modelo explicativo de tipo interpretativo. Debido a la naturaleza de las calificaciones se unirán en grupos el análisis los participantes, sino por el contrario se analizarán individualmente los estudiantes, dando ejemplos concretos cuando se requiera.

En la pregunta número 5 se les pedía a los estudiantes explicar a nivel molecular el comportamiento del colorante púrpura 7 en medio acuático y en su interacción con los radicales hidroxilo; las respuestas de los estudiantes 3, 4 y 6 que tuvieron puntuaciones de 1 punto, 2 puntos y 2 puntos respectivamente, son mostradas en la Tabla 16.

**Tabla 16.***Respuesta de los estudiantes: pregunta número 5*

E3	<i>El colorante púrpura industrial 7 es una molécula estable y es un poco biodegradable. En el medio acuático, los radicales hidroxilos atacan su estructura molecular, especialmente los enlaces que son responsables de su color, rompiendo los enlaces en compuestos más simples y menos contaminantes.</i>
E4	El colorante al disolverse tiende a dispersarse como moléculas cargadas o neutras dependiendo del pH que se presente. Los radicales -OH al ser electrófilos muy reactivos, atacan a los sitios con mayor densidad electrónica, un ejemplo, como los anillos aromáticos o grupos azo (-N=N-), iniciando una serie de reacciones de apertura sobre el anillo y oxidación que terminan formando CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O y otros subproductos inorgánicos.
E6	Inicialmente, cabe aclarar que, a nivel molecular, el colorante púrpura industrial 7 contiene en su estructura molecular anillos aromáticos y grupos azo (-N=N-) y son estos los que le confieren su color intenso y su gran estabilidad química. Estas estructuras permiten que sea muy resistente a la biodegradación. Sin embargo, cuando se expone a los radicales hidroxilo generados en el proceso foto-Fenton, estos radicales atacan los enlaces dobles y los anillos aromáticos, rompiendo las moléculas en fragmentos más pequeños. Según Esplugas (2002), los radicales ·OH reaccionan de manera no selectiva, oxidando casi cualquier tipo de contaminante orgánico. En palabras simples, el radical actúa como una “tijera química” que corta la molécula del colorante, disminuyendo su toxicidad y facilitando su mineralización completa, es decir, la degradación de esta.

*Nota.* Elaboración propia.

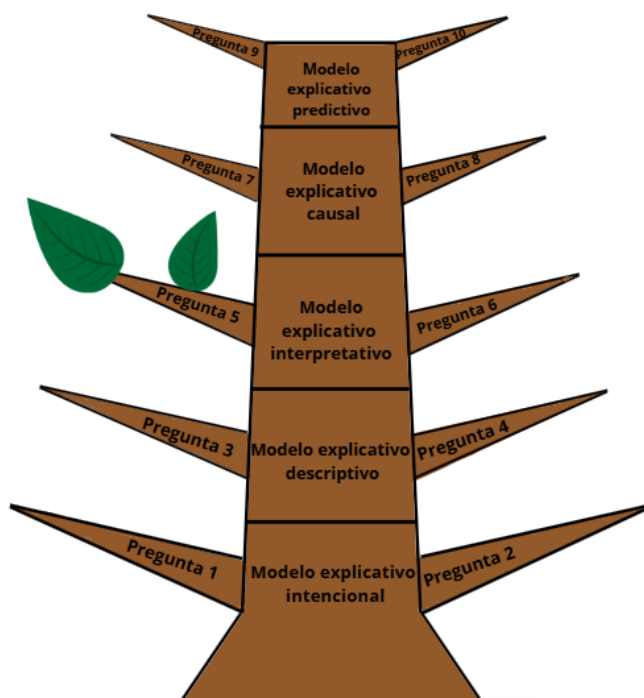
Los colorantes provenientes de la industria textil son sustancias orgánicas que absorben luz e imparten color en el espectro visible gracias a la adhesión del material donde serán aplicadas y a los grupos cromóforos que poseen, aunque su clasificación puede ser variada, en la industria textil predominan los colorantes iónicos debido a la afinidad que tienen con diferentes textiles. Producto a su interacción con el agua y fácil disolución, tiene la capacidad de alterar equilibrios ecológicos, ocasionando la reducción de oxígeno disuelto, también en contacto con humanos o animales irritación en la piel y diferentes tipos de cáncer (Ramírez y Rubio, 2022). Cabe mencionar que su composición puede tener presentes compuestos fenólicos y metales pesados y debido a las ineficiencias de los procesos del teñido el 30% de los efluentes son liberados a la naturaleza, considerándose contaminantes persistentes porque el 90% se resisten a los tratamientos convencionales con lodos activados y tratamientos primarios, siendo recalcitrantes a la acción de depuración con los tratamientos mencionados. (Cortázar Martínez et al., 2019). La sustancia objetivo a través del proceso foto-Fenton tiene una estrecha relación con el radical hidroxilo, como fue mencionada anteriormente, este radical va a degradar al colorante y se generará gracias a su interacción con el ion Fe (II) y la regeneración del ion Fe (III).

El E3 no tiene una aproximación clara acerca del comportamiento molecular del colorante en medio acuático, no menciona ninguna de las características típicas de los colorantes y también menciona “el colorante es un poco biodegradable” aunque, como lo hemos

evidenciado con diferentes autores, los colorantes son sustancias altamente tóxicas y recalcitrantes; por lo que, se puede inferir que la teoría consultada es prácticamente nula; asociado a ello, la explicación aportada sobre la interacción del radical con el colorante de igual manera es deficiente porque únicamente menciona “*los radicales hidroxilo atacan su estructura molecular*” y no escribe más acerca de la interacción. El E4 menciona el comportamiento del colorante en el medio acuático cuando menciona “al disolverse” pues le otorga propiedades fisicoquímicas típicas de una sustancia con la capacidad de formar interacciones con el agua; sin embargo, no describe alguna otra característica y si menciona como el radical hidroxilo se comporta como un electrófilo, lo que no es cierto, es un dador de electrones y debido a este error conceptual su posterior análisis es erróneo. Finalmente, el E6 si bien explica a nivel estructural algunas características de los colorantes no explica su comportamiento en medio acuático de ninguna manera, mientras que su interacción con el radical hidroxilo si parece describirla de mejor manera, aunque, no da cuenta de las especificidades necesarias para explicar esta interacción. De esta manera los árboles correspondientes para los estudiantes E3, E4 y E6 son las Figuras 23 y 24, respectivamente.

**Figura 23.**

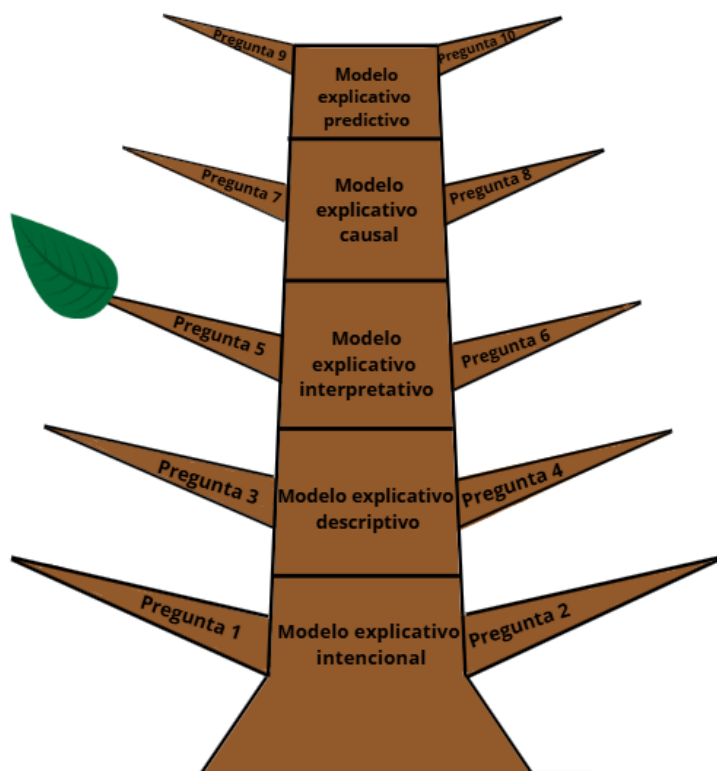
*Árbol de la modelización pregunta 5*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 24.**

*Árbol de la modelización pregunta 5*



*Nota.* Elaboración propia.

Posteriormente, la pregunta 6 pedía a los estudiantes explicar teniendo en cuenta su conocimiento teórico explicar el proceso foto-Fenton teniendo en cuenta su relación con el colorante púrpura 7 y así fueron las respuestas de los estudiantes según la Tabla 17.

**Tabla 17.**

*Respuesta de los estudiantes conforme pregunta 6*

E1	El proceso foto-Fenton consiste en la reacción del ion ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) con el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) en presencia de luz, lo que genera radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), que son especies muy reactivas capaces de degradar contaminantes orgánicos. En este caso, dichos radicales atacan las moléculas del colorante púrpura industrial 7, rompiendo sus enlaces y destruyendo los grupos responsables de su color. La luz además ayuda a regenerar el ion $\text{Fe}^{2+}$ a partir del $\text{Fe}^{3+}$ , permitiendo que el proceso continúe de forma cíclica. Con el tiempo, el colorante se transforma en compuestos más simples como agua, dióxido de carbono y sales inorgánicas, logrando una disminución significativa de la contaminación en el agua.
E2	Según yo, el hierro reacciona con el peróxido de hidrogeno, generando unas particulas muy reactivas a lo que llamamos radicales hidroxilo. Ellas son las responsables de degradar las moleculas del colorante, haciendo que se vuelvan compuestos más simples. Luego la luz UV ayuda a regenerar el hierro haciendo que este continúe de forma cíclica. Así el colorante industrial se va descomponiendo hasta convertirse en sustancias menos contaminantes
E5	Como logro comprender el proceso foto-Fenton, en primer lugar, el ion $\text{Fe}^{2+}$ es oxidado por el peróxido de hidrógeno, mientras que este se reduce; ese electrón que le es removido es aceptado por un ion hidroxilo, pero no se forma el hidróxido de hierro (III), ya que el pH es ácido y eso evita su formación; producto de la disociación del peróxido de hidrógeno se forma un radical hidroxilo que es el encargado de romper los enlaces en el colorante. Honestamente, no sé de qué manera este radical entre a la molécula del colorante, pero lo más probable es que al romper enlaces y moléculas para estabilizarse, forme productos menos tóxicos.

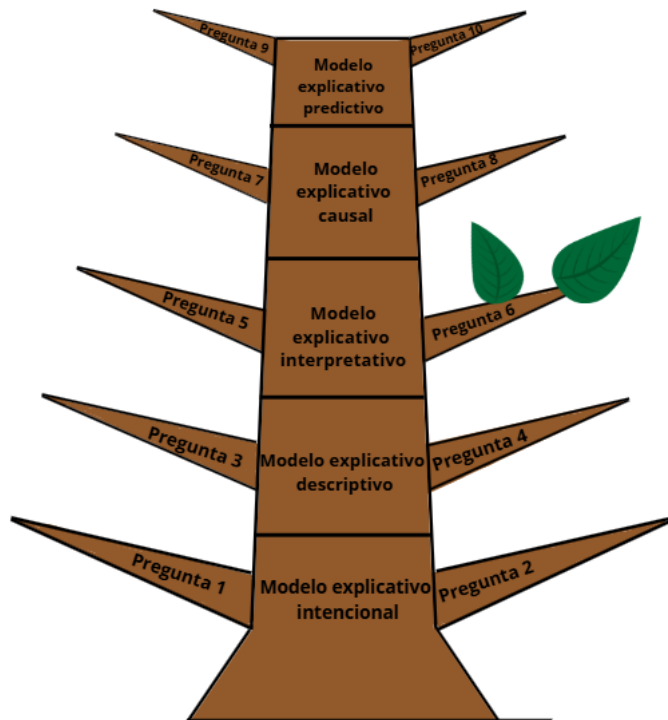
*Nota.* Elaboración propia.

Reconociendo lo descrito por el E1 que menciona parcialmente el desarrollo del proceso foto-Fenton en condiciones de reacción con el colorante púrpura industrial 7; sin embargo, no profundiza mucho en las reacciones que ocurren, describiéndolas superficialmente, de modo que no es posible evidenciar si el estudiante ha contrastado su conocimiento con la teoría puesto que no establece el cambio del fenómeno con respecto al tiempo de reacción; por otro lado, el E2 intenta profundizar en la naturaleza del fenómeno cuando menciona la importancia de la luz UV en las especies del hierro, aunque menciona, “haciendo que este continúe de forma cíclica” sin tener en cuenta la medición espacio temporal de la regeneración del hierro, pues esta no es infinita, de modo que es impreciso sugerir que continuará de forma cíclica, así que deja de lado el cambio del fenómeno respecto al tiempo. Finalmente, el E5 no tiene en cuenta la interacción del  $\text{Fe}^{2+}$  con la luz UV y aduce que la formación del  $\text{Fe}^{3+}$  no es posible por el pH en el que se encuentra el medio y si bien parcialmente el pH es uno de los reguladores de la formación de  $\text{Fe}^{3+}$ , es cierto que la luz UV es la herramienta más fidedigna para este trabajo, luego cuando menciona “Honestamente no se de que manera...” podemos inferir que no hizo una revisión documental previa y por lo tanto es carente de información, impidiendo así alcanzar buenos resultados en torno al modelo explicativo de tipo interpretativo. Los estudiantes tienen en común su falta de revisión documental frente al tema, parámetro básico descrito por Amador (2021) para este tipo de modelo.

De modo que los árboles correspondientes para los estudiantes E1, E2 y E5 que tienen puntuaciones de 2, 3 y 2 respectivamente son los correspondientes a las Figuras 25 y 26.

**Figura 25.**

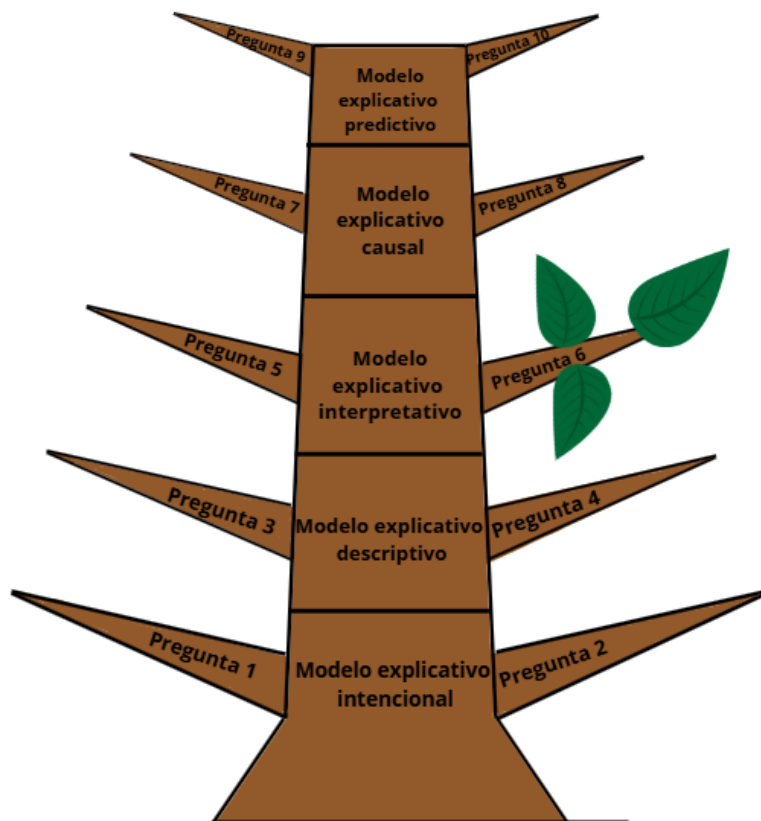
*Árbol de la modelización pregunta 6*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 26.**

*Árbol de la modelización pregunta 6*

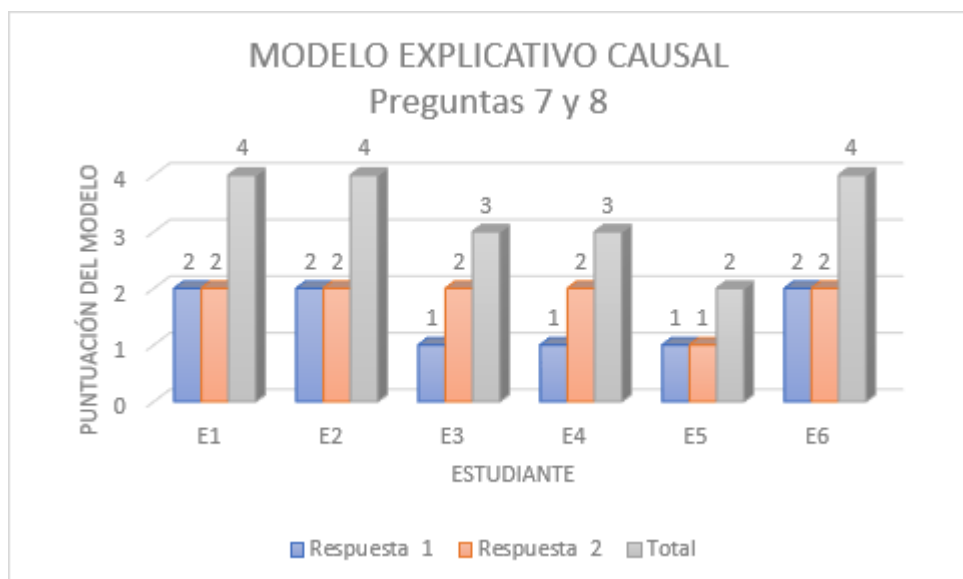


*Nota.* Elaboración propia.

El penúltimo modelo explicativo refiere al tipo causal, que, como su nombre lo indica pretende que los estudiantes expliquen el fenómeno mediante una causalidad, de manera más sencilla, el fenómeno ocurre porque una causa o serie de causas propician su comienzo, entonces el estudiante deberá formular un mecanismo mediante el cual explique el comportamiento que observa por medio de la operación de causa y efecto, explicando sus componentes (Amador et al., 2021) para el análisis de este modelo particularmente, no se agruparan estudiantes debido a la poca variación de puntuaciones obtenidas, por el contrario, se analizará de manera general y expondrán algunos de los casos más llamativos; el puntaje de los estudiantes se puede observar en la Figura 27.

**Figura 27.**

*Gráfica del modelo explicativo causal.*



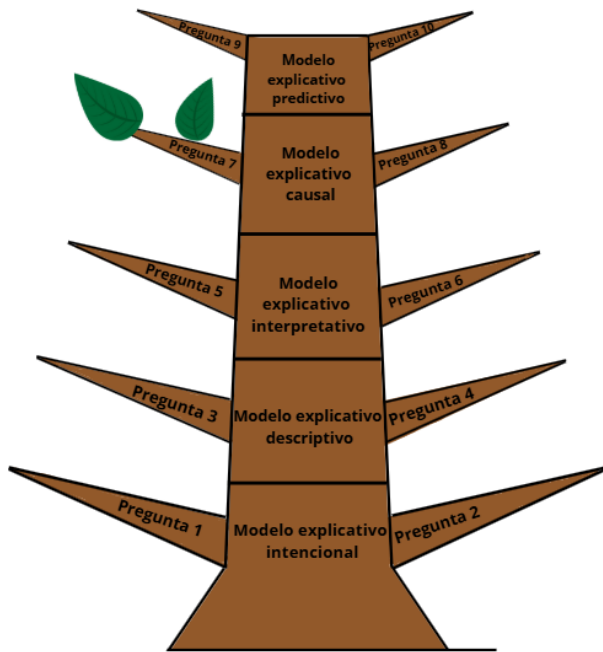
*Nota.* Elaboración propia

La Figura 27, esboza que la pregunta número 1 fue la que obtuvo el puntaje más bajo, comparado con la segunda pregunta; sin embargo, esta diferencia no es significativa ya que los resultados de las dos preguntas (el puntaje total del modelo) es bastante bajo, esto concuerda con los análisis obtenidos por Amador (2021) donde explica que el modelo causal es uno de los menos desarrollados por los estudiantes. De manera que, se esperan resultados bajos en esta tipología de modelo.

