

Informe Técnico Integral: Desarrollo, Síntesis y Escalado Industrial de Adsorbentes Nanomagnéticos Funcionalizados para la Recuperación Aurífera

1. Introducción y Contextualización Tecnológica

La industria minera contemporánea, específicamente el sector de la minería aluvial de oro, se encuentra en una encrucijada crítica entre la necesidad de mantener la rentabilidad operativa y la imperativa urgencia de adoptar prácticas ambientalmente sostenibles. Tradicionalmente, la recuperación de oro fino y ultrafino ha dependido casi exclusivamente de la amalgamación con mercurio o la cianuración, procesos que, si bien son conocidos, conllevan pasivos ambientales devastadores y riesgos severos para la salud humana. En respuesta a este desafío, la nanotecnología ha proporcionado una solución disruptiva: el uso de **nanopartículas magnéticas funcionalizadas** capaces de capturar selectivamente el oro mediante mecanismos de quimisorción, para luego ser recuperadas eficientemente mediante campos magnéticos externos.

Este informe se constituye como una guía técnica exhaustiva, diseñada específicamente para profesionales que incursionan por primera vez en el manejo de tecnologías magnéticas y procesos de síntesis de nanomateriales. El objetivo es proporcionar no solo una "receta" de preparación, sino una comprensión profunda de los principios fisicoquímicos, la logística de aprovisionamiento en el contexto venezolano (específicamente la región de Zulia y Maracaibo), y los protocolos de seguridad industrial necesarios para manipular campos magnéticos de alta intensidad y reactivos químicos avanzados.

La tecnología que se detalla a continuación se basa en la arquitectura "núcleo-coraza" (*core-shell*), donde un núcleo de magnetita (Fe_3O_4) proporciona la capacidad de respuesta magnética, una capa de sílice (SiO_2) otorga estabilidad química y dispersabilidad, y una funcionalización superficial con grupos tiol (-SH) actúa como el "gancho molecular" selectivo para el oro. Este enfoque emula y expande las capacidades técnicas de productos comerciales como el "Eco Capturador", adaptando la síntesis a precursores industriales accesibles localmente, como el silicato de sodio, en lugar de reactivos de laboratorio costosos como el TEOS (tetraetilortosilicato).

A lo largo de este documento, se desglosarán meticulosamente los fundamentos teóricos del superparamagnetismo, la química de coordinación entre el azufre y el oro, y la cinética de

polimerización de los silicatos. Asimismo, se abordará la ingeniería de proceso necesaria para transformar estos conceptos en un producto tangible, analizando desde la construcción de separadores magnéticos manuales hasta la formulación de recubrimientos estables en matrices poliméricas.

2. Fundamentos Teóricos de la Nanotecnología Magnética Aplicada

Para desarrollar un producto eficaz y manipularlo con seguridad, es imperativo comprender la física y la química subyacente. La "magia" de este producto no reside en un solo componente, sino en la sinergia entre sus tres capas estructurales.

2.1. El Núcleo Magnético: Física del Superparamagnetismo

El componente central del producto es la magnetita (Fe_3O_4), un óxido de hierro ferrimagnético. Sin embargo, a escala nanométrica (generalmente por debajo de los 20-30 nm), la magnetita exhibe un fenómeno cuántico conocido como **superparamagnetismo**.

A diferencia de los imanes permanentes (ferromagnetismo) que retienen su magnetización después de retirar un campo externo (lo que causaría que las partículas se agruparan irreversiblemente en grumos inútiles), las nanopartículas superparamagnéticas tienen una coercitividad cero o despreciable. Esto significa que:

1. **En presencia de un imán:** Se magnetizan fuertemente y son atraídas, permitiendo su separación del agua o lodo.
2. **Al retirar el imán:** Pierden inmediatamente su magnetización y pueden redispersarse en el líquido como si nunca hubieran estado magnetizadas.

Esta propiedad es crítica para la funcionalidad del producto. Si las partículas retuvieran magnetismo (remanencia), se aglomerarían magnéticamente, reduciendo su área superficial efectiva y, por ende, su capacidad para capturar oro. Por lo tanto, el protocolo de síntesis que se presentará más adelante está diseñado específicamente para producir cristales dentro de este rango de tamaño crítico mediante el método de co-precipitación controlada.¹

2.2. La Coraza de Sílice: Estabilidad Química y Modificación Superficial

El hierro es susceptible a la oxidación (transformándose en óxidos no magnéticos como la hematita) y a la disolución en ambientes ácidos, comunes en la minería. Para proteger el núcleo magnético, se recubre con una capa de sílice amorfa (SiO_2).

El uso de **Silicato de Sodio** (Na_2SiO_3) como precursor para esta capa es una elección estratégica tanto económica como técnica. En solución acuosa, el silicato de sodio puede polimerizarse sobre la superficie de la magnetita mediante un ajuste preciso del pH. Esta capa

de sílice cumple tres funciones vitales:

1. **Barrera Física:** Impide que el ácido ataque al hierro, preservando la respuesta magnética del producto durante su uso en campo.⁴
2. **Espaciador Dieléctrico:** Reduce las interacciones dipolo-dipolo entre las partículas magnéticas, mejorando la estabilidad coloidal y previniendo la aglomeración.⁵
3. **Plataforma de Anclaje:** La superficie de la sílice es rica en grupos silanol (Si-OH). Estos grupos son químicamente activos y sirven como puntos de anclaje para los agentes de acoplamiento silano que atraparán el oro.⁶

2.3. La Funcionalización: Química de Coordinación Oro-Azufre

La captura de oro no se realiza por magnetismo directo (el oro es diamagnético y no es atraído por imanes), sino por afinidad química. El agente clave aquí es el **Silano KH-590** (3-Mercaptopropiltrimetoxisilano).

Este compuesto orgánico bifuncional posee una "cabeza" de silicio que se une covalentemente a la coraza de sílice de la nanopartícula, y una "cola" que termina en un grupo **tiol** (-SH). El azufre (S) es un átomo "blando" en la teoría de ácidos y bases de Pearson, lo que significa que tiene una afinidad extraordinaria por metales "blandos" como el oro (Au).

Cuando una partícula de oro, incluso de tamaño atómico o iónico disuelto, entra en contacto con los "ganchos" de tiol del producto, se forma un enlace covalente coordinado Au-S extremadamente fuerte. Este enlace es lo suficientemente robusto para resistir el lavado y la turbulencia del proceso minero, permitiendo que la nanopartícula magnética "arrastre" consigo al oro cuando se aplica el campo magnético para la recuperación.⁷

2.4. La Matriz de Soporte: Reología y Aplicación

El producto final comercial, como se describe en la documentación de referencia ("Eco Capturador"), no se suministra como un polvo seco volátil, sino como una suspensión líquida viscosa estabilizada, probablemente con **Goma Xantana**.

La goma xantana confiere propiedades pseudoplásticas al fluido: disminuye su viscosidad bajo cizallamiento (cuando se agita o se rocía), permitiendo una fácil aplicación, pero recupera su viscosidad al reposar, lo que ayuda a que las partículas funcionales se adhieran a las fibras de las alfombras mineras sin lavarse inmediatamente. Además, esta matriz polimérica ayuda a mantener las partículas magnéticas en suspensión durante el almacenamiento, evitando que se sedimenten en un bloque sólido difícil de redispersar.⁷

3. Análisis Estratégico de Aprovechamiento en Venezuela (Zulia)

Dado que el usuario manifiesta no haber trabajado previamente con esta tecnología, la adquisición de los materiales correctos es el primer obstáculo crítico. A continuación, se presenta un análisis detallado del mercado local en Maracaibo y las estrategias de sustitución o importación necesarias.

3.1. Precursor de Sílice: Silicato de Sodio (Na_2SiO_3)

El silicato de sodio, conocido coloquialmente como "vidrio líquido" o "agua de vidrio", es un insumo industrial común en Venezuela, utilizado en la formulación de detergentes, tratamiento de aguas y construcción (como endurecedor de concreto e impermeabilizante).