Los árboles correspondientes para la pregunta número 7 y teniendo en cuenta que los puntajes solo se encuentran oscilando entre 2 y 1 punto respectivamente, serían los correspondientes a las Figuras 28 y 29.

**Figura 28.**

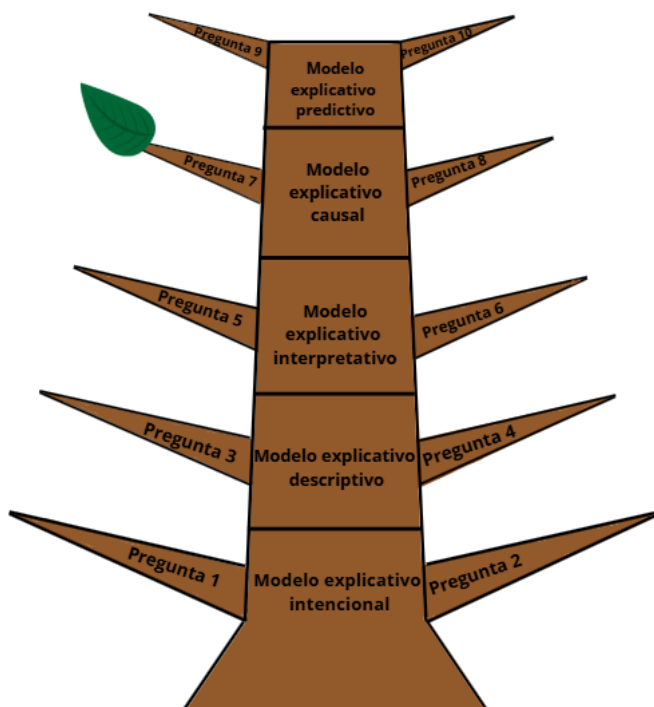
*Árbol de la modelización pregunta 7*



Nota. Elaboración propia.

**Figura 29.**

*Árbol de la modelización pregunta 7*



Nota. Elaboración propia.

A medida que vamos avanzando en la tipología de los modelos explicativos podemos ver como cada vez las ramas de los árboles tienen menos hojas, evidenciando como la puntuación

de los estudiantes ha venido disminuyendo con el pasar de las preguntas y la profundidad de los tipos de modelos.

La pregunta número 7, tenía como objetivo que los estudiantes respondieran las razones por las cuales el proceso foto-Fenton puede degradar al contaminante propuesto (púrpura industrial 7), en ese caso es de vital importancia que se expliquen las causas y efectos que facultan al proceso para la degradación efectiva.

A lo largo del documento hemos hablado sobre las implicaciones y características del proceso foto-Fenton; sin embargo, no se han mencionado los parámetros necesarios para que esta reacción ocurra, entonces según Rubio-clemente et al. (2014) algunos de los parámetros más relevantes para el proceso son: la concentración del agente oxidante y catalizador, la temperatura, el pH, influencia del tipo de contaminante, influencia del tiempo de reacción y presencia de aniones. Inicialmente las concentraciones de  $H_2O_2$  y el ion  $Fe^{2+}$  dependerán del tipo de contaminante que se pretenda degradar, el peróxido de hidrógeno requiere una concentración significativa de la especie de hierro (II); sin embargo, concentraciones muy altas de cualquiera de los dos reactivos podrán limitar el porcentaje de degradación del contaminante, por lo que, será necesaria una intervención en el laboratorio para determinar las cantidades exactas de reactivos.

Igual que las concentraciones iniciales, la temperatura jugará un papel fundamental para la degradación del contaminante y dependerá de la naturaleza del mismo, aunque el proceso foto-Fenton puede darse a temperatura ambiente se recomienda que la temperatura oscile entre los  $25^{\circ}C$  y  $30^{\circ}C$  pues aquí se favorecerá más la generación de radicales hidroxilo y un aumento excesivo de esta limitará la reacción evitando alcanzar el máximo umbral de degradación; el pH representa una característica fundamental para que el proceso foto-Fenton ocurra, algunos estudios relacionan la medida de pH idónea para la generación de radicales hidroxilo en 2.8, no obstante, este valor no es fijo y podrá variar entre 2.5 y 4, pues a condiciones de pH más ácidas se favorecerá la formación de iones oxonio ( $H_3O_2^+$ ) y se verá inhibida la regeneración del catalizador  $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$  y a condiciones muy alcalinas el  $Fe^{2+}$  precipitará en forma de  $Fe(OH)_3$  impidiendo que se lleve a cabo la regeneración del radical, nuevamente, provocando un descenso en la velocidad de reacción.

También el tiempo de reacción influye en tanto los costos de operación son mucho menores, pues el hecho de que el periodo de exposición del contaminante con el peróxido y el ion hierro (II) sea prologando no garantiza una degradación mejor, de hecho, a menores tiempos de exposición se obtienen resultados muy similares comparado con tiempo más largos; El tipo de contaminante y su concentración influirán negativa o positivamente en la velocidad de reacción pues si existen diversos tipos de contaminantes en aguas residuales y están a concentraciones elevadas el número de colisiones entre el contaminante, el peróxido y el catalizador podrá disminuir, ralentizando así la reacción, también, aunque el peróxido de hidrógeno ha sido catalogado como un buen agente oxidante puede no ser efectivo contra algunos tipos de sustancias químicas, sobre todo las que poseen ácidos carboxílicos de cadena corta; finalmente, al emplear el hierro como catalizador se formarán diferentes tipos de aniones de naturaleza orgánica e inorgánica, lo que podrá dificultar la degradación del

contaminante, además que hará más compleja su cuantificación. (Rubio-clemente et al., 2014).

Teniendo en cuenta la información anterior se realizará la comparación con las respuestas suministradas por algunos de los estudiantes en esta pregunta conforme se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 18.**

*Respuesta de los estudiantes pregunta 5*

E1	La aplicación del proceso Foto-Fenton permite una notable reducción de los contaminantes en el agua gracias a la generación de los radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ), especies altamente oxidantes capaces de atacar y degradar compuestos orgánicos complejos. Estos radicales actúan sobre las estructuras moleculares de los contaminantes, rompiendo sus enlaces y transformándolos en productos más simples y menos nocivos. La luz cumple un papel fundamental, ya que favorece la regeneración del ion ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) a partir del férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), asegurando la continuidad del ciclo catalítico.
E3	<i>ocurre porque los radicales hidroxilos que se forman son altamente oxidantes y se rompen las moléculas contaminantes que están presentes en el agua, que luego transforman en compuestos simples como <math>\text{CO}_2</math> y <math>\text{H}_2\text{O}</math>. De igual manera, se disminuye la concentración del colorante y la toxicidad del efluente.</i>
E4	Debido a que el proceso genera radicales oxidantes que destruyen las moléculas contaminantes presentes en el sistema. Estos radicales buscan degradar los compuestos orgánicos complejos, sino que los convierten en productos menos tóxicos o ino cuos y simultáneamente la regeneración constante del catalizador debido a la luz UV asegura la eliminación del contaminante.

*Nota.* Elaboración propia.

Los estudiantes E1, E3 y E4 otorgan cosas en común en sus respuestas, por ejemplo, todos indican la presencia del radical hidroxilo como entidad fundamental para que el proceso foto-Fenton se dé y por consecuencia el contaminante sea degradado efectivamente; sin embargo, solo el E1 menciona la importancia del catalizador como molécula para aumentar la producción de radicales hidroxilo, mientras que E3 y E4 se centran exclusivamente en las sustancias finales al mencionar que “*se transforman en compuestos simples como  $\text{CO}_2$* ” o “*los convierten en productos menos tóxicos o ino cuos*”, la incidencia de la luz UV en el proceso es mencionada de manera muy superficial por E1 y E4, mientras que la influencia de las concentraciones del contaminante solo es mencionada por E3. Ninguno de los estudiantes desarrolla las ideas en torno a el pH, tipo de contaminante, la temperatura, el tiempo de exposición, etc. Como se observó solo uno de ellos habló de la concentración del contaminante, pero lo hizo superficialmente, por lo que no explicó bien las causas ni efectos de este parámetro en el proceso foto-Fenton. Para finalizar es posible añadir que los estudiantes tienen un desempeño bajo o insuficiente en la pregunta número 7 se alude al

modelo explicativo de tipo causal, debido a sus respuestas carentes de argumentos y poca profundidad.

La pregunta número 8 tenía como objetivo determinar las implicaciones de emplear lámpara de rayos UV en el proceso foto-Fenton. Puesto que diferentes trabajos como el de Kanakaraju et al. (2018) se destaca la importancia química del uso de lámparas UV para la puesta en práctica de la fotocatalisis del proceso foto-Fenton, de este modo, es posible afirmar como el proceso Fenton y el proceso foto-Fenton han resultado eficaces para la degradación de contaminantes de diferentes orígenes, como el farmacéutico, se menciona como una de las bondades de emplear el proceso foto-Fenton es la producción rápida de radicales hidroxilo y la fotoreducción de hierro (III), donde dependiendo del tipo de contaminantes se debía irradiar en longitudes de onda entre los 260 nm y los 365 nm. Algunas de las características principales para emplear esta herramienta son la posibilidad de diseñar un ciclo regenerativo de iones  $Fe^{2+}$ , mejorar la eficiencia del proceso reduciendo el tiempo de degradación y la cantidad de reactivos necesarios para su ejecución, también la cantidad de subproducto de lodos de hierro es casi nula comparado con el proceso convencional de Fenton.

Algunas de las respuestas de los estudiantes frente a esta pregunta fueron las mostradas en la Tabla 19.

**Tabla 19.**

*Respuesta de los estudiantes conforme pregunta 6*

E2	La lámpara UV tiene varias implicaciones positivas = acelera la reacción regenerando el hierro (II) y aumentando la producción de radicales hidroxilo. Esto ayuda a mejorar la velocidad de degradación del contaminante; sin embargo, también quiere decir que implica un mayor consumo energético y requiere un control cuidadoso de la intensidad y tiempo de exposición
E5	El único que logro comprender es una reacción de reducción, en el que el hierro (III) se reduce a hierro (II) nuevamente, esto, con el fin de formar de nuevo el catalizador.
E6	Dentro de las implicaciones por el uso de la lámpara ultravioleta, es fundamental porque proporciona la energía necesaria para que la reacción sea más rápida y eficiente. Gracias a la radiación ultravioleta, el ion $Fe(III)$ se reduce nuevamente a $Fe(II)$ , manteniendo el ciclo catalítico activo. Según Herney-Ramírez (2010) la incorporación de luz ultravioleta puede aumentar hasta en un 50% la velocidad de degradación

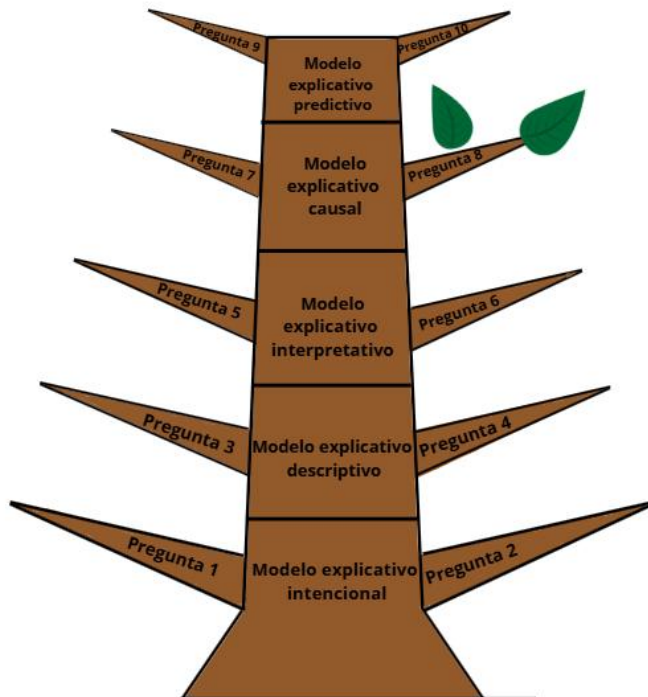
*Nota.* Elaboración propia.

Los estudiantes aluden a características similares en sus respuestas, pues los 3 mencionan una de las principales bondades de la lámpara UV que es la regeneración del ion  $Fe^{2+}$  a partir del ion  $Fe^{3+}$ , convirtiéndolo en un ciclo regenerativo, así como lo menciona E2 “*acelera la reacción regenerando el hierro (II)*”, solo el E6 menciona de manera muy superficial que el uso de una lámpara de rayos mejora la eficiencia de la reacción; sin embargo, no menciona la razones de esto, como puede ser la disminución de reactivos, por su parte, E5 no aclara

ninguna otra causa adicional a la regeneración del ion fotocatalítico. En definitiva, ninguno de los estudiantes dio cuenta de más de dos causas del empleo de la luz UV, lo que podríamos clasificar como un desempeño insuficiente en el mejor de los casos para el modelo explicativo de tipo causal. Finalmente se presentan los árboles correspondientes para los estudiantes E2, E5 y E6 correspondientes con las Figuras 30 y 31.

**Figura 30.**

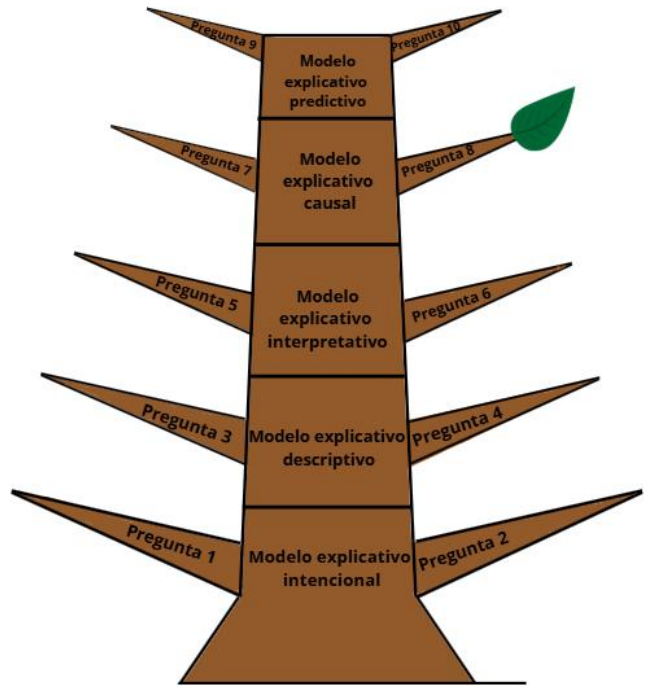
*Árbol de la modelización pregunta 8*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 31.**

*Árbol de la modelización pregunta 8*

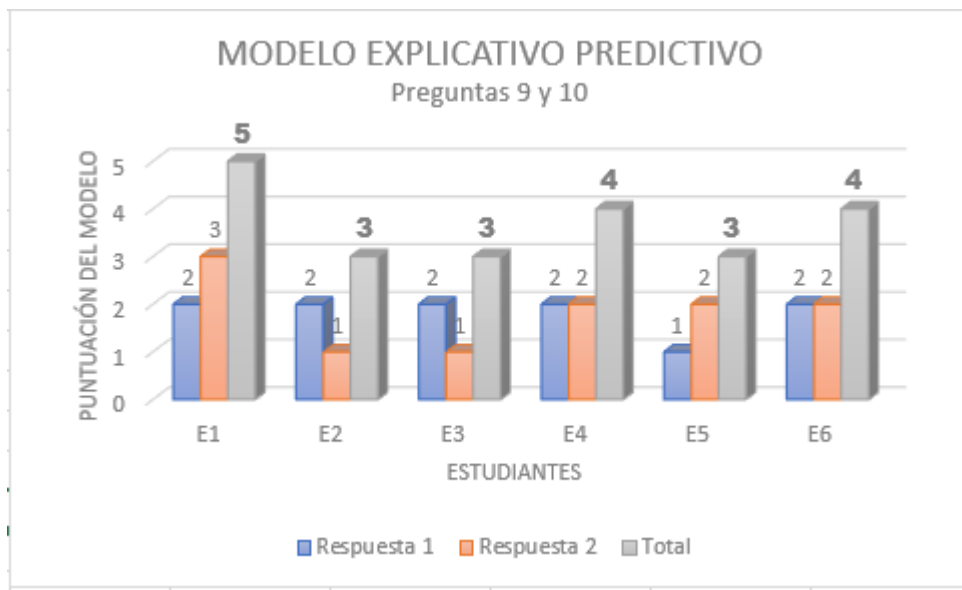


*Nota.* Elaboración propia.

El último modelo es el explicativo de tipo predictivo que en palabras de Amador et al. (2021) el estudiante debe estar en la capacidad de realizar predicciones del comportamiento del fenómeno a futuro, porque se parte de la idea de que el fenómeno puede ser diferente al conocido en el futuro, pero el modelo debe permitir la toma de decisiones y la posterior explicación de estos cambios. En este caso, se varían las características comunes del proceso foto-Fenton y el estudiante deberá describir que ocurriría si estas variaciones se presentaran. Las respuestas de los estudiantes son similares, por lo que como consecuencia las puntuaciones serán igualmente parecidas y el análisis se efectuará de manera general. La siguiente gráfica (Figura 32) expone los resultados de los estudiantes y sus respuestas por pregunta individual

**Figura 32.**

*Gráfica del modelo explicativo predictivo*



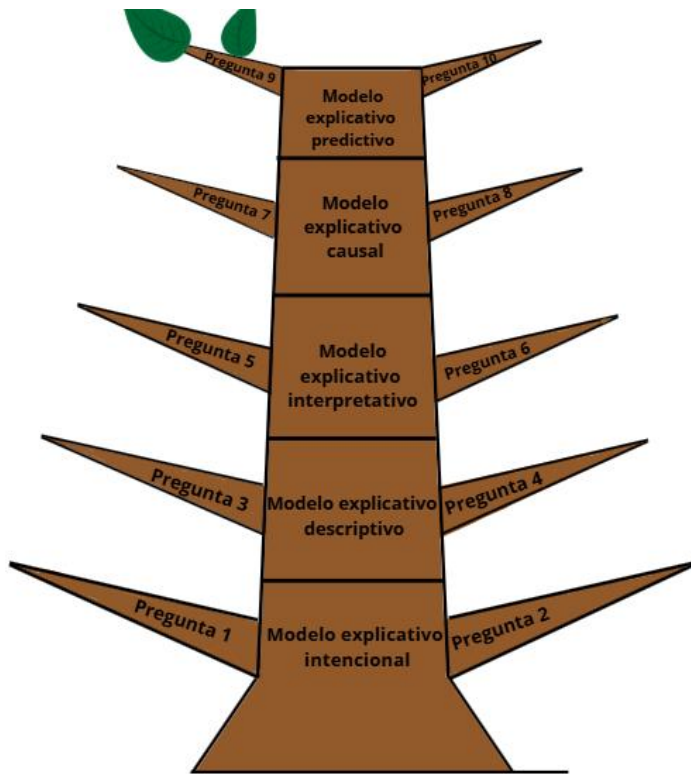
*Nota.* Elaboración propia.

Los resultados obtenidos son sustancialmente más bajos que los dos primeros modelos (intencional y descriptivo) y esto se puede correlacionar con los resultados obtenidos por Duque (2024) donde los estudiantes refieren mejores resultados en los dos primeros modelos comparados con los últimos 3. Para la pregunta número 9 se les pidió hablar acerca de los posibles escenarios que ocurrirían en el proceso foto-Fenton si se variaran los puntajes de pH a 2, 6 y 12.

Como se mencionó anteriormente gracias al estudio de Rubio-clemente et al. (2014) al variar los niveles de pH de los óptimos recomendados (2,6-4) pueden ocurrir varias cosas, al ser un pH inferior a 2,6 se favorecerá la formación de iones oxonio ( $H_3O_2^+$ ) y se verá inhibida la regeneración del catalizador  $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$  y a condiciones muy alcalinas (superiores a 4) el  $Fe^{2+}$  precipitará en forma de  $Fe(OH)_3$  impidiendo que se ejecute el proceso foto-Fenton. Todos los estudiantes sacaron un puntaje de 2 (insuficiente) excepto el E5 que obtuvo 1 (bajo) como se evidencia en sus respectivos árboles, correspondientes con las Figuras 33 y 34.