- **Especificaciones Técnicas Requeridas:** Para la síntesis de recubrimientos en nanopartículas, se prefiere un silicato con una relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ entre 2.0 y 3.2. Una relación más alta indica mayor contenido de sílice, lo que favorece una polimerización más rápida al acidificar.¹¹
- **Proveedores Nacionales:**
 - **Intersilices de Venezuela:** Es el fabricante líder en el país. Producen silicatos con ratios de 2.0, 2.35 y 3.2. Contactar directamente con ellos para compras de volumen industrial (tambores o cisternas) es la opción más económica y fiable para garantizar la calidad química.¹¹
 - **Distribuidores Regionales (Zulia/Occidente):** En Maracaibo, empresas como **Donvic (Gigaquim)** y **Quibarca** actúan como distribuidores mayores de productos químicos industriales. Quibarca, en particular, destaca por su logística y certificaciones de calidad, siendo un punto de contacto clave para adquirir tanto el silicato como los ácidos necesarios.¹³
 - **Sector Construcción:** Si la compra industrial directa es compleja inicialmente, el silicato de sodio se puede encontrar en ferreterías industriales grandes en Maracaibo (zona industrial, sector Los Haticos o Circunvalación 2) vendido como aditivo para concreto o impermeabilizante de tanques. Marcas comerciales pueden variar, pero el producto químico base es el mismo. Verifique la ficha técnica para asegurar que no contenga aditivos colorantes o cargas extrañas.¹⁵

3.2. Precursores de Hierro: Sulfato Ferroso y Cloruro Férrico

La síntesis del núcleo magnético requiere una mezcla estequiométrica precisa de hierro en dos estados de oxidación: Fe(II) y Fe(III).

- **Sulfato Ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$):**
 - *Uso común:* Fertilizante agrícola, tratamiento de aguas (coagulante), suplemento animal.
 - *Proveedores:* **Fertiquim** es un proveedor clave en Venezuela que maneja materias primas para alimentos y agricultura, y es probable que tenga sulfato ferroso de grado técnico o alimenticio.¹⁷ **Masuca** y **Contyquim**, enfocados en tratamiento de aguas, son fuentes excelentes para este reactivo en el occidente del país.¹⁸

- *Alternativa Farmacéutica:* Aunque costoso para producción, el sulfato ferroso se vende en **Farmatodo** como suplemento. Esto es útil *solo* para pruebas de concepto muy pequeñas (gramos), pero inviable para producción.²⁰
- **Cloruro Férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$):**
 - *Uso común:* Coagulante primario en plantas de tratamiento de agua potable y residual, grabado de circuitos electrónicos.
 - *Proveedores:* Nuevamente, **Quibarca** y **Tratamientos Químicos C.A.** (ubicada en Maracaibo, zona industrial) son los proveedores idóneos. Estas empresas suministran reactivos a la industria petrolera y de aguas en el Zulia, por lo que el cloruro férrico es un *commodity* estándar en su inventario.¹⁴

3.3. El Agente Funcional: Silano KH-590 (MPTMS)

Este es el componente más crítico y difícil de conseguir localmente en una ferretería. Es un químico de especialidad.

- **Identidad Química:** (3-Mercaptopropil)trimetoxisilano. CAS: 4420-74-0. También conocido comercialmente como Silquest A-189, Dynasylan MTMO, o KH-590 (nomenclatura asiática común).²²
- **Estrategia de Compra:**
 1. **Proveedores de Laboratorio:** Contactar a **Biochemicals de Venezuela** o **Labtronic** (con sede en Maracaibo). Ellos importan reactivos analíticos y pueden traer el silano bajo pedido (marcas como Sigma-Aldrich o Merck), aunque el precio será elevado (grado reactivo).²⁵
 2. **Industria del Caucho y Neumáticos:** El KH-590 se usa industrialmente para mejorar la adherencia de la sílice en los neumáticos. Investigar proveedores de materias primas para la industria del caucho en Valencia o Maracay que tengan distribución nacional podría revelar una fuente de silano de grado industrial mucho más económico.²⁷
 3. **Importación Directa:** Dado que se requieren cantidades pequeñas (el silano es solo el ~2% de la fórmula), la importación vía *courier* o casillero internacional desde proveedores en EE.UU. o China (Alibaba/AliExpress para muestras industriales) es una vía realista. Se clasifica bajo partidas arancelarias de compuestos organo-inorgánicos.

3.4. Imanes de Neodimio (NdFeB)

Para la separación y lavado de las nanopartículas, los imanes de ferrita (negros, comunes) no sirven; son demasiado débiles. Se requieren imanes de **Tierras Raras (Neodimio)**.

- **Disponibilidad:** Se encuentran con relativa facilidad en el mercado de repuestos electrónicos y ferreterías especializadas, o a través de plataformas como **MercadoLibre Venezuela**. Busque vendedores en Zulia para entrega rápida.
- **Especificación:** Busque grado **N52** (la máxima potencia comercial) o N45. Formas de

disco o bloque son ideales para construir racks de separación.²⁹

4. Guía Operativa de Seguridad y Manejo de Materiales Magnéticos

El usuario ha indicado explícitamente: "Nunca he trabajado con magnética". Esta sección es vital para prevenir accidentes graves, ya que los imanes industriales de neodimio no son juguetes y presentan riesgos físicos significativos.

4.1. Peligros Físicos de los Imanes de Neodimio

1. **Riesgo de Atrapamiento y Aplastamiento:** Dos imanes de neodimio de tamaño mediano (ej. 5x5 cm) se atraerán con una fuerza de decenas de kilogramos. Si un dedo queda atrapado entre ellos, el resultado puede ser desde un hematoma severo hasta fracturas óseas o amputación traumática de la punta del dedo.
 - *Regla de Oro:* **NUNCA** manipule dos imanes grandes al mismo tiempo con las manos desnudas cerca uno del otro. Manténgalos siempre separados por materiales no magnéticos (madera, plástico) y almacénelos con separadores gruesos.
2. **Proyección de Fragmentos (Shrapnel):** Los imanes de neodimio son cerámicos sinterizados; son extremadamente duros pero frágiles como el vidrio. Si se permite que dos imanes choquen violentamente ("snap"), se romperán y lanzarán esquirlas afiladas a gran velocidad.
 - *Protección:* El uso de **lentes de seguridad** es obligatorio siempre que se manipulen estos imanes.³²
3. **Interferencia Electrónica y Médica:** Los campos magnéticos intensos pueden desactivar marcapasos, dañar tarjetas de crédito, discos duros y relojes mecánicos. Mantenga una distancia de seguridad de al menos 1 metro con equipos sensibles.

4.2. Construcción de un Rack de Separación Magnética (DIY)

Para procesar las nanopartículas (lavarlas y cambiarles el solvente), no se recomienda la filtración tradicional (el papel de filtro se tapaná) ni la centrifugación (requiere equipos costosos para grandes volúmenes). La solución es la **Decantación Magnética**.

Diseño del Separador Manual:

Para un entorno de laboratorio o planta piloto en Maracaibo, puede construir un separador eficiente con materiales locales:

1. **Base:** Utilice un bloque de madera o plástico (teflón o nylon). No use metal ferroso (hierro/acero) para la estructura.
2. **Alojamiento:** Perfore orificios en la base donde encajen sus vasos de precipitado o botellas de reacción.
3. **Posicionamiento de Imanes:** Incruste imanes de neodimio potentes (discos de 20-30mm) en la madera, *justo al lado* de donde se asentará la pared del vaso.

- *Funcionamiento:* Al colocar el vaso con la suspensión negra en el rack, el imán atraerá todas las partículas hacia la pared del vaso en cuestión de minutos (dependiendo de la viscosidad). El líquido quedará transparente y podrá verse (decantarse) sin perder el producto sólido pegado a la pared por el imán.³³

4.3. Seguridad Química (MSDS Resumida)

- **Silanos (KH-590):** Reaccionan con la humedad liberando metanol (tóxico e inflamable). Deben manipularse en áreas muy bien ventiladas o bajo campana extractora. Evite el contacto con la piel; penetran fácilmente.²²
- **Nanopartículas en Polvo:** Si el producto se seca, el polvo de nanopartículas es un riesgo respiratorio severo. Siempre manipule el material en estado húmedo/suspensión. Si debe secarlo, use mascarilla N95 o superior P100.³⁶

5. Protocolo Maestro de Preparación del Producto (Paso a Paso)

Este protocolo está diseñado para ser escalable, comenzando con un lote piloto de laboratorio para familiarizarse con la química y los cambios visuales.

Fase 0: Preparación de Soluciones Stock

La precisión en las concentraciones es clave para evitar la formación de óxidos no magnéticos.