**Figura 33.**

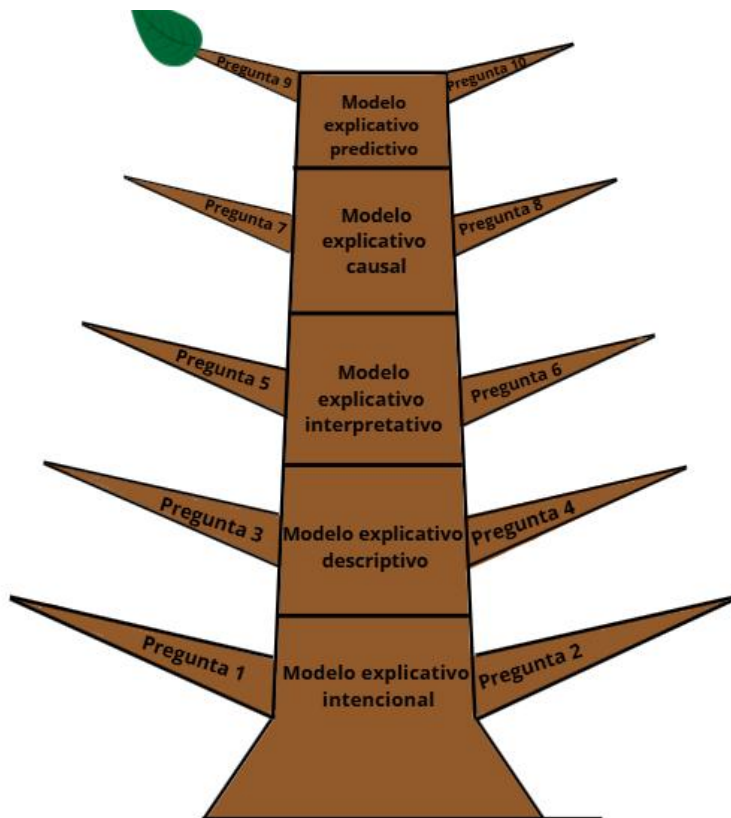
*Árbol de la modelización pregunta 9*



Nota. Elaboración propia.

**Figura 34.**

*Árbol de la modelización pregunta 9*



Nota. Elaboración propia.

La puntuación baja de los estudiantes se debe principalmente a su profundidad en los argumentos expuestos, algunas respuestas fueron mostradas en la Tabla 20.

**Tabla 20.**

*Respuestas de los estudiantes conforme pregunta 9*

E6	Inicialmente, si se ajusta el pH a 2, debemos esperar una mayor eficiencia del proceso, ya que en medios ácidos el hierro se mantiene soluble y disponible para reaccionar con el peróxido. Si se ajusta al pH 6, parte del hierro comienza a precipitarse como hidróxido férrico que, en cuestiones organolépticas, las podemos observar de una coloración amarilla o naranja, lo que reduce la formación de radicales. Si se ajusta al pH 12, la reacción prácticamente se detendría porque el hierro se precipita completamente y el peróxido se descompone sin generar $\cdot\text{OH}$
E3	pH 2: La reacción es mucho mas eficiente; el $\text{Fe}^{2+}$ siguen siendo soluble y los radicales se forman fácilmente. pH 6: Se disminuye la eficiencia, ya que el $\text{Fe}^{3+}$ se precipita como hidróxidos. pH 12: El proceso prácticamente se retrae; el peróxido de hidrógeno se descompone y los iones $\text{Fe}^{2+}$ se precipitan completamente
E2	Considero que el pH es un factor crucial, A pH 2 el preco foto-Fenton es más eficiente porque el hierro (II) y el $\text{H}_2\text{O}_2$ reaccionan eficamente, generando radicales hidroxilo. A pH6, la eficiencia disminuye porque el hierro tiene a precipitar como hidroxidos, reduciendo la posibilidad y disponibilidad del catalizador. A pH 12 el proceso practicamente no ocurre ya que el peroxidode hidrogeno se descompone rapidamente y el hierro se encuentra en formas insolubles

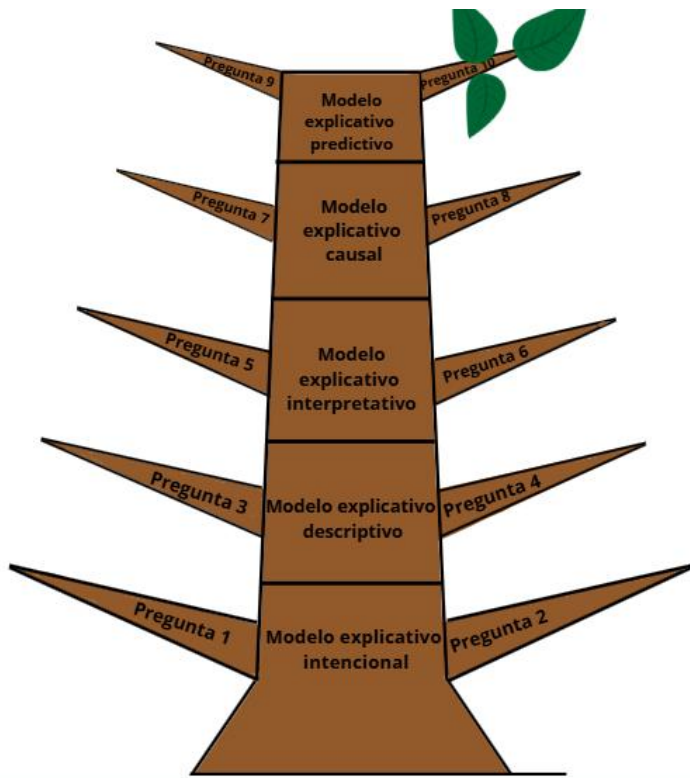
Nota. Elaboración propia.

De manera general a pH 2 la reacción será completamente eficiente; sin embargo, no es así, de hecho, a ese pH la reacción será ineficiente debido a la aparición de iones oxonio, por otro lado también mencionan que a pH 6 la reacción podrá verse afectada, pero continuará en ejecución y como se mencionó anteriormente, en pH superiores a 4 la reacción prácticamente se detendrá debido a la generación e interferencia de moléculas como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Finalmente mencionan que a pH 12 la reacción no tendrá lugar, lo cual es cierto. Por la falta de profundización y los errores conceptuales es posible mencionar que tienen insuficiencias al describir el modelo explicativo de tipo predictivo.

Finalmente, para la pregunta número 10 los estudiantes debían predecir que ocurría con las concentraciones de sulfato de hierro se duplicaban de las establecidas inicialmente, se analizaron los datos de los estudiantes E1, E4 y E5, con puntuaciones de 3, 2 y 2, respectivamente sus árboles serán los correspondientes con las Figuras 35 y 36.

**Figura 35.**

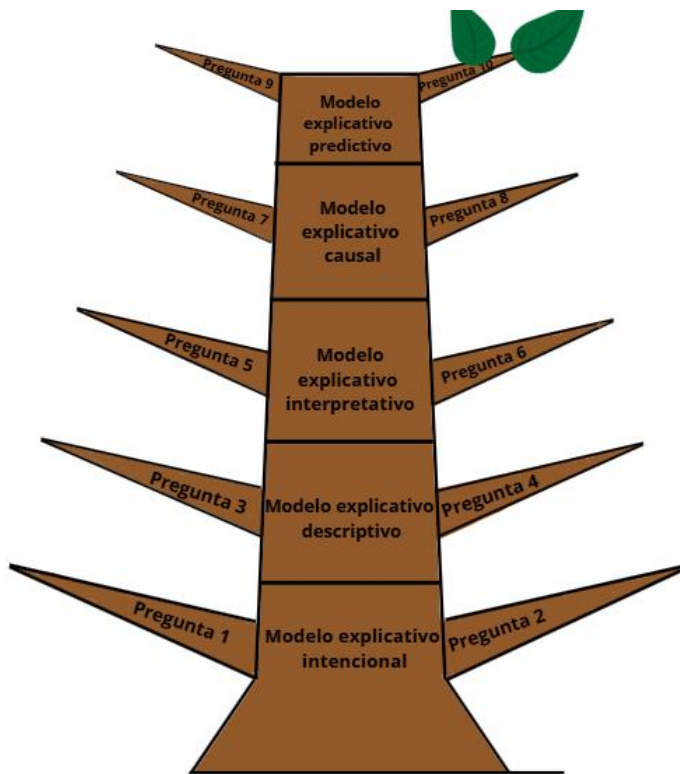
*Árbol de la modelización pregunta 10*



Nota. Elaboración propia.

**Figura 36.**

*Árbol de la modelización pregunta 10*



Nota. Elaboración propia.

Según Rubio-clemente et al. (2014) las concentraciones idóneas del sulfato de hierro son distintas dependiendo de cada especie contaminantes; sin embargo, por regla general las concentraciones inician en 25 ppm a 30 ppm; al aumentarlas limitarán la acción degradante del contaminante porque favorecerán las reacciones secundarias  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$  y su posterior cuantificación sería más compleja, aunque hacen énfasis en la necesidad de realizar estudios individuales dependiendo del tipo de contaminante a degradar. De esta manera, algunas de las respuestas de los estudiantes fueron las mostradas en la Tabla 21.

**Tabla 21.**

*Respuestas de los estudiantes conforme pregunta 10*

E1	<p>Si la concentración de sulfato de hierro (<math>FeSO_4</math>) se duplica, el proceso Foto-Fenton puede verse afectado de manera significativa. Aunque el hierro actúa como catalizador esencial para la generación de radicales hidroxilo (<math>\cdot OH</math>), un exceso de este ion puede provocar efectos negativos en la eficiencia del sistema.</p> <p>Un aumento en la cantidad de hierro favorece inicialmente la producción de más radicales <math>\cdot OH</math>, pero también incrementa la posibilidad de que estos radicales sean consumidos por el exceso de <math>Fe^{2+}</math>, reaccionando de forma no deseada y reduciendo su disponibilidad para oxidar los contaminantes. Además, concentraciones elevadas de hierro pueden generar turbidez en el medio y una mayor formación de lodos férricos, complicando la separación y el tratamiento posterior del agua.</p>
E4	<p>Un exceso de <math>Fe^{2+}</math> puede tener un efecto inhibitorio, ya que los iones <math>Fe^{2+}</math> pueden reaccionar con los radicales <math>\cdot OH</math>, consumiéndolos y reduciendo la eficiencia global. Además, puede generar un aumento en la turbidez del medio y en la formación de lodos férricos, complicando el tratamiento posterior del agua.</p>
E5	<p>Supondré que se empezarán a formar muchos subproductos, ya que, incluso la reducción del hierro con la lámpara UV favorece la producción de radicales hidroxilo, lo que hará que estos reaccionen con otras especies presentes en el medio, alterando más aún otros parámetros fisicoquímicos como el pH.</p>

*Nota.* Elaboración propia.

Los estudiantes aducen al aumento en las concentraciones de sulfato de hierro traducirá en una carga desproporcionada del reactivo provocando como lo menciona E4 “*un efecto inhibitorio*” lo que impedirá el correcto desarrollo del proceso foto-Fenton; sin embargo, ninguno de los estudiantes menciona las condiciones de concentración óptimas para iniciar la reacción ni los estudios requeridos dependiendo del contaminante. Cabe mencionar que E1 describe “*la generación de lodos férricos, lo que complicaría la separación y posterior tratamiento del agua*” aproximándose sustancialmente a una predicción correcta de los cambios de concentración de sulfato de hierro. De este modo, los estudiantes E4 y E5 no muestran las características necesarias para cumplir con un modelo explicativo de tipo

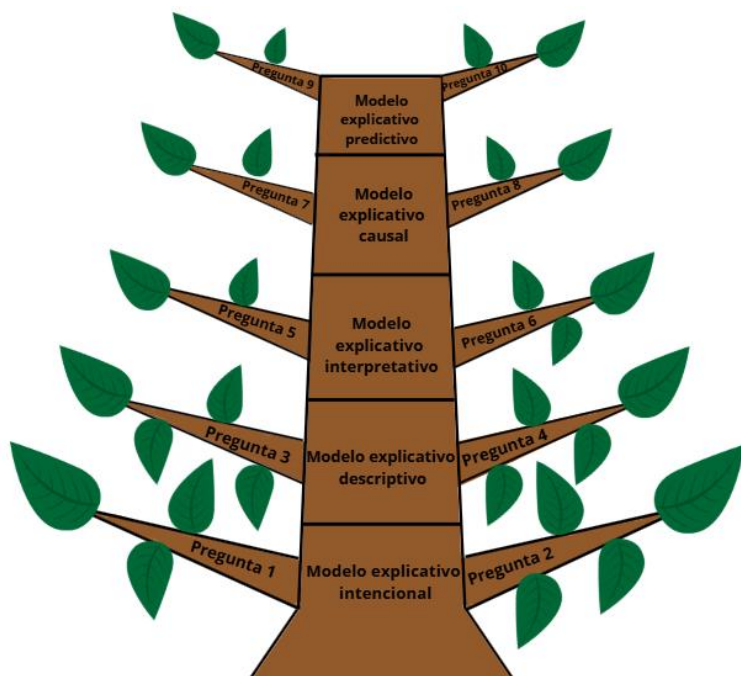
predictivo, por lo que se les clasifica en insuficiente, mientras que E1 si cumple con las características básicas del modelo, entonces se clasifica con un nivel aceptable.

El árbol con todas sus ramas llenas da cuenta de un estudiante con todas las características necesarios abarcando toda la tipología de los modelos explicativos; es decir, está en la capacidad de generar cualquier tipo de modelo explicativo.

Por su contraparte, el estudiante con mejor puntaje en los modelos fue E6 con 28 puntos totales de 40 posibles, observándose como se mencionó anteriormente carencias en los modelos explicativos de tipo interpretativo, causal y predictivo, entonces la representación de su árbol se observa en la Figura 37.

**Figura 37.**

*Árbol de la modelización explicativa general*



*Nota.* Elaboración propia.

## **8.4. ANÁLISIS DEL PROCESO DE MODELIZACIÓN**

### **8.4.1. Rúbrica I - Diagnóstico de los Procesos de Modelización.**

El primer instrumento propuesto para esta fase, al tener el objetivo de evaluar cómo el estudiante realiza el proceso de modelización, se estructuró incluyendo las Rúbricas I y II para, diagnosticar los procesos de modelización, y evaluar el modelo que proponen, cuya finalidad sea evaluar esa transición del modelo mental al modelo conceptual, o modelización, como lo menciona Adúriz e Izquierdo (2009) al ser el proceso de creación de modelos científicos originales, novedosos, respecto del cuerpo del conocimiento establecido en un determinado momento histórico. Para esta sección se tendrá en cuenta la Rúbrica I, la cual se compone de tres ejes estructurantes: Observación e iniciación, representación inicial, e

integración de la teoría; los cuales sirvieron como base para el análisis. Los ejes uno y tres contaban con una serie de preguntas que orientaban la respuesta del estudiante hacia el eje puntual, mientras que el segundo eje sólo establecía los parámetros para el análisis del modelo mental que proponían en un primer momento. En la Tabla 22, se muestran los ejes con sus respectivas preguntas.

**Tabla 22.**

*Ejes estructurantes de la Rúbrica I con sus respectivas preguntas o enunciados*

Eje	Preguntas/enunciados
Observación e iniciación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Qué pudo observar, y bajo qué propiedades?</li> <li>• ¿Cómo podría dar una explicación a lo ocurrido?</li> <li>• ¿Por qué cree que el fenómeno ocurre de esa manera?</li> </ul>
Representación Inicial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construya su propia representación sobre lo que cree, ocurrió en el fotoreactor. La representación puede ser a través de dibujos, esquemas, ecuaciones, maquetas, etc.</li> </ul>
Integración de la Teoría	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Por qué el fenómeno (oxidación avanzada, fotocatalisis,) ocurre en el fotoreactor?</li> <li>• ¿Qué implicaciones conlleva el uso de las diferentes sustancias químicas?</li> <li>• ¿Cómo interactúan estas sustancias?</li> </ul>

*Nota.* Elaboración propia.

Por otra parte, y continuando con la idea de la representación de tipo de árbol propuesta en la Fase 2, se propone para ejemplificar, o representar la modelización que se tuvo en estas dos primeras partes del Instrumento mediante la analogía a unas raíces, ya que Nersessian (1992) considera que el modelo mental es un nivel de análisis intermedio entre el fenómeno y el modelo conceptual resultante. De esta manera, las raíces vienen siendo aquellas bases que sustentan los diferentes modelos explicativos que se evidenciaron en los participantes, por lo que están relacionadas al nivel de profundidad por cada criterio, categorizándose como poco pronunciada, pronunciada y muy pronunciada. En la Tabla 23 se clasifican y denotan lo pronunciadas que pueden estar las raíces respecto con el nivel de profundidad en cada criterio.

**Tabla 23.**

*Categorización de la raíz de acuerdo con el nivel de profundidad de cada criterio*

Nivel de profundidad	Raíz
Bajo	Poco pronunciada
Medio	Pronunciada
Alto	Muy pronunciada

*Nota.* Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los ejes para el diagnóstico de los procesos de modelización, se dispone de la Tabla 24 para desglosar el análisis pertinente. Además, se muestra en el Anexo E los indicadores para establecer el nivel de profundidad con el que se diagnostica el proceso de modelización conforme lo expuesto en la subfase metodológica. En conjunto, como se menciona en la Fase 2, los análisis que se realicen son de carácter personal, por lo que la Tabla 24 corresponde con los resultados obtenidos por medio de la Rúbrica del estudiante 1 (E1).

**Tabla 24.**

*Diagnóstico del Proceso de Modelización para el estudiante 1*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Observación e iniciación			X
Representación Inicial			X
Integración de la Teoría			X

*Nota.* Elaboración propia.

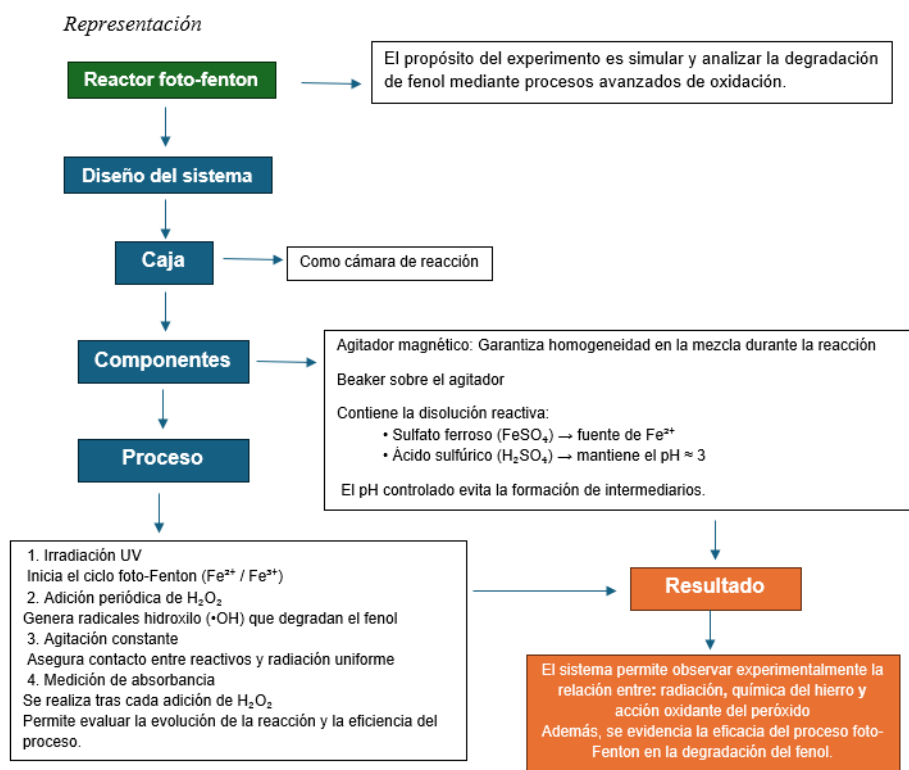
Teniendo en cuenta las respuestas dadas por el E1, que se muestran en la Tabla 24, es posible darse cuenta de que, según la modelización que desarrolla, hay una alta profundidad, pues, por ejemplo, en el primer criterio describe las observaciones macroscópicas e intenta vincularlas inmediatamente a las propiedades químicas, ya que presenta frases como la siguiente:

*“La reacción demostrada en el reactor foto-Fenton se debe a la formación de radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), que son especies muy reactivas capaces de degradar los contaminantes presentes en la solución. Estos radicales se generaron a partir de la reacción entre el peróxido de hidrógeno y los iones  $\text{Fe}^{2+}$  del sulfato ferroso, y la luz UV ayudó a mantener ese ciclo entre  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  activo todo el tiempo, permitiendo que siguieran formándose más radicales.”*

En sí, se observa una idea general sobre lo que ocurre, incluyendo las diferentes especies químicas, y trayendo a colación lo que observó frente a lo que puede ocurrir en la interacción de las especies; intentando mostrar un mecanismo o una relación causa-efecto entre los componentes. Define muy bien su porción de mundo, y le confiere las características estructurantes propias para explicar lo que ocurre, a lo cual, se revisa y se relaciona con los fundamentos de Gutiérrez (2004) al señalar que una primera representación mental del sistema físico que se quiere modelizar consiste en imaginar las entidades que lo constituyen y sus propiedades. Asimismo, el uso del lenguaje, al precisar con exactitud los conceptos involucrados presentes, como “reactor foto-Fenton” o “cada vez que se agregaba el peróxido de hidrógeno desde la bureta, se podía notar una variación en la absorbancia”

**Figura 38.**

*Esquema realizado por el E1*



*Nota.* Elaboración propia.