- Solución de Hierro (Fe-Mix):**
 - Disolver **20 gramos de Cloruro Férrico** ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y **10 gramos de Sulfato Ferroso** ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en **100 mL de agua destilada**.
 - *Nota Crítica:* La relación molar debe ser estrictamente **2 Fe(III) : 1 Fe(II)**. Si hay exceso de Fe(III), se formará herrumbre roja no magnética. Si hay exceso de Fe(II), la oxidación será incontrolada.
 - *Tip:* Calentar el agua previamente a 80°C ayuda a eliminar el oxígeno disuelto, mejorando la calidad magnética.³⁷
- Solución Alcalina (Precipitante):**
 - Disolver **10 gramos de Hidróxido de Sodio (Soda Cáustica)** en **100 mL de agua destilada**. ¡Precaución! Esta reacción es exotérmica (calienta el agua).
- Solución de Silicato Diluido:**
 - Tomar el Silicato de Sodio industrial (generalmente muy viscoso) y diluirlo al **10-15% en peso** con agua destilada. Debe quedar fluido como el agua.

Fase 1: Síntesis del Núcleo de Magnetita (Fe_3O_4)

Objetivo: Crear partículas negras superparamagnéticas.

1. **Reacción:** Coloque la Solución Alcalina en un vaso de precipitado grande y agite vigorosamente (agitación mecánica o magnética).
2. **Adición:** Vierta la Solución de Hierro (Fe-Mix) lentamente sobre la solución alcalina agitada.
3. **Observación Visual:** La mezcla pasará instantáneamente de naranja/marrón a un **negro intenso**. Este cambio de color confirma la formación de magnetita.¹
 - *Reacción:* $\text{Fe}^{2+} + 2\text{Fe}^{3+} + 8\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ (negro)} + 4\text{H}_2\text{O}$
4. **Maduración:** Mantenga la agitación y la temperatura a **80°C durante 30 minutos**. Esto cristaliza mejor las partículas, haciéndolas más magnéticas y estables.³⁹
5. **Lavado por Decantación Magnética:**
 - Retire la agitación. Acerque el imán de neodimio por fuera del vaso.
 - Observe cómo el material negro se "pega" a la pared del vaso cerca del imán. El líquido sobrenadante debe quedar claro (o ligeramente amarillento).
 - Vierta el líquido (deséchelo, es agua salada básica).
 - Agregue agua destilada limpia, retire el imán, agite para redispersar el "lodo" negro.
 - Repita este proceso de lavado con imán **3 o 4 veces** hasta que el pH del agua de lavado sea casi neutro (pH 7-8).⁴⁰

Fase 2: Recubrimiento con Sílice (Proceso con Silicato de Sodio)

Objetivo: Crear la coraza protectora sobre la magnetita. Este es el método "verde" y económico usando silicato local en lugar de TEOS.

1. **Dispersión:** Tome el lodo de magnetita lavada (aprox. 5g de sólido) y dispérselo en 200 mL de agua destilada. Use ultrasonido si es posible para romper grumos; si no, agitación muy fuerte.⁴²
2. **Adición de Silicato:** Agregue la solución de Silicato de Sodio diluido a la dispersión de magnetita. La cantidad depende del espesor deseado, pero una relación inicial de **10 mL de silicato diluido por cada gramo de magnetita** es un buen punto de partida.⁴³
3. **Gelificación Controlada (El paso crítico):**
 - La mezcla tendrá un pH muy alto (>11) debido al silicato. A este pH, la sílice no precipita.
 - Caliente a **80-90°C**.
 - Agregue muy lentamente (gota a gota) **Ácido Clorhídrico (HCl) diluido** mientras agita.
 - Monitoree el pH. A medida que el pH baja, el silicato comienza a polimerizar sobre la superficie de la magnetita.
 - **Punto Final:** Detenga la adición de ácido cuando el pH llegue a **6.0 - 7.0**. Si baja demasiado rápido o demasiado (pH < 4), se formará un gel masivo de sílice (como gelatina) separado de las partículas.⁴³
 - *Visual:* La solución puede volverse ligeramente turbia o grisácea, indicando la formación de la capa de sílice.
4. **Curado:** Mantenga la agitación a temperatura ambiente por 2-3 horas para endurecer la

capa.

5. Lavado y Cambio de Solvente:

- Lave magnéticamente 3 veces con agua.
- **Importante:** Realice 2 lavados finales con **Etanol (Alcohol Etílico)**. Esto elimina el agua y prepara la superficie para recibir el silano, que reacciona mejor en alcohol.⁴⁶

Fase 3: Funcionalización (Activación con Silano KH-590)

Objetivo: Anclar los ganchos de azufre para atrapar el oro.

1. **Hidrólisis del Silano:** En un vaso separado, prepare una solución de Etanol (95%) y Agua (5%). Ajuste el pH a 4-5 con unas gotas de Ácido Acético (Vinagre concentrado). Añada el Silano KH-590 al 2-5% en peso. Agite por 30-60 minutos. Esto "activa" el silano (hidrólisis de grupos metoxi a silanoles).⁴⁷
2. **Reacción de Injerto:** Vierta la solución de silano activado sobre sus nanopartículas recubiertas de sílice (que están dispersas en etanol).
3. **Condensación:** Caliente la mezcla a **60-70°C** bajo agitación (reflujo si es posible para no evaporar el alcohol) durante **4 a 12 horas**. El calor es necesario para formar enlaces covalentes permanentes ($\text{\$Si-O-Si\$}$) entre la coraza de la partícula y el silano.⁴⁶
4. **Lavado Final:** Lave rigurosamente con etanol (3 veces) usando el imán para eliminar cualquier exceso de silano libre que no se haya unido. El silano libre es un desperdicio y puede contaminar el proceso de recuperación de oro.
5. **Secado (Opcional):** Si desea un polvo, seque en estufa a **60-80°C**. No exceda los 100°C o dañará los grupos tiol orgánicos.⁵⁰

Fase 4: Formulación del Producto Final (Tipo "Eco Capturador")

Para vender o usar el producto como recubrimiento de alfombras:

1. **Base Viscosa:** Prepare una solución de agua con **Goma Xantana** al 0.5% - 1.0%. Agite hasta que no haya grumos y se forme un gel fluido.
2. **Mezcla:** Incorpore las nanopartículas funcionalizadas (húmedas o secas) en este gel a una concentración del **5% al 10%** en peso.
3. **Homogeneización:** Agite bien. La goma xantana evitará que las partículas pesadas de hierro se vayan al fondo del envase, manteniéndolas en suspensión listas para aplicar con spray.⁷

6. Control de Calidad y Validación

Antes de llevar el producto a la mina, debe verificar que funciona.

6.1. Prueba de Respuesta Magnética

Simplemente acerque un imán al frasco del producto final. El líquido negro debe reaccionar

inmediatamente moviéndose hacia el imán. Si la respuesta es lenta, el núcleo de magnetita se ha oxidado o la capa de sílice es demasiado gruesa (demasiada masa inerte).⁵¹

6.2. Prueba de Adhesión de Plata (Validación de Tioles)

Esta es una prueba de campo inteligente mencionada en los documentos de referencia.⁷

- *Principio:* Los grupos tiol ($-SH$) tienen afinidad por la plata además del oro.
- *Procedimiento:* Aplique su producto sobre una superficie de prueba. Agregue una gota de solución de Nitrato de Plata ($AgNO_3$).
- *Resultado:* Si la superficie se oscurece rápidamente (formación de sulfuro de plata), significa que sus "ganchos" de tiol están activos y disponibles. Si no hay cambio, la funcionalización falló.

6.3. Prueba de Hidrofobicidad (Efecto Loto)

El silano KH-590 tiene cadenas de carbono que repelen el agua. Rocíe agua sobre una alfombra tratada con su producto. El agua debería formar gotas esféricas ("perlear") en lugar de mojar la tela inmediatamente. Esto confirma que el recubrimiento está presente y activo.⁷

7. Conclusiones y Recomendaciones de Implementación

El desarrollo de este nanoadsorbente magnético es técnicamente viable en Venezuela utilizando una cadena de suministro híbrida: precursores volumétricos nacionales (Intersilices, Fertiquim, Quibarca) e importación estratégica de bajo volumen para el componente activo de alto valor (Silano KH-590).

Recomendaciones Finales:

1. **Inicio Gradual:** No intente producir 100 litros en el primer lote. Comience con síntesis de 500 mL para dominar la técnica de "punto de gelificación" del silicato, que es el paso más difícil de controlar sin experiencia.
2. **Inversión en Imanes:** Compre imanes de neodimio de calidad (N52) inmediatamente. Son la herramienta fundamental que hace posible todo el proceso de lavado y recuperación sin necesidad de centrifugas industriales costosas.
3. **Seguridad Rigurosa:** Implemente protocolos estrictos para el manejo de los imanes y los reactivos químicos. La seguridad personal es prioritaria frente a la producción.