Con respecto a la representación inicial, el estudiante realizó un esquema a modo de modelo mental, en primera instancia, del cómo creía que ocurría a nivel micro o atómico molecular el fenómeno presente en el fotoreactor (Figura 38). En esta, se observa las diferentes relaciones entre conceptos que realiza, partiendo de una columna central la cual simula el fotoreactor propuesto (Fase 1), de las que se desprenden las reglas de inferencia o funcionamiento (Caamaño, 2011) del fenómeno a modelizar.

Para el caso del estudiante 2 (E2), también se analizaron los resultados de la Rúbrica I. En la Tabla 25, se muestra el resultado obtenido, en donde se evidencia una distinción en cuanto a la cantidad y calidad de información suministrada en la construcción del modelo mental.

**Tabla 25.**

*Diagnóstico del Proceso de Modelización para el estudiante 2*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Observación e iniciación		X	

Representación Inicial	X
Integración de la Teoría	X

*Nota.* Elaboración propia.

Considerando las respuestas del E2, mostradas en la Tabla 25, es pertinente observar el carácter de profundidad media en el criterio de observación e iniciación. Este nivel, corresponde con que describe el fenómeno y menciona algunos reactivos, pero la explicación causal es intuitiva o contiene errores conceptuales. En general, se rescata el siguiente fragmento:

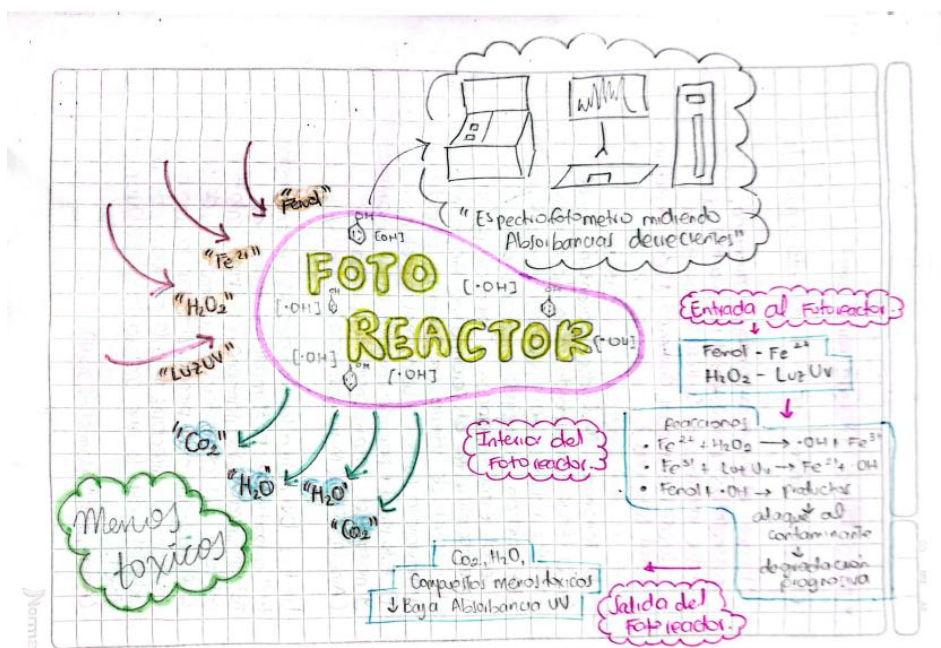
*“Creo que lo que ocurrió en el fotoreactor fue una secuencia de reacciones donde el hierro y el peróxido de hidrógeno (generado) generaron radicales muy reactivos que empezaron de cierta manera a descomponer el fenol. La luz UV no solo acelera el proceso, sino que permitió que el sistema se mantuviera activo regenerando el catalizador”*

Se observa cómo hay un intento de describir mediante conceptos o ideas clave el fenómeno que ocurre, presentando mediante un escrito las reacciones e interacciones entre sustancias; sin embargo, no hay detalle ni precisión al afirmar los productos de reacción, ni las identidades específicas que componen el sistema. Define muy bien la porción de mundo que desea modelar, pero al conferirle las características que lo componen no hay un correcto uso del lenguaje, pues falla al no mencionar la presencia de los radicales hidroxilo ( $^{\circ}\text{OH}$ ) trabajados en el instrumento de la Fase 1, asimismo como su notable participación en la oxidación de la gran mayoría de sustancias orgánicas (Harkirat et al, 2019). En general, hace alusión al proceso fotocatalítico al afirmar la acción que tiene la luz UV con la regeneración del catalizador, pero se presenta la falencia de no incluir el proceso de oxidación avanzada.

Ahora bien, con respecto a la representación inicial, el estudiante realizó una representación gráfica, similar a la forma de esquema, como modelo mental (Figura 39). En este modelo se observan las relaciones entre conceptos que realiza, partiendo de un concepto central, y ejemplificando el montaje experimental; en conjunto hace una división entre tres secciones del proceso. En general, hay presencia de reacciones químicas, e integración entre la oxidación avanzada y la fotocatalisis, por lo que describe muy bien el proceso desde los reactivos hasta los productos. Aun así, resulta particular cómo el modelo integra elementos que no se especifican con la respuesta a las preguntas que conforman el primer criterio de la rúbrica, por lo que, hubo una discordancia entre la forma de responder las preguntas y la propuesta del modelo mental.

### **Figura 39.**

*Representación realizada por el E2*



Nota. Elaboración propia.

En el estudiante 3 (E3), se evidenció un modelo mental más limitado en cuanto a sus propios conocimientos previos, obteniendo en el primer y segundo criterio una profundidad media. En la Tabla 26 se muestra el resultado obtenido tras sus respuestas de las dos primeras partes del instrumento.

**Tabla 26.**

*Diagnóstico del Proceso de Modelización para el estudiante 3*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Observación e iniciación		X	
Representación Inicial		X	
Integración de la Teoría			X

Nota. Elaboración propia.

Considerando las respuestas del E3, mostradas en la Tabla 26, es pertinente analizar la relación causal que hubo entre los dos primeros criterios y su nivel de profundidad. Se observa en las respuestas dadas, en la primera parte, la integración de datos obtenidos mediante la práctica de laboratorio, proponiendo una Tabla (Anexo C) a modo de exponer el decaimiento de las absorbancias producto de la degradación del fenol, ya que, en los análisis

espectrofotométricos, se midió la absorbancia a cierta longitud de onda específica para hacer seguimiento a la sustancia problema como se expone en la Fase 1; sin embargo, no hay una interrelación entre esta Tabla y las diferentes reacciones que ocurren, por lo que se presenta esta información de forma aislada. Aun así, se observa que, en cuanto a la oxidación avanzada y fotocatalisis, sí hay interrelación, resaltando el siguiente fragmento:

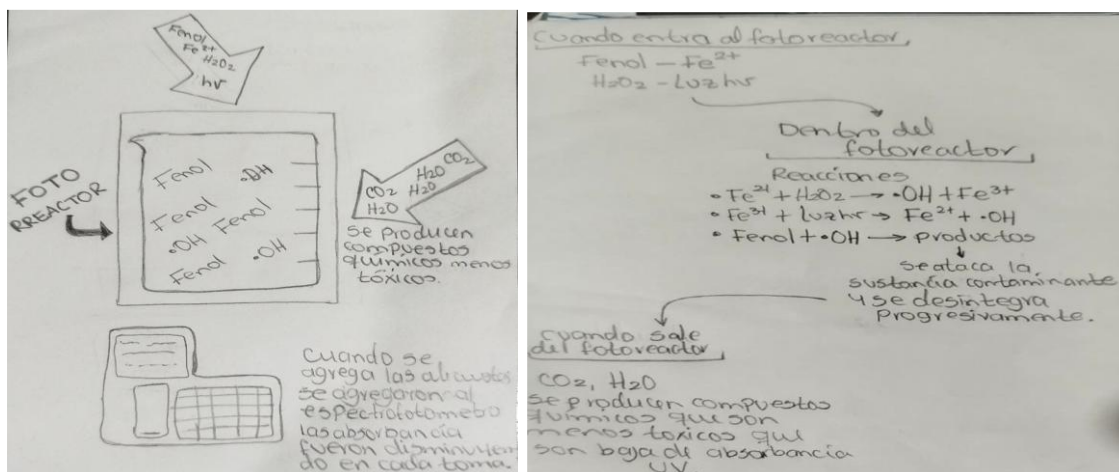
*“El fenómeno que se observó se explica por la reacción ocurrida entre el ion ferroso ( $Fe^{2+}$ ) y el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), el cual origina radicales hidroxilos ( $\bullet OH$ ) de alta reactividad. Estos radicales hidroxilos atacan las moléculas de fenol rompiendo sus enlaces aromáticos y produciendo intermediarios oxigenados que, con el tiempo, se van degradando completamente. La exposición a la luz UV-vis favorece la reducción fotocatalítica del ion férrico ( $Fe^{3+}$ ) a ferroso ( $Fe^{2+}$ )”*

En las respuestas hay una explicación coherente de cómo interactúan las sustancias, para que en conjunto se dé el proceso foto-Fenton. Se evidencia claridad con respecto a las moléculas participantes, pero falla en la integración con los datos obtenidos en el laboratorio. Esto es un aspecto por resaltar, debido a que el estudiante tiene muy bien establecido la porción de mundo que caracterizó por las reacciones químicas, pero no hizo la extrapolación frente a la razón por la cual se usaba el equipo de espectrofotometría para las mediciones de las concentraciones del fenol, demostrado en la Fase 1.

En cuanto a la representación inicial, se observa en la Figura 40, cómo a la representación del montaje le hace falta la lámpara, pieza clave pues Garisado (2024) menciona que el peróxido en presencia de la luz UV produce los radicales hidroxilo clave, mientras que Ameta (2021) hace referencia a la fotoreducción del hierro precipitado como hidróxido. En lo que respecta a lo demás, se presenta una visión tanto macroscópica como atómica-molecular, en tres momentos diferentes; sin embargo, la representación incluye los componentes principales del sistema, pero sin mostrar interacción o relación causal, ya que precisamente no hay evidencia de dónde proviene la luz UV que se irradia.

**Figura 40.**

*Representación del fotoreactor por parte del E3.*



Nota. Elaboración propia.

Ahora, por parte del estudiante 4 (E4), se evidencia el nivel bajo de profundidad a la hora de caracterizar y modelizar el fenómeno, según se diagnosticó mediante la Rúbrica respectiva (Tabla 27). En la caracterización se limita a describir lo que creía, sucedía; mientras que, en el modelo propuesto, no hay inclusión de sustancias clave.

**Tabla 27.**

*Diagnóstico del Proceso de Modelización para el estudiante 4*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Observación e iniciación	X		
Representación Inicial	X		
Integración de la Teoría		X	

Nota. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta las respuestas precisadas por el E4, se debe considerar el análisis por criterio. En el primero, la caracterización no ahonda más allá de lo que se ve, y no se presenta el intento por explicar lo que ocurre de manera coherente, a lo cual se resaltan imprecisiones como las del siguiente fragmento:

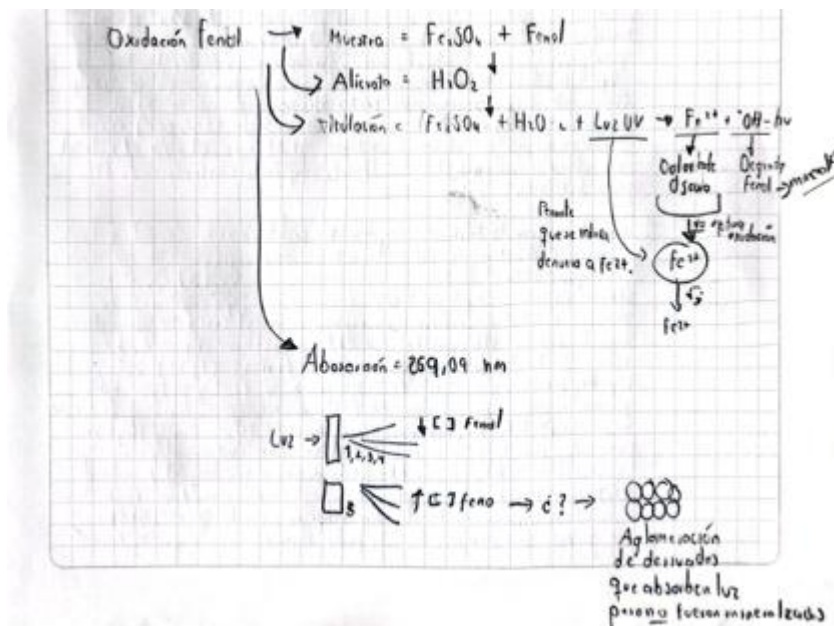
*“Antes de realizar la titulación, la muestra problema se le “fenol + FeSO<sub>4</sub>” se le concede al sistema un pH ácido a través de la agregación de un ácido fuerte como lo es el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.”*

Si bien se utilizó una bureta como instrumento para dosificar el volumen de peróxido de hidrógeno a cierto caudal, no es coherente que se mencione el procedimiento de titular, ya que no se busca determinación cuantitativa de múltiples mensurandos. (Morales et al, 2019). Además, no hay una correcta sintaxis en el texto, pues no se articulan los conceptos, no hay relación entre la oxidación avanzada y la fotocatalisis, ni se explica por qué hubo en la última medición un aumento en la absorbancia. En sí, la porción de mundo a caracterizar está bien definida, hay ciertas imprecisiones en cuanto la naturaleza de este, y del cómo interactúan las sustancias.

Por otra parte, si se refiere a la representación inicial, se observa en la Figura 41 que no se llega a precisar en un nivel más allá del macroscópico, ya que el esquema presentado intenta explicar más el comportamiento de la posible sustancia que absorbe en la longitud de onda que se realiza el estudio.

**Figura 41.**

*Representación del proceso foto-Fenton por parte del E4*



Nota. Elaboración propia.

En el estudiante 5 (E5), se evidenció, bajo el primer criterio, un nivel de profundidad medio, y en el segundo criterio, un nivel de profundidad alto. Es de resaltar estos aspectos, pues la caracterización del fenómeno debe estar acompañado de un modelo mental que represente aquello que el estudiante quiera modelar, por lo que debe haber una relación entre los niveles de profundidad. En la Tabla 28 se evidencian los niveles de profundidad correspondientes con cada criterio.

**Tabla 28.**

*Diagnóstico del Proceso de Modelización para el estudiante 5*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Observación e iniciación		X	
Representación Inicial			X
Integración de la Teoría		X	

Nota. Elaboración propia.

Según las respuestas dadas por el E5, bajo la caracterización o primer criterio, se observa una descripción general del fenómeno. No profundiza en las reacciones químicas implicadas, sino que hace una descripción de lo que transcurre en el fotoreactor, como se puede observar en el siguiente fragmento:

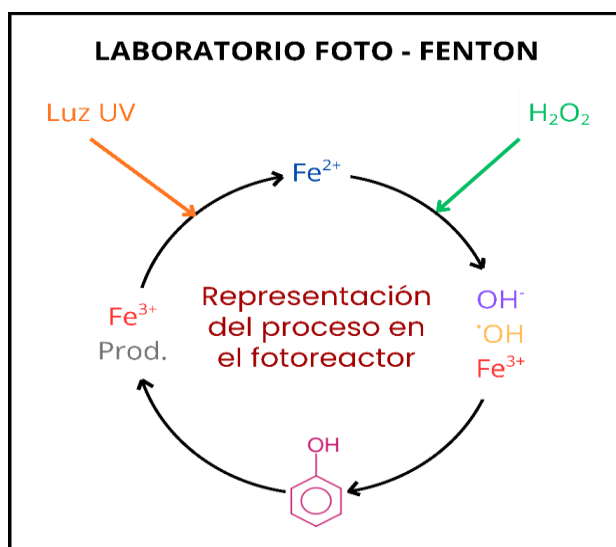
“Lo anterior, lo relaciono claramente con propiedades oxidativas, debido a la presencia del peróxido de hidrógeno; considero que también puede ser tomada como una propiedad el hecho de que el radical hidroxilo sea “no selectivo”, ya que es lo que permite el desarrollo de la reacción; también considero como una propiedad la reducción a través de la lámpara UV”.

Se observa el uso de los conceptos pertinentes, los cuales están asociados a la oxidación avanzada y fotocatalisis, pero en ningún momento hace mención a nivel microscópico mediante el uso de reacciones químicas. La descripción y caracterización de las propiedades las realiza de manera en que son las sustancias, aisladas, quienes interactúan, pero no hay una especificidad en cuanto a la causa del por qué el sistema funciona de esa manera; no hay interrelación entre los procesos que ocurren. La porción de mundo la tiene muy bien definida, ya que distingue los conceptos entre sí y les confiere las propiedades pertinentes.

Por otra parte, si se refiere a la representación inicial, se observa en la Figura 42 que se retrata el proceso como algo cíclico, el cual funciona mientras haya la producción o presencia de alguno de los componentes. Se observa grosso modo una relación entre los elementos que componen el sistema y hay una clara discordancia entre la caracterización del fenómeno en conjunto con su representación, por lo que se infiere, no se respondieron las preguntas a manera de hacer una integración, sino de mencionar de manera aislada cada propiedad; cambiando e integrándose justamente en la representación.

**Figura 42.**

*Representación cíclica del proceso foto-Fenton por parte del E5*



*Nota.* Elaboración propia.

En el estudiante 6 (E6) se observa un nivel de profundidad medio en el primer y segundo criterio. Con respecto al primer criterio, hay una descripción macroscópica en conjunto con un énfasis en aspectos propios de parámetros a considerar en el proceso foto-Fenton cuando se realiza la práctica con el foto-reactor, como la concentración de peróxido y sulfato de

hierro (Shivappa y Kumar, 2020 ). Si bien estas implicaciones desde una mirada externa al fenómeno no son del todo erróneas, hace falta precisar internamente, o a un nivel atómico-molecular, el cómo ocurre el fenómeno y cuales propiedades pueden presentar las sustancias para que este se comporte conforme se observó en la práctica. Se resalta el siguiente fragmento para consolidar la idea:

*“Durante la práctica de Foto-fenton, pude observar que, es importante tener unas condiciones controladas para la realización eficiente de la práctica de laboratorio . . . un ejemplo de las variables controladas puede ser el del pH, en el cual, según la literatura, el pH debe estar entre 2 y 4, no obstante, durante la práctica se llevó a cabo un control de pH 3.”*

**Tabla 29.**

*Diagnóstico del Proceso de Modelización para el estudiante 6*

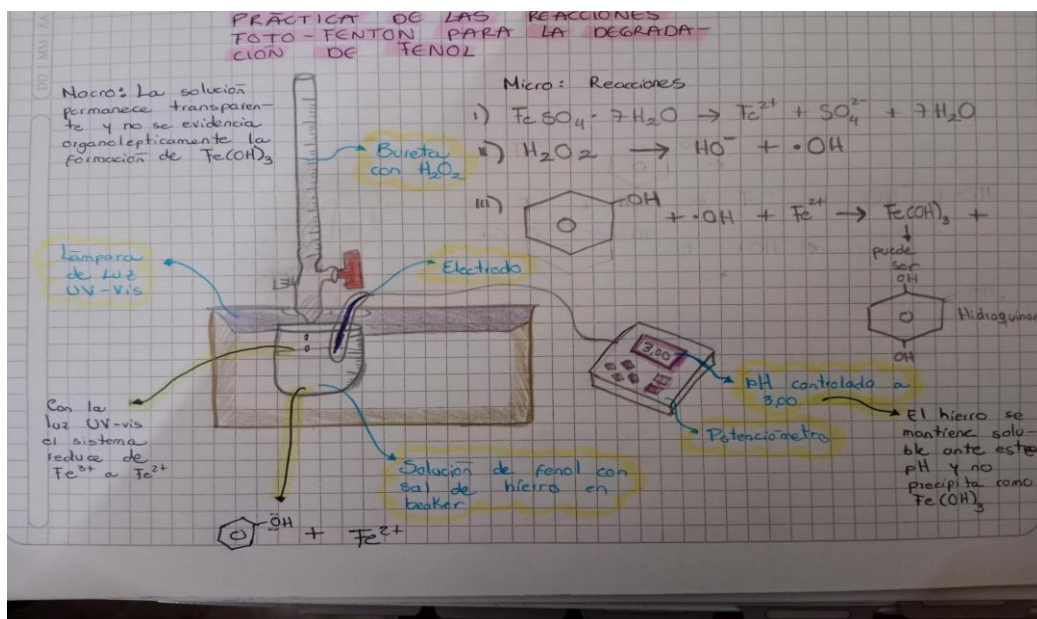
<b>Criterio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
Observación e iniciación		X	
Representación Inicial		X	
Integración de la Teoría			X

*Nota.* Elaboración propia.

En cuanto a la representación (Figura 43), hay una articulación entre el dibujo o imágenes (Johnson-Laird, 1983) y las reacciones o sustancias participantes. Por medio de las reacciones químicas que establece, se puede observar la producción de aquellas sustancias, como el radical hidroxilo, que son pieza clave en el proceso de oxidación avanzada; sin embargo, el modelo no contempla la interacción entre la luz UV y el catalizador de hierro para que se presente la fotocatalisis o foto-reducción del Hierro 3+ (Shivappa y Kumar, 2020 ).

**Figura 43.**

*Representación a través de dibujo del foto-reactor por parte del E6*



Nota. Elaboración propia.

#### 8.4.2. Rúbrica II - Evaluación del Modelo Conceptual

La rúbrica II tiene como objetivo evaluar el modelo conceptual, o tercera parte del instrumento, para recopilar los datos cualitativos pertinentes en la investigación. Como se observa en el Anexo E, hay una división entre tres criterios en conjunto con los indicadores para establecer el nivel de profundidad. La tercera parte del instrumento, de la cual se basa la rúbrica II, se guía bajo una sola pregunta clave “¿Cómo representar lo que ocurre en el fotoreactor?”, a lo cual se les da a los estudiantes la libertad de realizar la representación, o modelo, como prefieran. Como se mencionó en el Marco Teórico, los criterios corresponden con los tres ejes cruciales de una representación del proceso foto-Fenton: la validez química, siendo toda aquella información que se consultó y se organizó como Marco Teórico en la segunda parte del instrumento, y validez representacional, siendo una articulación a la evolución del modelo mental que propusieron los estudiantes en la primera parte del instrumento; las relaciones y procesos o mecanismos que se presentan entre las sustancias participantes del proceso foto-Fenton; por último, la multimodalidad que se tiene al abarcar el fenómeno desde distintos puntos de vista, lo que significa que se integran los niveles macroscópicos y atómico-molecular, del mismo modo la utilidad predictiva al poder hacer inferencias con respecto al qué ocurriría con, por ejemplo, las variaciones entre parámetros de los tres grupos de trabajo de la práctica de laboratorio.

Para analizar el modelo que proponen los estudiantes se hace uso de una propuesta denominada Sistema Representacional de la Naranja (SRN), articulado con el árbol de la Fase 2. Si suponemos que el modelo conceptual es aquel fruto que se obtiene luego de haber sido evaluado bajo ciertos criterios, cumpliendo su papel como representación externa (Greca y Moreira, 1998), entonces es posible realizar una analogía, una representación en si misma frente al nivel de profundidad, o lo maduro, que se encuentra el modelo conceptual frente al fenómeno que se quiere modelizar. Para esto, se diseñó de manera cuantitativa una Tabla que

permite la transposición entre los niveles de profundidad por criterio, y lo maduro que esté la naranja (Tabla 30).

**Tabla 30.**

*Instrumento para representar el nivel de profundidad de un modelo.*




<b>Criterio</b>	<b>Bajo 1 punto</b>	<b>Medio 2 puntos</b>	<b>Alto 3 puntos</b>
Validez Química y Representacional			
Relaciones y Procesos-mecanismos			
Multimodalidad y Utilidad Predictiva			

*Nota.* Elaboración propia.

El uso de la Tabla está dado por los siguientes indicadores: cada criterio, dependiendo del nivel de profundidad, va a tener una valoración numérica, por ende, al realizar la evaluación por lo tres criterios se tendrán tres valoraciones diferentes, las cuales se sumarán para obtener un valor total. De acuerdo con el valor, se mirará el rango y, por cada rango, hay un color específico de la etapa de maduración de la naranja, lo cual se puede observar en la Tabla 31

**Tabla 31.**

*Coloración del fruto de acuerdo con el rango*

Rango	Color
3 – 4	Verde oscuro – poco maduro 
5 – 7	Amarillo verdoso – maduración media 
8 – 9	Naranja – maduro 

*Nota.* Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por el E1 según la rúbrica de evaluación del modelo conceptual se exponen en la Tabla 32.

**Tabla 32.**

*Evaluación del Modelo Conceptual para el E1*

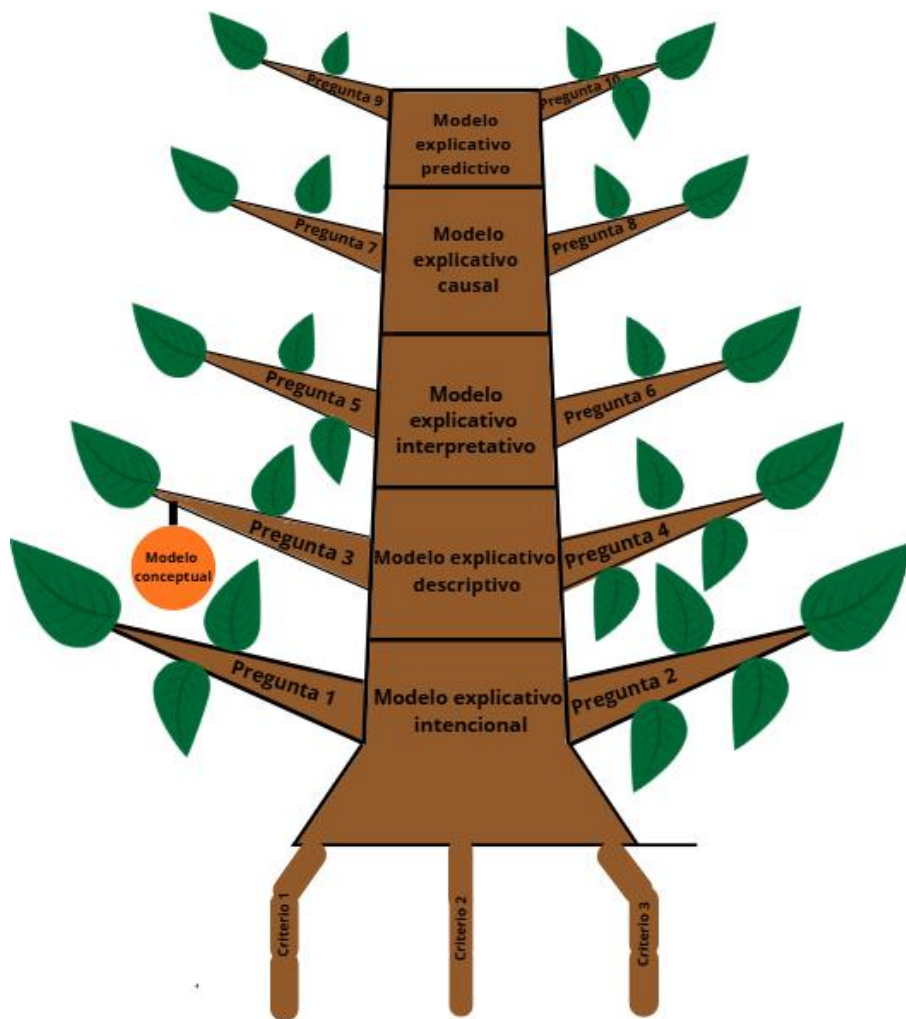
<b>Criterio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
Validez Química y Representacional			X
Relaciones y Procesos-mecanismos			X

*Nota.* Elaboración propia.

El modelo que plantea el E1, presenta un nivel de profundidad alto en cuanto a la validez química y representacional, ya que se puede observar cómo hay una integración de las diferentes reacciones químicas presentes en el fenómeno, haciendo énfasis en las que respecta a algunos subproductos de la oxidación del fenol. El modelo representa correctamente el ciclo fotocatalítico en conjunto con la degradación de fenoles mediante el proceso Foto-Fenton; de la misma manera en que se hace una representación coherente con la bibliografía. En cuanto a las relaciones que establece el estudiante entre los conceptos involucrados, su nivel de profundidad es alto, ya que propone una cadena de reacciones, en donde el producto de una se convierte en reactivo para otra, desglosando la oxidación desde la molécula problema, hasta el último producto. Lo anterior, e integrando el SRN (Figura 44), conlleva a que se clasifique el modelo como un fruto de maduración media, lo cual se integra con el árbol propuesto en la Fase 2 y las raíces conforme se representó la rúbrica anterior. En la Figura 44 se muestra la imagen del proceso de modelización que tuvo el estudiante. Cabe aclarar que el lugar donde se coloca el fruto no es relevante, sino cuestión de estética para la representación.

**Figura 44.**

*Representación del proceso de modelización que efectuó el E1*



*Nota.* Elaboración propia.

Si bien se observa que en la Figura 44, el estudiante tiene unas raíces muy pronunciadas, lo cual indica que las bases teóricas, así como el modelo mental que proyecta, forman una buena base para el árbol. Por su parte, en el tronco y las ramas, se observa la cantidad de hojas que tuvo por pregunta en cada modelo explicativo (Fase 2), concluyendo con el fruto, aquel modelo que propone, estando en una etapa de maduración maduro.

Los resultados obtenidos por el E2 conforme la rúbrica de evaluación del modelo conceptual se expone en la Tabla 33.

**Tabla 33.**

*Evaluación del Modelo Conceptual para el E2*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Validez Química y Representacional		X	

Relaciones y Procesos- mecanismos	X
Multimodalidad y Utilidad Predictiva	X

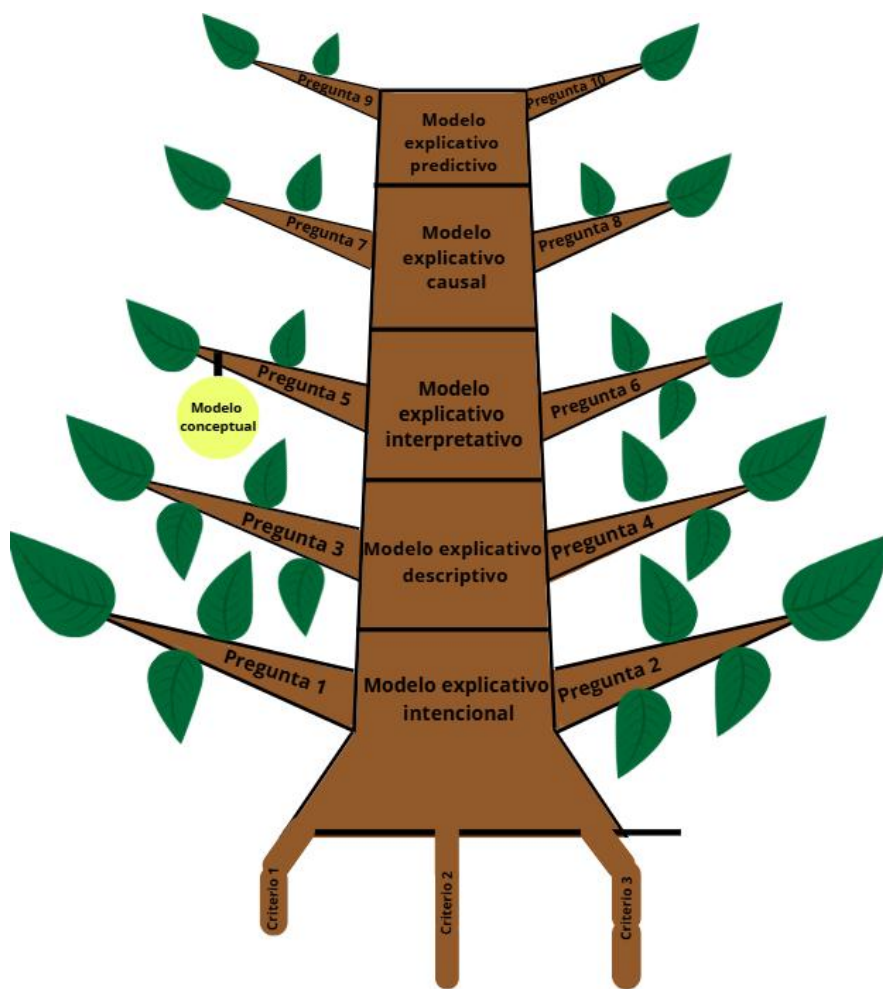
*Nota.* Elaboración propia.

El modelo que plantea el E2, presenta un nivel de profundidad medio en cuanto a la validez química y representacional, ya que se puede observar cómo hay una integración de las diferentes reacciones químicas presentes en el fenómeno de manera superficial, sin ahondar en la razón del porqué ocurre y qué consecuencias le trae al sistema los diferentes productos de reacción. El modelo es válido en términos de un concepto estructurante, pero no se ramifica ni se desglosa en los conceptos que subyacen o se generan tras este. Hay una representación que, en el criterio de relaciones y procesos-mecanismos, presenta un nivel de profundidad medio. Esto se evidencia porque las reacciones llegan a estar aisladas entre sí, pero unidas por una ecuación que describe la velocidad de degradación del fenol, seguramente obtenida de alguna base bibliográfica. Como tercer criterio, se tiene un nivel de profundidad bajo, debido a que no hay integración de los datos experimentales y esto no permite que se pueda realizar algún proceso de predicción.

Lo anterior, e integrando el SRN, conlleva a que se clasifique el modelo como un fruto de maduración media, observándose en la Figura 45.

**Figura 45.**

*Representación del proceso de modelización que efectuó el E2*



Nota. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por el E3 según la rúbrica de evaluación del modelo conceptual se exponen en la Tabla 34.

**Tabla 34.**

*Evaluación del Modelo Conceptual para el E3*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Validez Química y Representacional		X	
Relaciones y Procesos-mecanismos			X
Multimodalidad y Utilidad Predictiva	X		

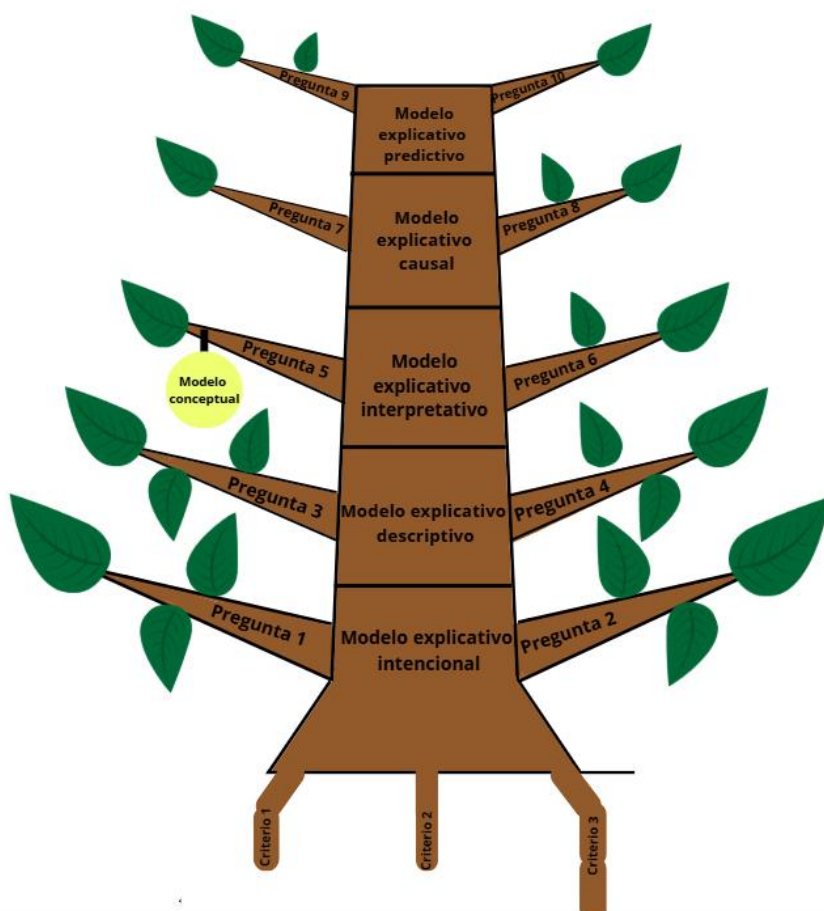
Nota. Elaboración propia.

El modelo que plantea el E3, presenta un nivel de profundidad alto en cuanto a la validez química y representacional, ya que se puede observar cómo hay una integración parcial de las diferentes reacciones químicas presentes en el fenómeno, en sí, no hay una profundidad en términos de los subproductos, ni en mostrar cómo se reincorpora el Hierro luego de haberlo foto-reducido por acción de la luz UV, por lo que en este aspecto sólo explica lo que ocurre sin dar fundamentos. De la misma forma es en cuanto a lo representacional, no abarca la gran mayoría de los conceptos involucrados ni los interrelaciona. Con base en el segundo criterio, las relaciones también llegan a ser ineficientes o inexistentes entre las sustancias, son aisladas, pero unidas como en el caso del E2 por una ecuación cinética que describe la degradación del fenol. En el tercer criterio, se tiene un nivel de profundización bajo, debido a que, si bien presenta un proceso matemático, no llega a haber relación con la parte química, y por lo mismo, sólo describe lo que realizó sin llegar a hacer una contraposición con los datos de los demás grupos para adquirir el carácter predictivo.

Lo anterior, e integrando el SRN, conlleva a que se clasifique el modelo como un fruto de maduración media, observándose en la Figura 46.

**Figura 46.**

*Representación del proceso de modelización que efectuó el E3*



*Nota.* Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por el E4 según la rúbrica de evaluación del modelo conceptual se exponen en la Tabla 35.

**Tabla 35.**

*Evaluación del Modelo Conceptual para el E4*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Validez Química y Representacional		X	
Relaciones y Procesos-mecanismos	X		
Multimodalidad y Utilidad Predictiva		X	

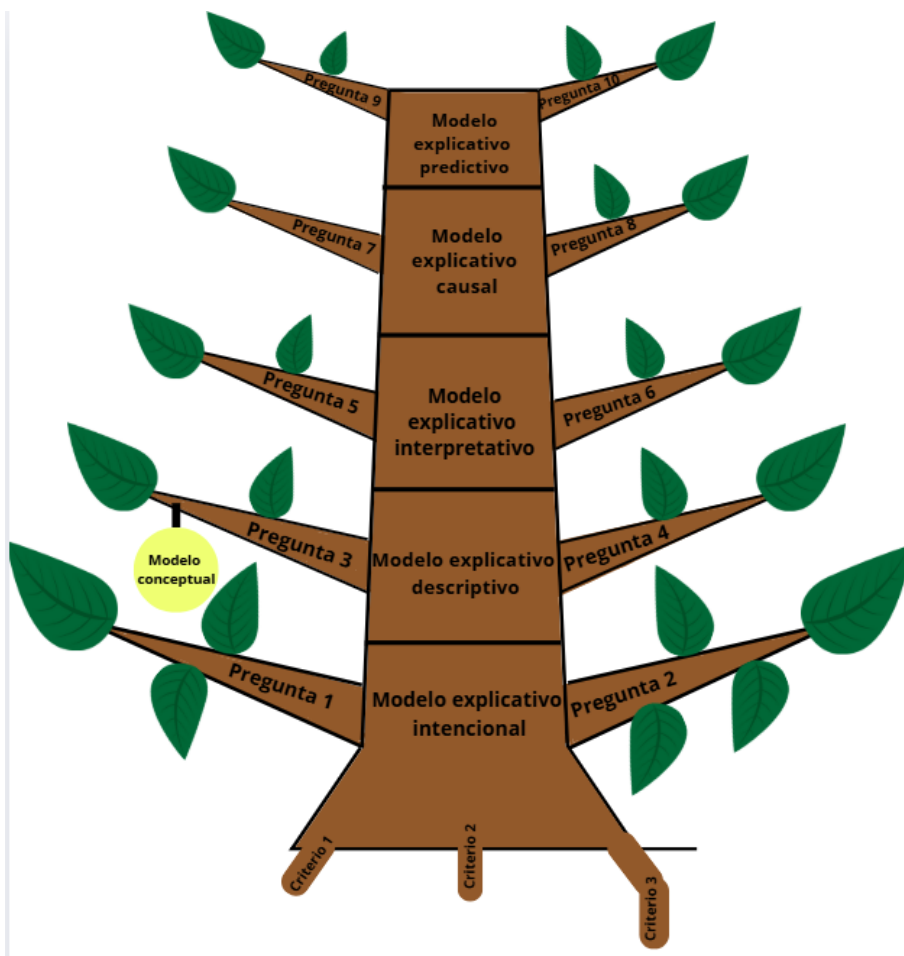
*Nota.* Elaboración propia.

El modelo que plantea el E4, presenta un nivel de profundidad medio en cuanto a la validez química y representacional, ya que se puede observar cómo hay una integración muy general e incompleta de las diferentes reacciones químicas presentes en el fenómeno, en conjunto con lo representacional. No se evidencia las relaciones entre conceptos, ni la integración de los subproductos con el proceso foto-Fenton. Por su parte, en conformidad con el segundo criterio, su nivel de profundidad es bajo, pues no se relacionan las sustancias entre sí; es un modelo estático. En el tercer criterio, se tiene un nivel de profundidad medio, debido a que hay una buena relación entre los componentes o sustancias químicas, y la parte matemática. Aun así, no logra integrar los demás valores que se variaron para que el modelo adquiriera el carácter predictivo.

Lo anterior, e integrando el SRN, conlleva a que se clasifique el modelo como un fruto de maduración media, observándose en la Figura 47.

**Figura 47.**

*Representación del proceso de modelización que efectuó el E4*



Nota. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por el E5 según la rúbrica de evaluación del modelo conceptual se exponen en la Tabla 36.

**Tabla 36.**

*Evaluación del Modelo Conceptual para el E5*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Validez Química y Representacional		X	
Relaciones y Procesos-mecanismos	X		
Multimodalidad y Utilidad Predictiva		X	

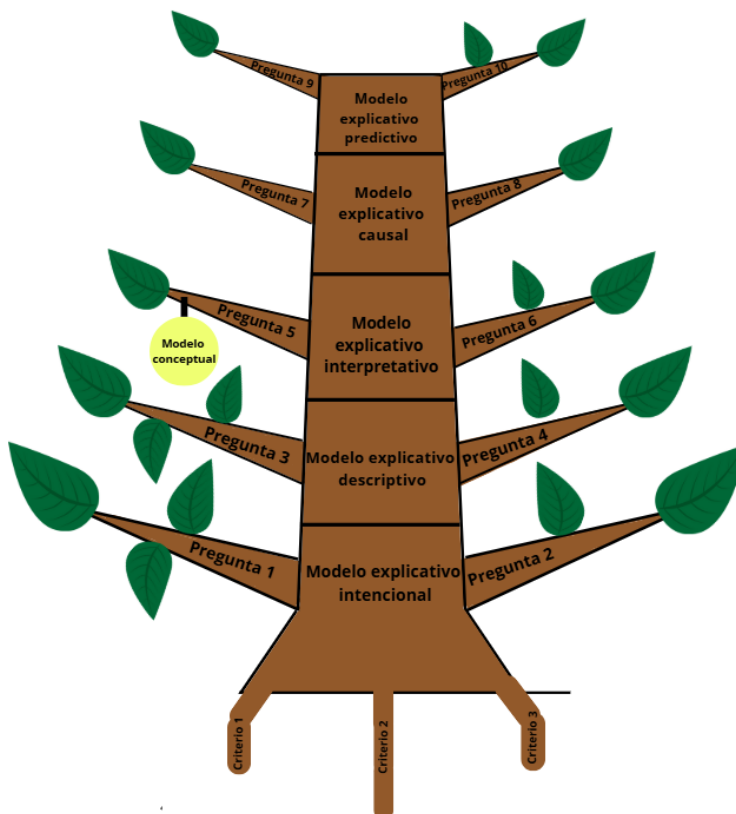
Nota. Elaboración propia.

El modelo que plantea el E5, presenta un nivel de profundidad medio en cuanto a la validez química y representacional, ya que si bien se puede observar cómo no hay una integración de las diferentes reacciones químicas presentes en el fenómeno, se contrapone con un análisis cinético conforme los datos obtenidos en el laboratorio, por lo cual el modelo que propuso es más de índole matemático y representa en buena parte lo que ocurre en el foto-rector. De esta manera, en el segundo criterio tuvo un nivel de profundidad bajo, ya que precisamente al presentar sólo los datos cinéticos como descripción del proceso foto-fenton, el estudiante no articula los otros conceptos en el modelo, por lo que recae como en el E4 en un modelo estático. En el tercer criterio, se presenta un nivel de profundidad medio debido a que el modelo presenta una serie de matematización por parte del modelo cinético, pero con respecto a la parte química, no representa de manera general del proceso, sino que se basa en puntos específicos como la formación del radical hidroxilo o la foto-reducción del Hierro; no hay carácter predictivo al no integrar al modelo diferentes variables que afecten la degradación y el proceso foto-Fenton.

Lo anterior, e integrando el SRN, conlleva a que se clasifique el modelo como un fruto de maduración media, observándose en la Figura 48.

**Figura 48.**

*Representación del proceso de modelización que efectuó el E5*



*Nota.* Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por el E6 según la rúbrica de evaluación del modelo conceptual se exponen en la Tabla 37.

**Tabla 37.**

*Evaluación del Modelo Conceptual para el E6*

<b>Criterio</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
Validez Química y Representacional		X	
Relaciones y Procesos-mecanismos		X	
Multimodalidad y Utilidad Predictiva		X	

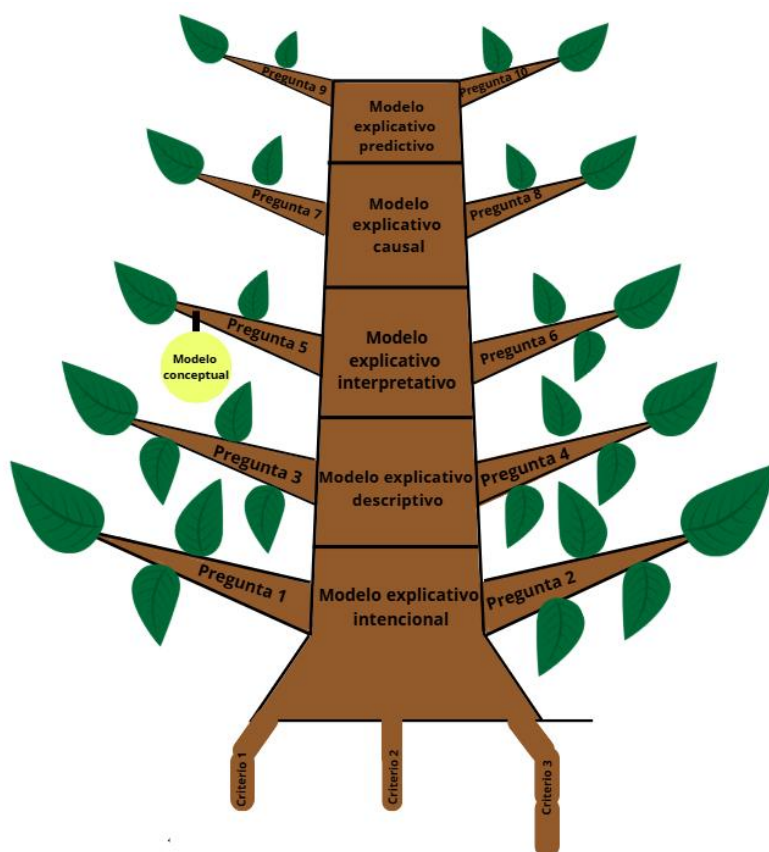
*Nota* Elaboración propia.

El modelo que plantea el E6, presenta un nivel de profundidad medio en cuanto a la validez química y representacional, ya que se puede observar cómo hay una integración parcial entre las reacciones o sustancias que componen el sistema y el tratamiento matemático con base en la cinética de la reacción química. El modelo es más de carácter matemático, bastante deductivo en la presentación de los datos, y representa correctamente lo que ocurre con la cinética de la reacción. En el segundo criterio, el nivel de profundidad es medio debido a que las relaciones que establece entre las especies están limitadas en sí mismo, pero extrapoladas en el modelo cinético que planteó. Finalmente, en el tercer criterio se establece un nivel de profundidad medio debido a que el modelo tiene tanto una parte de ecuaciones químicas, como de contenido matemático, pero no hay una explicación causal del motivo por el cual se integran estos componentes, de la misma manera en cómo no se emplean los datos o pruebas necesarios como para contrastar el modelo propuesto frente a los demás datos según las variaciones de los parámetros.

Lo anterior, e integrando el SRN, conlleva a que se clasifique el modelo como un fruto de maduración media, observándose en la Figura 49.

**Figura 49.**

*Representación del proceso de modelización que efectuó el E5*



*Nota.* Elaboración propia.

## 9. CONCLUSIONES

- Los procesos de modelización partieron de la base de los modelos explicativos, en donde los profesores en formación de 7° semestre tienen inicialmente una respuesta acertada en la mayoría de las preguntas según el primer instrumento; sin embargo, cuando se observa el último nivel, que refiere a la predicción del fenómeno, no se obtiene una respuesta acertada por parte de la mayoría de estudiantes, lo que conlleva a interpretar que a medida de que se cambia el tipo de modelo explicativo conforme se avanza en las preguntas, se encuentra que las respuestas son menos precisas. En cuanto a los modelos conceptuales propuestos, en general se observa que tienen un nivel de maduración medio, ya que se abarca en algunos casos un solo eje central al representar lo que ocurre en el foto-reactor, sea en términos de oxidación avanzada o fotocatalisis, no se tiene en consideración el carácter descriptivo para explicar el modelo, o sólo se abarca una parte matemática sin considerar las reacciones químicas implicadas. Por lo tanto, se interpreta que, si bien hubo una consulta bibliográfica, a excepción del estudiante 1, no se integraron los elementos suficientes para representar el proceso foto-Fenton, lo que conlleva a que se presenten en algunos casos árboles de modelización con raíces poco pronunciadas, poca cantidad de hojas, y un modelo de maduración media.
- El diseño y construcción del foto-reactor se consolidó debido a la determinación de parámetros estructurantes y de orden fisicoquímico mediante una serie de distintos

ensayos al analizar el porcentaje de degradación de fenol en conformidad con la variación de las concentraciones de peróxido de hidrógeno, sulfato de hierro II y fenol, en conjunto con la irradiación de luz UV proveniente de una lámpara de 8 watts y teniendo en cuenta el método espectrofotométrico y por HPLC. Se encontró que, el pH de la mezcla debía ser entre 2,8 y 3,0; la temperatura oscila entre los 22-25°C y las concentraciones iniciales de las especies son de 200 ppm para peróxido, 50 ppm para fenol y 40 ppm para sulfato ferroso.

- Los profesores en formación, a nivel general, se encuentran en los primeros tipos del modelo explicativo, intencional y descriptivo como lo menciona Duque (2024), pues fue allí donde se evidenció un mejor desempeño comparado con los últimos tipos interpretativo, causal y predictivo, esto a partir de la triangulación entre las repuestas de los profesores en formación, las rúbricas propuestas y los conceptos relacionados con los modelos explicativos propuestos por Amador (2021).
- En un inicio, se observa que los modelos mentales que proponen los profesores en formación tienen en algunos casos errores conceptuales, no se relaciona la oxidación avanzada con la fotocatalisis, o hay interpretaciones que no corresponden con la teoría química que explica el proceso foto-Fenton; lo que se observa con los niveles de profundidad de las raíces en los árboles de modelización. Una vez se realiza la consulta bibliográfica, se consolida el modelo conceptual teniendo una mejora significativa, ya que hay una explicación química más detallada, una inclusión del tratamiento matemático de orden cinético que explica lo que ocurre en el fotoreactor; sin embargo, en la mayoría de casos sigue sin presentarse la relación entre los ejes estructurantes, y al no tenerse en cuenta los resultados de los demás grupos, los modelos conceptuales tienen la falencia en su utilidad predictiva, por lo que se observa una maduración media en los frutos de los diferentes árboles. Durante el proceso de modelización se destacan aspectos clave que influyen, como la consulta de la información, la comprensión de los conceptos involucrados, y la manera en cómo efectúan las relaciones pertinentes entre el concepto y el fenómeno a modelizar. Es importante considerar también el reto o dificultad que supone la enseñanza de estos tipos de conceptos.

## 10. REFERENCIAS

- Abad, J., & Toro, A. (2013). *Aplicaciones del proceso foto-electrofenton para la oxidación de contaminantes de la industria química* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
- Abella-Peña, S. (2022). Modelización en la enseñanza de las ciencias: Una revisión sobre sus aportes entre 1988 y 2020. *Revista Electrónica EDUCyT*, 12(1), 23–48. <https://die.udistrital.edu.co/revistas/index.php/educyt/article/view/250>
- Acher, A. (2014). Cómo facilitar la modelización científica en el aula. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (36), 63–75. <https://doi.org/10.17227/01213814.36ted63.75>
- Amador-Rodríguez, R., Insuasty, D., Méndez-López, M., & Márquez, E. (2021). Promover modelos explicativos sobre las interacciones químicas del felodipino-citocromo P450: Una propuesta didáctica basada en la modelización. *Química Nova*,

44, 1379–1387.

<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170784>

- Ameta, R., Solanki, M. S., Benjamin, S., & Ameta, S. C. (2018). Fenton and photo-Fenton processes. En *Advanced oxidation processes for wastewater treatment* (pp. 49–87). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00384-4>
- Bhatkhande, D. S., Pangarkar, V. G., & Beenackers, A. A. C. M. (2002). Photocatalytic degradation for environmental applications: A review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 77(1), 102–116.
- Caamaño, A. (2011). Enseñar química mediante la contextualización. En *La formación del profesorado y la enseñanza de la química* (pp. 1-22). Universidad de Barcelona.
- Caamaño, A. (2018). Enseñar química en contexto: Un recorrido por los proyectos de química en contexto desde la década de los 80 hasta la actualidad. *Educación Química*, 29(1), 21–54.
- Campbell, T., & Zuwallack, R. (2015). A review of modeling pedagogies: Pedagogical functions, discursive acts, and technology in modeling instruction. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 11(6), 1591–1600.
- Centeno, M. A., et al. (2020). Degradación de fenol e identificación por HPLC de los productos generados utilizando lodo rojo como catalizador en procesos de oxidación avanzada solar. *Revista Ingeniería UC*, 27(2), 150–164.
- Chamizo, J. A. (2010). *Modelos y modelaje en la enseñanza de las ciencias*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cortazar Martínez, A., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, A., & González Ramírez, C. (2019). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*, 3(5). <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>
- Delgado Pallares, N. (2021). Adsorción en el tratamiento de aguas contaminadas. *Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 42, 19–21.
- Duque, W. (2024). *Los modelos explicativos de profesores de ciencias en formación al abordar el estudio de nanopartículas de especies de cobre mediante el aprendizaje basado en proyectos* [Tesis de maestría, Universidad Pedagógica Nacional]. Repositorio Institucional UPN. <https://repositorio.upn.edu.co/items/7d0668a9-1b01-4d38-a812-e7f9b1a4ab5f>
- Esplugas, S., Gimenez, J., Contreras, S., Pascual, E., & Rodriguez, M. (2002). Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation. *Water Research*, 36(4), 1034–1042.
- Fónagy, O., Szabó, E., & Horváth, O. (2020). 1,4-Benzoquinone and 1,4-hydroquinone based determination of electron and superoxide radical formed in heterogeneous photocatalytic systems. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 401, 112765. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.113057>
- Forero, J., et al. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *Revista CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(1), 97–109.
- Garisado, Y., et al. (2024). Optimization of the photo-Fenton process for the effective removal of chemical oxygen demand and phenols in portable toilet wastewater: A treatment study under real world conditions. *Heliyon*, 10(6), e27771.

- Garrido Espeja, A., & Couso, D. (2017). La modelización en la formación inicial de maestros: ¿Qué mecanismos o estrategias la promueven? *Enseñanza de las Ciencias*, (Extra), 137–144.  
<https://ddd.uab.cat/record/184701>
- Gilbert, J. K. (2004). Models and modelling: Routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115–130.
- Glaze, W. H., Kang, J. W., & Chapin, D. H. (1987). The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Ozone: Science & Engineering*, 9(4), 335–352.
- Guaña, E. L. I. (2024). La importancia del pensamiento crítico y la resolución de problemas en la educación contemporánea. *Revista Científica Kosmos*, 3(1), 4–18.  
<https://doi.org/10.62943/rck.v3n1.2024.50>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Herrmann, J. M., Matos, J., Disdier, J., Guillard, C., Laine, J., Malato, S., & Blanco, J. (1999). Solar photocatalytic degradation of 4-chlorophenol using the synergistic effect between titania and activated carbon in aqueous suspension. *Catalysis Today*, 54(2-3), 255–265.
- Hincapié-Mejía, G. M., Ocampo, D., Restrepo, G. M., & Marín, J. M. (2011). Fotocatálisis heterogénea y foto-Fenton aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Información Tecnológica*, 22(2), 33–42.  
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000200005>
- Hunt, J. P., & Taube, H. (1952). The photochemical decomposition of hydrogen peroxide: Quantum yields, tracer and fractionation effects. *Journal of the American Chemical Society*, 74(23), 5999–6002. <https://doi.org/10.1021/ja01143a052>
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Harvard University Press.
- Jurík, J., Jankovičová, B., Zakhar, R., Šoltýsová, N., & Derco, J. (2024). Quaternary treatment of urban wastewater for its reuse. *Processes*, 12(9), 1905.  
<https://doi.org/10.3390/pr12091905>
- Kanakaraju, D., Glass, B. D., & Oelgemöller, M. (2018). Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: A review. *Journal of Environmental Management*, 219, 189–207.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.103>
- Kavitha, V., & Palanivelu, K. (2004). The role of ferrous ion in Fenton and photo-Fenton processes for the degradation of phenol. *Chemosphere*, 55(9), 1235–1243.
- Méndez Novelo, R. I., García Reyes, R. B., Castillo Borges, E. R., & Sauri Riancho, M. R. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. *Ingeniería e Investigación*, 30(1), 80–85.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092010000100014](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092010000100014)
- Morales, L., Gonzalez, I., Abella, J., & Ahumada, D. (2019). Técnicas de titulación ácido-base: Consideraciones metrológicas. *Revista Colombiana de Química*, 48(1), 26–34.  
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n1.72401>
- Moreno, J., Colín, A., & Vázquez, O. (1992). Remoción de fenoles, detergentes y coliformes presentes en aguas residuales por medio de irradiación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 8(1), 29–35.

- Muñoz, A. (2011). *Proceso Fenton y fotofenton para la remoción de fenoles de efluentes generados de una planta de celulosa Kraft* [Tesis de maestría, Universidad Federal de Viçosa].
- Nersessian, N. J. (1992). How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science. En *Cognitive models of science* (Vol. 15, pp. 3–44). University of Minnesota Press.
- Oliva, J. M. (2019). Distintas acepciones para la idea de modelización en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 37(2), 5–24.
- Ollis, D. F., Pelizzetti, E., & Serpone, N. (1991). Photocatalyzed destruction of water contaminants. *Environmental Science & Technology*, 25(9), 1522–1529.
- Pérez Nahar, C. V., & Pérez Cortés, G. A. (2023). *Caracterización de habilidades de pensamiento crítico mediadas por la química en contexto en relación con la adsorción de Hg<sup>2+</sup> sobre  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nano soportadas en matriz biopolimérica* [Tesis de maestría, Universidad Pedagógica Nacional]. Repositorio Institucional UPN.
- Pulido, C. J. T. (2020). *Modelación de la práctica pedagógica y educativa: Un estudio de caso en enseñanza superior*. Universidad de Cundinamarca.  
<https://doi.org/10.36436/9789585273047>
- Ramírez, C. G., & Clemente, A. R. (2022). Remoción de colorantes en aguas procedentes de la industria textil mediante el uso de biocarbón. *Afinidad*, 79(596).  
<https://doi.org/10.55815/401287>
- Ramos Alvarino, C. (2006). Los residuos en la industria farmacéutica. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 37(1), 25–31.
- Ray, A. K., & Beenackers, A. A. (1997). Novel swirl-flow reactor for kinetic studies of semiconductor photocatalysis. *AIChE Journal*, 43(10), 2571–2578.
- Rubiano Hernández, C., Laguna, W., Zapata Sánchez, C., & Marín Sepúlveda, J. (2005). Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. *Gestión y Ambiente*, 8(1), 53–62.
- Rubio-Clemente, A., Chica, E. L., & Peñuela, G. A. (2014). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 211–223.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-30332014000200019](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332014000200019)
- Saharan, K., Pinjari, D., Gogate, P., & Pandit, A. (2014). Advanced oxidation technologies for wastewater treatment. En *Industrial wastewater treatment, recycling and reuse* (pp. 141–191). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099968-5.00003-9>
- Shivappa, S., & Kumar, P. (2020). Application of photo Fenton process for treatment of textile Congo-red dye solution. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1445–1451.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.650>
- Sievers, M. (2011). *Advanced oxidation processes*. CUTEC-Institut GmbH.
- Silva, S., Trujillo, J., Aguilar, L., & Hincapié, M. (2009). Tratamiento de contaminantes orgánicos por foto Fenton con luz artificial. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 53–62.
- Solbes, J., Montserrat, R., & Furió, C. (2007). Desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: Implicaciones en su enseñanza. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, (21), 91–117.  
<https://doi.org/10.7203/dces.21.2428>

- Tamayo, A. (2013, 9–12 de septiembre). Modelos y modelización en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias. IX Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, Universidad de Caldas, Colombia.
- Urbina, J. A. J., & Solano, J. A. V. (2020). Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. *Informador Técnico*, 84(2), 180–201.  
<https://doi.org/10.23850/22565035.2305>
- Valencia, R. N. A., González, D. P. O., & Rodríguez, L. F. R. (2020). Aplicación de foto fenton (VIS) para la remoción de sulfuros y DQO en aguas residuales de curtiembre. *Luna Azul*, 50, 215–228. <https://doi.org/10.17151/luaz.2020.50.11>
- Vermilyea, A. W., & Voelker, B. M. (2009). Photo-Fenton reaction at near neutral pH. *Environmental Science & Technology*, 43(18), 6927–6933.  
<https://doi.org/10.1021/es900721x>
- Yang, J., Saggiomo, V., Velders, A. H., Cohen Stuart, M. A., & Kamperman, M. (2016). Reaction pathways in catechol/primary amine mixtures: A window on crosslinking chemistry. *PLoS ONE*, 11(12), e0166490.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166490>
- Zong, Q., et al. (2024). Advanced solar photo-Fenton-like process with directly growing nano-heterojunctions on graphite fiber felt for phenolic wastewater treatment: Synergistically expand the pH activity range and facilitate the Fe (III)/Fe (II) cycle. *Chemosphere*, 373, 143980.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143980>

## 11. ANEXOS

**ANEXO A:** Consentimiento informado de estudiantes para participación en la investigación.

### **CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA LA PARTICIPACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**“EL PROCESO FOTO-FENTON: UN ESCENARIO PARA EL ANÁLISIS DE PROCESOS DE MODELIZACIÓN EN LA FORMACIÓN CIENTÍFICA DOCENTE MEDIANTE SITUACIONES EN CONTEXTO.”**

Nombre:

Fecha:

Asignatura:

La investigación enfocada en el diagnóstico de los procesos de modelización que se llevan a cabo mediante la implementación de situaciones problema para generar estrategias que resuelvan dicho problema, y la identificación de estas estrategias, tendrá un carácter académico comprendido como trabajo de grado, para lo cual, es necesaria la participación de la población debido a la naturaleza de la investigación. Los participantes recibirán una valoración cuantitativa en el espacio académico correspondiente.

Los resultados de la investigación serán socializados en el marco de la retroalimentación del trabajo investigativo propuesto en los ejes, y en la respectiva sustentación de trabajos de grado, a lo cual se invita a los participantes en la medida de lo posible, asistir. A su vez, los estudiantes Oscar Daniel Gordillo Castro y Juan Camilo Barahona Caicedo se comprometen a hacer efectiva la decisión de cada estudiante en la participación del proyecto y/o en el manejo de datos; del mismo modo, no se harán públicos los nombres o identidades de quienes den su consentimiento, pues harán parte de una estadística general los materiales suministrados dentro la estructura del proyecto de investigación.

#### **Declaro que:**

1. He sido invitado a participar en la investigación de manera anónima y de manera voluntaria he decidido hacer parte de este estudio.
2. He sido informado sobre los temas en que se desarrollará el estudio, han sido resueltas todas mis inquietudes y entiendo que puedo dejar de participar en cualquier momento si así lo deseo.
3. Conozco el mecanismo mediante el cual los investigadores garantizan la custodia y confidencialidad de mis datos.
4. La información obtenida de mi participación será parte del estudio y mi anonimato se garantizará. Sin embargo, si así lo deseo, autorizaré de manera escrita que la información personal o institucional se mencione en el estudio.
5. Autorizo a los investigadores para que divulguen la información y las grabaciones de audio, video o imágenes que se generen en el marco del proyecto y que no comprometan lo enunciado en el punto 4.

En constancia, manifiesto que he leído y entendido el presente documento.

\_\_\_\_\_  
Firma: \_\_\_\_\_

## **Instrumento para la caracterización de estrategias de modelización en estudiantes abordando situaciones problémicas relacionadas con el proceso foto-Fenton**

Diseñado por: Juan Camilo Barahona Caicedo y Oscar Daniel Gordillo Castro

El presente documento hace parte del trabajo de grado titulado “El proceso foto-Fenton: un escenario para analizar procesos de modelización en la formación científica mediante casos contextualizados”. Lea atentamente el siguiente texto y responda las preguntas de acuerdo con su conocimiento.

Tenga en cuenta que su participación en este estudio es confidencial, por lo que, su nombre no será publicado en ningún documento referente a la investigación y será utilizado únicamente para el análisis de la información.

Fecha: \_\_\_\_\_

Nombre del estudiante: \_\_\_\_\_

Semestre actual: \_\_\_\_\_

### **Reto de degradación del colorante púrpura industrial 7**

Situación problema

La empresa local “Texti-Bogotá S.A.S”, la cual es reconocida por las telas de alta calidad que fabrican, usando un colorante sintético llamado púrpura industrial 7 para teñirlas. El éxito comercial no llegó sólo, ya que la empresa al tener grandes producciones, terminaron enfrentando un problema medioambiental severo debido a sus residuos: el colorante sintético está presente a altas concentraciones en sus aguas residuales. Este problema es ocasionado porque el compuesto (púrpura industrial 7) no es biodegradable, es muy estable, y por corporaciones regionales se demostró que afecta negativamente la salud de las especies endémicas de los afluentes cercanos.

La autoridad ambiental, en acción debido a los llamados de las corporaciones, impuso un plazo de 4 meses a la empresa local para implementar una solución que elimine por lo menos el 90% del colorante en sus aguas residuales; de lo contrario, se impondrán unas sanciones tan altas, que la empresa no podrá costearlas con sus ingresos y deberá declararse en bancarrota.

Al evaluar los métodos que puedan ser eficaces para la degradación o eliminación del colorante, la empresa decidió implementar el proceso foto-Fenton al ser una técnica basada en la oxidación avanzada ideal para contaminantes orgánicos persistentes. Este proceso tiene cuatro componentes clave: el contaminante, catalizador, agente oxidante y activador energético. Para el contaminante se tiene el colorante púrpura industrial 7; en el catalizador se tiene el catión Hierro  $2+$ , el cual se agregó como Sulfato Ferroso pentahidrato; como agente oxidante se empleó peróxido de hidrógeno; el activador energético es la radiación ultravioleta proveniente de una lámpara de mercurio.

El mecanismo de degradación de la sustancia orgánica contaminante ocurre en tres pasos: Reacción de Fenton, Oxidación, y fotocatalisis.

- Reacción de Fenton: El catión  $Fe^{2+}$  reacciona con el peróxido de hidrógeno para producir el catión  $Fe^{3+}$ , un ion hidroxilo y un radical hidroxilo.
- Oxidación: Los radicales hidroxilos producidos, como son extremadamente reactivos y no selectivos, rompen la molécula del colorante sintético, produciendo así compuestos menos tóxicos hasta llegar al  $CO_2$  y agua
- Fotocatalisis: La luz ultravioleta de la lámpara de mercurio incide sobre el catión  $Fe^{3+}$ , reduciéndolo al catión  $Fe^{2+}$  en presencia de agua. Este paso es muy importante, y para lo cual se tiene establecido en la literatura que es la etapa que

aumenta la eficiencia del proceso, ya que además de regenerar el catalizador, se producen iones hidronio (o protones) más un radical hidroxilo.

Los factores que afectan la cinética de la reacción, siendo los datos que deben tenerse en cuenta son: concentración inicial de Sulfato Ferroso en ppm (mg/L), concentración de peróxido de hidrógeno en mL/L, pH inicial de la muestra de agua residual, y tiempo de irradiación de luz ultravioleta en minutos. Estos datos fueron suministrados por un laboratorio, el cual también midió el porcentaje de degradación final conforme un tiempo determinado para varias condiciones, datos que se reportan en la Tabla 1. Para darle veracidad al trabajo, el laboratorio realizó diferentes ensayos cambiando y ajustando los parámetros de inicio, obteniendo diferentes datos de porcentaje de degradación del contaminante.

A partir de los datos de la Tabla 1 se puede realizar el estudio cinético, para lo cual se puede asumir que la reacción sigue una cinética de pseudo-primer orden con respecto a la concentración del colorante sintético, para calcular las constantes de velocidad aparentes.

Ensayo	Conc. FeSO <sub>4</sub> (mg/L)	Conc. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mL/L)	pH inicial	Tiempo UV (min)	% Degradación PI-7
1	20	1.0	3.0	20	65%
2	40	1.0	3.0	20	82%
3	40	2.0	3.0	20	91%
4	40	2.0	5.0	20	75%
5	40	2.0	3.0	40	98%

Tabla 1. Datos Cinéticos

Con base en la información presentada, responda las siguientes preguntas bajo sus propios conocimientos.

1. ¿Por qué considera importante estudiar la problemática de contaminación de las aguas residuales de la empresa de productos textiles Texti-Bogotá S.A.S desde la química?
2. ¿Cuál es la finalidad que tiene emplear el proceso Foto-Fenton como alternativa de tratamiento en este contexto ambiental?
3. ¿Cómo podría describir los fenómenos de oxidación avanzada y fotocatalisis que se presentan en el proceso foto-Fenton?
4. ¿Cómo el proceso foto-Fenton degrada los compuestos como el colorante púrpura industrial 7?
5. ¿Cómo podría explicar, a nivel molecular, el comportamiento del colorante púrpura industrial 7 en el medio acuático y su interacción con radical hidroxilo ( $^{\circ}\text{OH}$ )?
6. Con base en tu conocimiento teórico ¿Cómo podrías explicar el proceso foto-Fenton que ocurre en el sistema de degradación del colorante púrpura industrial 7?
7. ¿Cómo explica que la aplicación del proceso Foto-Fenton puede causar la reducción de los contaminantes en el agua?
8. ¿Qué implicaciones conllevan el uso de la lámpara UV en el proceso?

9. Si tomo una muestra del agua del río y varío sus condiciones de pH a 2, 6 y 12 ¿Qué resultado espero obtener a los valores de pH correspondientes?
10. Si durante la aplicación del proceso foto-Fenton se cambiaron las concentraciones de Sulfato de Hierro el doble de lo establecido ¿Qué alteración podría ocurrir?

# RÚBRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MODELIZACIÓN EN ESTUDIANTES ABORDANDO SITUACIONES PROBLÉMICAS RELACIONADAS CON EL PROCESO FOTO-FENTON

Diseñado por: Juan Camilo Barahona Caicedo y Oscar Daniel Gordillo Castro

El presente documento hace parte del trabajo de grado titulado “El proceso foto-Fenton: un escenario para analizar procesos de modelización en la formación científica mediante casos contextualizados”. En este, se expone la rúbrica para la caracterización de cada uno de los tipos de modelos explicativos (Tabla 1), en conjunto con los indicadores para establecer el nivel de profundidad (Tabla 2) conforme cada pregunta. Además, se presentan los indicadores para caracterizar el tipo de modelo explicativo predominante que tienen los estudiantes (Tabla 3).

Tipo de modelo explicativo	Preguntas	Bajo	Insuficiente	Aceptable	Excelente
		Marque con una X el nivel de profundidad que obtuvo el participante en cada pregunta conforme el modelo explicativo.			
Intencional	1				
	2				
Descriptivo	3				
	4				
Interpretativo	5				
	6				
Causal	7				
	8				
Predictivo	9				
	10				

Tabla 1. Rúbrica de caracterización de modelos explicativos.

Indicadores para el nivel de profundidad en cada tipo de modelo explicativo			
1	2	4	5
Bajo	Insuficiente	Aceptable	Excelente
Utiliza el modelo explicativo, sin embargo, la respuesta no es clara, ni coherente desde el nivel y la dimensión de la Química establecidos para la categoría.	Utiliza el modelo explicativo, pero lo hace de forma insuficiente, presentando una respuesta superficial, o poco coherente desde el nivel y dimensión conceptual de la Química establecidos para la categoría.	Utiliza el modelo explicativo de forma aceptable, presentando una respuesta clara, desde el nivel y dimensión de la Química establecidos para la categoría, sin embargo, falta profundidad o análisis en sus explicaciones.	Utiliza el modelo explicativo de forma excepcional, evidenciado una comprensión significativa del fenómeno, presentando una respuesta clara, coherente y acertada, expresada tanto desde el nivel como desde la dimensión de la Química establecidos para la categoría.

Tabla 2. Indicadores de nivel de profundidad para cada modelo explicativo.

Modelos explicativos				
Intencional	Descriptivo	Interpretativo	Causal	Predictivo
El estudiante justifica el propósito y la importancia de la explicación, estableciendo el origen, el alcance y los límites del fenómeno que se quiere explicar.	El estudiante detalla, a modo de resumen, las características o las partes que componen el fenómeno, aclarando su significado.	El estudiante explica el fenómeno recurriendo a la teoría, describiendo su naturaleza y cómo su distribución cambia en el tiempo y el espacio.	El estudiante formula un mecanismo que explica el comportamiento observado a través de la operación de causa y efecto.	El estudiante anticipa el comportamiento del fenómeno a futuro bajo condiciones específicas, usando el modelo para generar una explicación o tomar una decisión.

Tabla 3. Indicadores para caracterizar los diferentes tipos de modelos explicativos

# GUÍA DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MODELOS EXPLICATIVOS EN TORNO A LA TEMÁTICA DEL PROCESO FOTO-FENTON

Juan Camilo Barahona Caicedo

Oscar Daniel Gordillo Castro

Estimado(a) docente el trabajo evaluativo que usted realizará tiene como finalidad contribuir al proceso de validación del “instrumento de caracterización de modelos explicativos en torno a la temática del proceso foto-Fenton”, el cual hace parte del trabajo de grado “El proceso foto-Fenton: un escenario para analizar procesos de modelización en la formación científica mediante casos contextualizados”, para optar por el título de Licenciado en Química, con la finalidad de responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo el abordaje de situaciones problema relacionadas con el proceso foto-Fenton mediante un enfoque de química en contexto promueve el desarrollo de procesos de modelización en un grupo estudiantes de 7° semestre de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional?, mediante el cumplimiento del objetivo general de investigación: “Analizar los procesos de modelización en un grupo de profesores en formación de 7° semestre de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, al abordar situaciones problema relacionadas con el proceso foto-Fenton mediante un enfoque de química en contexto”. De acuerdo con Giere (1992): “Un modelo es cualquier representación que permite pensar, hablar y actuar con rigor y profundidad sobre el sistema estudiado califica como modelo teórico: no solo los modelos altamente abstractos, sino también las maquetas, las imágenes, las Tablas, las redes, las analogías... siempre que habiliten a describir, explicar, predecir e intervenir” (citado en Adúriz-Bravo, 2010, p. 248) Por esta razón se establece la siguiente guía de validación, en la cual se solicitan algunos datos personales de interés para el proceso, pero que no serán publicados en ningún momento en el documento final.

Agradezco su participación en el proceso de validación.

Nombres y apellidos

Título profesional alcanzado hasta el momento

Área y lugar en el cual labora actualmente

Años de experiencia docente

Enfoques pedagógicos de interés o en los cuales haya realizado investigaciones

A continuación, se presenta la rúbrica de valoración, en la cual usted debe asignar una valoración de entre 1 y 4, para expresar su grado de acuerdo o desacuerdo en cada uno de los enunciados que se presentan sobre la pertinencia y coherencia del “instrumento de caracterización de modelos explicativos en torno a la temática del proceso foto-Fenton” Tenga en cuenta que:

1= Totalmente en desacuerdo

2= En desacuerdo

3= De acuerdo

4= Totalmente de acuerdo

Adicionalmente, encontrará una columna de observaciones, para realizar comentarios y sugerencias de cada uno de los enunciados propuestos.

EVALUACIÓN GENERAL DEL INSTRUMENTO DE CARACTERIZACIÓN Y LA RÚBRICA EVALUATIVA			
Categoría	Enunciado	Valoración	Observación
Coherencia y Redacción	Las preguntas son claras y coherentes		
	Las preguntas presentan buena redacción y ortografía		
	Las preguntas ofrecen la información suficiente para que el participante pueda contestarlas de forma precisa.		

		Las preguntas están planteadas de forma adecuada para la correcta interpretación y análisis por parte del participante.		
Relevancia y pertinencia		Las preguntas se relacionan de forma precisa con la temática objeto de estudio.		
		Las preguntas son relevantes y pertinentes para caracterizar los modelos explicativos iniciales de los participantes.		
		La cantidad de preguntas es la adecuada para reconocer los modelos explicativos iniciales de los participantes sobre la temática.		
		La forma en cómo se plantean las preguntas es adecuada para reconocer los modelos explicativos de los participantes con respecto a la temática.		
		El contenido abordado en cada una de las preguntas es adecuado para establecer con precisión las ideas previas de los participantes sobre la temática.		
Contenido y contextualización		El contenido de las preguntas se encuentra contextualizado y ofrece la posibilidad de que el participante realice un análisis adecuado de este.		
		El contenido de las preguntas es específico y apunta al análisis de modelos explicativos de la temática.		
		El contenido de las preguntas y la forma como están contextualizadas permite analizar conocimientos previos aún si el participante no conoce la temática objeto de estudio.		
Diseño		El diseño del instrumento es claro, pertinente y adecuado.		
		La forma como está diseñado el instrumento permite que se relacione y responda al objetivo que busca alcanzar.		
Categorías de Evaluación		Las categorías planteadas en el instrumento son coherentes y adecuadas para dar respuesta al objetivo.		
		Las categorías planteadas son adecuadas y se relacionan de forma directa con las preguntas que hacen parte de estas.		

¿Considera que el instrumento es aplicable?		Modificaciones sugeridas	
OBSERVACIONES GENERALES			
Nombre del evaluador Firma			

#### Referencias Bibliográficas

Amador, R. (2021). Promover modelos explicativos sobre las interacciones químicas del felodipinocitocromo p450: una propuesta didáctica basada en la modelización. *Quim Nova*.

Duque, W. (2024). Los modelos explicativos de profesores de ciencias en formación al abordar el estudio de nanopartículas de especies de cobre mediante el aprendizaje basado en proyectos. Universidad Pedagógica Nacional.

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**  
**DEGRADACIÓN DE FENOLES MEDIANTE EL PROCESO FOTO-FENTON**  
**JUAN CAMILO BARAHONA CAICEDO**  
**OSCAR DANIEL GORDILLO CASTRO**  
**TRABAJO DE GRADO**  
**EL PROCESO FOTO-FENTON: UN ESCENARIO PARA ANALIZAR PROCESOS**  
**DE MODELIZACIÓN EN LA FORMACIÓN CIENTÍFICA MEDIANTE CASOS**  
**CONTEXTUALIZADOS.**  
**PRÁCTICA DE LABORATORIO**

**OBJETIVOS**

- Caracterización de la degradación de fenoles en una muestra patrón mediante la técnica de oxidación avanzada foto-Fenton.
- Determinación y cuantificación de fenoles mediante el estudio cinético por medio de la técnica de espectrofotometría UV.

**Material**

- 1 Espátula
- 1 Microespátula
- 2 Pipeteador de cremallera
- 2 Balones aforados de 250 mL
- 2 Balones aforados de 100 mL
- 2 Balones aforados de 50 mL
- 2 Vidrios de Reloj
- 1 Pipeta graduada de 10 mL
- 1 Pipeta graduada de 1 mL
- Bureta 50 mL.
- Pinza para bureta
- 1 Beacker de 400 mL
- 2 beaker de 100 mL
- 1 Probeta 100 mL
- 1 Probeta 50 mL
- 1 Termómetro
- 2 goteros
- 1 frasco lavador

**Reactivos**

- Ácido Sulfúrico 0,1M
- Peróxido de Hidrógeno
- Fenol (ácido fénico)
- Sulfato de Hierro pentahidrato
- Hidróxido de Sodio 0,2 M
- 

**Equipo de Laboratorio**

- Potenciómetro
- Agitador Magnético + magneto

## MARCO TEÓRICO

### ¿Qué son los fenoles?

Dentro de los agentes contaminantes hídricos, se encuentran los fenoles, sustancias que llegan a alterar las propiedades organolépticas del agua y ser nocivos para la salud, además, de ser un cristal altamente tóxico y nivel 3 de cancerígeno por la; por ende, es de interés investigativo buscar alternativas para su remoción o aprovechamiento. En el contexto del proyecto, se opta por su degradación por medio de procesos de oxidación avanzada y fotocatalisis, para lo cual, el interés químico es el proceso foto-Fenton.

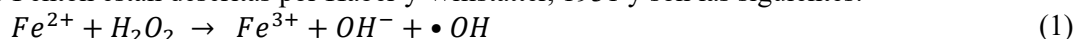
Se han encontrado en varias investigaciones y trabajos de grado referentes a este caso (Rubiano, et al, 2005; Moreno, et al, 1992; Forero, et al, 2005; Rodriguez, 2019) que es posible realizar una remoción del agente contaminante en mayor o menor medida dependiendo del método que se esté empleando. Para esto, se encontró que de los mejores métodos está el foto-Fenton, ya que no sólo degrada la sustancia, sino que tiene una gran eficacia en un corto tiempo, baja toxicidad y amigable con el medio ambiente (Zong, et al, 2024).

### Caracterización de Fenoles

La espectrofotometría es una técnica ampliamente usada para la determinación de diferentes sustancias que cuentan con la capacidad de absorber a una determinada longitud de onda; en este caso, los compuestos fenólicos son capaces de absorber en el rango del espectro del ultravioleta visible (UV) específicamente entre 269-271 nm, el ácido fénico usado en esta práctica de laboratorio tiene su pico de absorbancia a los 269.60 nm. Así, por medio de una curva de calibración es posible cuantificar muestras con que contienen ácido fénico a concentraciones desconocidas.

### Proceso foto-Fenton

La reacción de Fenton fue elaborada por H. Fenton en 1894, describiendo cómo el gran potencial oxidativo de la molécula  $H_2O_2$ , cuando el hierro es usado como catalizador en condiciones ácidas, llega a efectuar una serie de reacciones de interés investigativo. Las reacciones involucradas en el proceso Fenton están descritas por Haber y Willstätter, 1931 y son las siguientes:



Este proceso llega a oxidar el contaminante orgánico presente en la muestra, por lo que su aplicación en procesos de descontaminación del agua es viables; sin embargo, la producción de intermediarios que ralentizan el proceso perjudica la viabilidad, en consecuencia se han propuesto diversas alternativas agregando otros parámetros al método, como luz, corriente eléctrica, y sonido. De esta manera, actualmente se trabajan técnicas como el electro-Fenton, sonoro-Fenton, y foto-

Fenton, este último siendo el método de degradación de agentes contaminantes orgánicos escogido como aquel en donde está presente el fenómeno de oxidación avanzada.

El proceso Fenton tiene la particularidad de presentar ciertas deficiencias, al producirse  $Fe^{3+}$  y ralentizar el proceso, se propone una reacción fotoquímica mediante el método foto-Fenton para regenerar el  $Fe^{2+}$  e hidroxilo y así, convertir parte del sistema en uno cíclico; todo esto a modo general según la siguiente ecuación química planteada por Abad y Toro (2013).



Además, la combinación del peróxido de hidrógeno y la radiación Ultravioleta (UV) con los iones  $Fe^{2+}$  o  $Fe^{3+}$  produce más radicales hidroxilo, en consecuencia, aumenta la tasa de degradación de compuestos orgánicos (Ameta, 2018). La regeneración fotoquímica del ion  $Fe^{2+}$  por fotoreducción del ion  $Fe^{3+}$  ocurre en la reacción del proceso foto-Fenton dadas por las siguientes ecuaciones químicas propuestas por Ameta (2018)



A su vez, estudios realizados por Kavitha y Palanivelu (2004) demuestran la efectividad del método foto-Fenton por medio de radiación UV para degradar fenoles, concluyendo que la eficiencia de degradación es mayor cuando se emplea radiación UV específica por sobre la radiación solar. De esta manera, y para que se efectúe el estudio de las reacciones que ocurren en el proceso foto-Fenton, es necesaria la construcción de un fotoreactor, ya que, en este, se presenta la regeneración fotocatalítica del ion  $Fe^{2+}$  usando generalmente una lámpara de mercurio, cuya longitud de onda que emite coincide con la longitud de onda necesaria para que ocurra la foto-reducción. Este fotoreactor es, en consecuencia, el instrumento necesario para el estudio de los fenómenos involucrados, y, por ende, es necesario su uso para demostrar el efecto que produce las reacciones del proceso Fenton y foto-Fenton para la degradación de fenoles.

Las investigaciones llevadas a cabo sobre el proceso Fenton, y sus respectivas variantes, han permitido concretar un eje investigativo en la química. Su articulación con la problemática ambiental se hace presente en la medida de cómo estas investigaciones han sido estudiadas y aplicadas para degradar agentes contaminantes presentes en afluentes producto de residuos de diferentes industrias, por ende, se han venido desarrollando e investigando métodos y procesos cuya eficiencia al degradar la sustancia problema sea cada vez mayor. Del mismo modo, la construcción de los equipos ha estado guiada por la variante que el investigador quiera optar, en este caso al optar por el proceso foto-Fenton, la investigación se guía, bajo este eje investigativo del ámbito de la química, por la construcción de un foto-reactor.

**ANEXO D.** Espectrofotómetro Hitachi® utilizado en la práctica de laboratorio de la Fase 3.



**ANEXO E:** Instrumento II para la evaluación de modelos construidos por los estudiantes

### ACTIVIDAD 3: CONSTRUCCIÓN DE MODELOS EXPLICATIVOS A PARTIR DE LA PUESTA EN PRÁCTICA DE LAS REACCIONES FOTO-FENTON PARA LA DEGRADACIÓN DEL FENOL

Apreciados(as) docentes en formación, en el siguiente documento encontrarán las incógnitas a resolver a modo de informe de laboratorio. Deberán resolver atentamente las preguntas y tener en cuenta las directrices aquí mencionadas.

#### **Primera parte – Previa a consulta de información.**

Conforme a lo visto durante la práctica de laboratorio:

¿Qué pudo observar, y bajo qué propiedades? ¿Cómo podría dar una explicación a lo ocurrido? ¿Por qué cree que el fenómeno ocurre de esa manera? De acuerdo con lo anterior, construya su propia representación sobre lo que cree, ocurrió en el fotoreactor. La representación puede ser a través de dibujos, esquemas, ecuaciones, maquetas, etc.

#### **Segunda parte – Consulta de información Modelo Mental**

Con base en la práctica de laboratorio, se sugiere revisar bibliografía con relación al proceso foto-Fenton. El objetivo es, mediante la revisión bibliográfica, responder las siguientes preguntas y construir un Marco Teórico.

¿Por qué el fenómeno (oxidación avanzada, fotocatalisis,) ocurre en el fotoreactor? ¿Qué implicaciones conlleva el uso de las diferentes sustancias químicas? ¿Cómo interactúan estas sustancias?

#### **Tercera parte – Modelo Material y/o Matemático**

Teniendo en cuenta el Marco Teórico planteado, y con base en los datos experimentales obtenidos de la práctica de laboratorio, diseñar un modelo material y/o matemático que represente lo que sucede en el foto-reactor. La pregunta orientadora con la que se deben basar para el proceso de modelamiento es:

- ¿Cómo representar lo que ocurre en el fotoreactor? Partiendo de la “porción de mundo” (Chamizo, 2010) que se escogió. Para ello, se limita esta porción de mundo al sistema que comprende el fotoreactor, o el fenómeno que subyace lo ocurrido. Se recomienda hacer uso de los parámetros cinéticos, así como el empleo de gráficas y reacciones que ocurren conforme se consultaron en la Segunda Parte.

## Rúbrica 1: Diagnóstico de los Procesos de Modelización

Diseñado por: Juan Camilo Barahona Caicedo y Oscar Daniel Gordillo Castro

El presente documento hace parte del trabajo de grado titulado “El proceso foto-Fenton: un escenario para analizar procesos de modelización en la formación científica mediante casos contextualizados”. En este, se expone la rúbrica para el diagnóstico del proceso de modelización que tuvo el estudiante mientras construía el modelo propuesto (Tabla 1), en conjunto con los indicadores para establecer el nivel de profundidad (Tabla 2) conforme cada parte.

Criterio	Bajo	Medio	Alto
	Marque con una X el nivel de profundidad que obtuvo el participante en cada pregunta conforme el modelo explicativo.		
Observación e iniciación. Preguntas 1, 2 y 3.			
Representación Inicial			
Integración de la Teoría Preguntas 4, 5 y 6.			

Tabla 1. Rúbrica diagnóstico de los procesos de modelización.

Criterio	Nivel Bajo (1 punto)	Nivel Medio (3 puntos)	Nivel Alto (5 puntos)
<b>Observación e Inicialización</b>	Se limita a describir, sea el color o la turbidez, con un lenguaje coloquial. Contiene bastantes errores conceptuales o imprecisiones al referirse a los conceptos	Describe el fenómeno y menciona algunos reactivos, pero la explicación causal es intuitiva o contiene errores conceptuales. Incluye algunos componentes principales.	Describe las observaciones macroscópicas e intenta vincularlas inmediatamente a las propiedades químicas. Intenta mostrar un mecanismo o una relación causa-efecto entre los componentes (ejemplo: degradación de fenoles por oxidación)
<b>Representación Inicial</b>	La representación es muy simple, no incluye reactivos clave, o es una representación que no tiene sentido químico.	La representación incluye los componentes principales, pero sin mostrar interacción o relación causal (son elementos aislados).	La representación intenta mostrar el mecanismo inicial, la interacción entre los reactivos, demostrando un intento de explicar el porqué
<b>Integración de la Teoría</b>	El Marco Teórico es una copia textual de	Consulta información y responde las	El Marco Teórico

	definiciones sin relación con el experimento o el proceso Foto-Fenton.	preguntas, pero el texto solo define oxidación avanzada o fotocatalisis, sin articular cómo se interrelacionan en el proceso foto-Fenton que ocurre en el fotoreactor.	vincula la teoría (reacciones, sustancias) para explicar por qué ocurre el fenómeno en el fotoreactor, enfocándose en la generación de radicales hidroxilo y la foto-reducción del ion $Fe^{3+}$
--	--	--	--

Tabla 2. Nivel de profundidad por criterio.

## Rúbrica 2: Evaluación del Modelo Conceptual

Diseñado por: Juan Camilo Barahona Caicedo y Oscar Daniel Gordillo Castro

El presente documento hace parte del trabajo de grado titulado “El proceso foto-Fenton: un escenario para analizar procesos de modelización en la formación científica mediante casos contextualizados”. En este, se expone la rúbrica para la evaluación del modelo propuesto por el estudiante al haber realizado un proceso de modelización en conformidad con el proceso foto-Fenton (Tabla 1), en conjunto con los indicadores para establecer el nivel de profundidad (Tabla 2).

Criterio	Bajo	Medio	Alto
	Marque con una X el nivel de profundidad que obtuvo el participante en cada pregunta conforme el modelo explicativo.		
Validez Química y Representacional			
Relaciones y Procesos-mecanismos			
Multimodalidad y Utilidad Predictiva			

Tabla 1. Rúbrica para evaluar el modelo conceptual.

Criterio	Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto
<b>Validez Química y Representacional</b>	El modelo tiene fallos conceptuales graves, como no incluir la acción de la radiación UV; asimismo como no establecer relación entre la degradación del fenol y el peróxido.	El modelo es válido en términos de un concepto estructurante (oxidación avanzada o fotocatalisis), pero omite el ciclo fotocatalítico completo, la acción del radical hidroxilo.	El modelo representa correctamente el ciclo fotocatalítico completo en conjunto con la degradación de fenoles mediante el proceso Foto-Fenton. Se expone la generación de radicales hidroxilo, los diferentes subproductos, y la regeneración del ion $Fe^{2+}$ por la luz UV.
<b>Relaciones y Procesos-mecanismos</b>	Representa los componentes de forma aislada, sin mostrar interacciones. Es un modelo estático.	Muestra interacciones simples (ej. "el hierro reacciona con el peróxido"), pero no representa el ciclo catalítico con el rol de la luz, ni la	Representa de forma clara el ciclo catalítico del hierro, la generación de radicales $\bullet OH$ y cómo estos degradan al

		degradación de fenoles por el radical hidroxilo.	fenol, mencionando el rol de la luz UV.
<b>Multimodalidad y Utilidad Predictiva</b>	El modelo es una simple representación sin usar datos experimentales ni ecuaciones; no permite ninguna predicción. Solo describe lo que ocurrió en la práctica de laboratorio.	El modelo utiliza datos y gráficas de la práctica, así como las ecuaciones pertinentes para explicar satisfactoriamente por qué ocurrió el fenómeno, basándose en el marco teórico.	El modelo no solo explica, sino que permite hacer predicciones. El estudiante puede usarlo para hipotetizar qué pasaría si se cambia la concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> o FeSO <sub>4</sub> . El modelo está definido desde diferentes puntos que se articulan entre sí.

Tabla 2. Indicadores del nivel de profundidad por cada criterio.

# GUÍA DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MODELOS EXPLICATIVOS EN TORNO A LA TEMÁTICA DEL PROCESO FOTO-FENTON

Juan Camilo Barahona Caicedo

Oscar Daniel Gordillo Castro

Estimado(a) docente el trabajo evaluativo que usted realizará tiene como finalidad contribuir al proceso de validación del instrumento “CONSTRUCCIÓN DE MODELOS EXPLICATIVOS A PARTIR DE LA PUESTA EN PRÁCTICA DE LAS REACCIONES FOTO-FENTON PARA LA DEGRADACIÓN DEL FENOL”, el cual hace parte del trabajo de grado “El proceso foto-Fenton: un escenario para analizar procesos de modelización en la formación científica mediante casos contextualizados”, para optar por el título de Licenciado en Química, con la finalidad de responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo el abordaje de situaciones problema relacionadas con el proceso foto-Fenton mediante un enfoque de química en contexto promueve el desarrollo de procesos de modelización en un grupo estudiantes de 7° semestre de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional?, mediante el cumplimiento del objetivo general de investigación: “Analizar los procesos de modelización en un grupo de profesores en formación de 7° semestre de la Licenciatura en Química de la Universidad Pedagógica Nacional, al abordar situaciones problema relacionadas con el proceso foto-Fenton mediante un enfoque de química en contexto”. De acuerdo con Giere (1992): “Un modelo es cualquier representación que permite pensar, hablar y actuar con rigor y profundidad sobre el sistema estudiado califica como modelo teórico: no solo los modelos altamente abstractos, sino también las maquetas, las imágenes, las Tablas, las redes, las analogías... siempre que habiliten a describir, explicar, predecir e intervenir” (citado en Adúriz-Bravo, 2010, p. 248) Por esta razón se establece la siguiente guía de validación, en la cual se solicitan algunos datos personales de interés para el proceso, pero que no serán publicados en ningún momento en el documento final. Agradezco su participación en el proceso de validación.

Nombres y apellidos	
Título profesional alcanzado hasta el momento	
Área y lugar en el cual labora actualmente	
Años de experiencia docente	
Enfoques pedagógicos de interés o en los cuales haya realizado investigaciones	

A continuación, se presenta la rúbrica de valoración, en la cual usted debe asignar una valoración de entre 1 y 4, para expresar su grado de acuerdo o desacuerdo en cada uno de los enunciados que se presentan sobre la pertinencia y coherencia del “instrumento de caracterización de modelos explicativos en torno a la temática del proceso foto-Fenton”  
Tenga en cuenta que:

1= Totalmente en desacuerdo

2= En desacuerdo

3= De acuerdo

4=Totalmente de acuerdo

Adicionalmente, encontrará una columna de observaciones, para realizar comentarios y sugerencias de cada uno de los enunciados propuestos.

EVALUACIÓN GENERAL DEL INSTRUMENTO DE CARACTERIZACIÓN Y LA RÚBRICA EVALUATIVA			
Categoría	Enunciado	Valoración	Observación
Coherencia Redacción	Las preguntas son claras y coherentes		
	Las preguntas presentan buena redacción y ortografía		
	Las preguntas ofrecen la información suficiente para que el participante pueda contestarlas de forma precisa.		
	Las preguntas están planteadas de forma adecuada para la correcta interpretación y análisis por parte del participante.		
Relevancia pertinencia	Las preguntas se relacionan de forma precisa con la temática objeto de estudio.		
	Las preguntas son relevantes y pertinentes para caracterizar los modelos explicativos iniciales de los participantes.		
	La cantidad de preguntas es la adecuada para reconocer los modelos explicativos iniciales de los participantes sobre la temática.		
	La forma en cómo se plantean las preguntas es adecuada para reconocer los modelos explicativos de los participantes con respecto a la temática.		
	El contenido abordado en cada una de las preguntas es adecuado para establecer con precisión las ideas previas de los participantes sobre la temática.		
Contenido contextualización	El contenido de las preguntas se encuentra contextualizado y ofrece la posibilidad de que el participante realice un análisis adecuado de este.		
	El contenido de las preguntas es específico y apunta al análisis de modelos explicativos de la temática.		

	El contenido de las preguntas y la forma como están contextualizadas permite analizar conocimientos previos aún si el participante no conoce la temática objeto de estudio.		
Diseño	El diseño del instrumento es claro, pertinente y adecuado.		
	La forma como está diseñado el instrumento permite que se relacione y responda al objetivo que busca alcanzar.		
Categorías de Evaluación	Las categorías planteadas en el instrumento son coherentes y adecuadas para dar respuesta al objetivo.		
	Las categorías planteadas son adecuadas y se relacionan de forma directa con las preguntas que hacen parte de estas.		
¿Considera que el instrumento es aplicable?		Modificaciones sugeridas	
OBSERVACIONES GENERALES			
Nombre del evaluador Firma			

### Referencias Bibliográficas

Amador, R. (2021). Promover modelos explicativos sobre las interacciones químicas del felodipinocitocromo p450: una propuesta didáctica basada en la modelización. *Quim Nova*.

Duque, W. (2024). Los modelos explicativos de profesores de ciencias en formación al abordar el estudio de nanopartículas de especies de cobre mediante el aprendizaje basado en proyectos. Universidad Pedagógica Nacional.