Este informe proporciona la hoja de ruta completa, desde la teoría molecular hasta la lista de compras en Maracaibo, permitiéndole manufacturar un producto de alta tecnología que compite directamente con soluciones internacionales para la minería ecológica.

Tablas de Datos Relevantes:

Tabla 1. Resumen de Proveedores Locales (Región Zulia/Venezuela)

Material	Proveedor Sugerido	Ubicación/Notas	Referencia
Silicato de Sodio	Intersilices de Venezuela	Fabricante Nacional (Valencia/Nacional)	11
Silicato de Sodio	Donvic / Gigaquim	Distribuidor Zulia	13
Sulfato Ferroso	Fertiquim / Masuca	Distribuidores Occidente	17
Cloruro Férrico	Quibarca / Tratamientos Químicos	Maracaibo (Zona Industrial)	14
Soda Cáustica	Ferreterías Industriales / Masuca	Común en Maracaibo	18
Imanes Neodimio	MercadoLibre (Vendedores Zulia)	Ferretería Bervar / Otros	29
Silano KH-590	Biochemicals de Venezuela / Importación	Requiere gestión especializada	23

Tabla 2. Parámetros Críticos de Síntesis

Parámetro	Valor Óptimo	Efecto si se desvía
Ratio Fe(III):Fe(II)	2:1 (Molar)	Formación de óxidos no magnéticos (rojos/marrones)

Temperatura Síntesis	80 °C	Cristalinidad pobre, baja respuesta magnética
pH Gelificación Silicato	6.0 - 7.0	pH muy bajo = gel masivo fuera de las partículas. pH alto = no hay recubrimiento.
Temperatura Funcionalización	60 - 70 °C	Frío = reacción muy lenta/incompleta. Muy caliente = degradación del tiol.

Referencias citadas en el texto: ⁴²

Fuentes citadas

1. Magnetita sintetizada con cloruro férrico y sulfato ferroso frente a - Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas, acceso: diciembre 18, 2025, <https://revibiomedica.sld.cu/index.php/ibi/article/download/3373/1553>
2. UNIVERSIDAD DE OVIEDO SÍNTESIS Y FUNCIONALIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS, acceso: diciembre 18, 2025, https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/47759/3/TFM_AymaraLopezMencia.pdf
3. Fe₃O₄ Nanostructure Synthesis and Application - Sigma-Aldrich, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.sigmaaldrich.com/US/en/technical-documents/technical-article/materials-science-and-engineering/batteries-supercapacitors-and-fuel-cells/shape-controlled-nanostructures>
4. One-step synthesis of silica-coated magnetite nanoparticles by electrooxidation of iron in sodium silicate solution - ResearchGate, acceso: diciembre 18, 2025, https://www.researchgate.net/publication/234045689_One-step_synthesis_of_silica-coated_magnetite_nanoparticlesby_electrooxidation_of_iron_in_sodium_silicate_solution
5. Synthesis of Silica-coated Iron Oxide Nanoparticles: Preventing Aggregation without Using Additives or Seed Pretreatment - NIH, acceso: diciembre 18, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5937108/>
6. Novel synthesis of core-shell structured Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles via sodium silicate, acceso: diciembre 18, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/339771849_Novel_synthesis_of_core-shell_structured_Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles via sodium silicate](https://www.researchgate.net/publication/339771849_Novel_synthesis_of_core-shell_structured_Fe3O4SiO2_nanoparticles_via_sodium_silicate)
7. ECO CAPTURADOR- julio.pdf

8. Formation model of Fe_3O_4 - SiO_2 -SH from sodium silicate solution;... - ResearchGate, acceso: diciembre 18, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Formation-model-of-Fe-3-O-4-SiO-2-SH-from-sodium-silicate-solution-a-formation-of_fig2_266401367
9. Coating of magnetite with mercapto modified rice hull ash silica in a one-pot process. | Sigma-Aldrich - Merck Millipore, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.merckmillipore.com/Nl/es/tech-docs/paper/644574>
10. Fabrication of Silica-Coated Gold Nanorods Functionalized with DNA for Enhanced Surface Plasmon Resonance Imaging Biosensing Applications | Langmuir - ACS Publications, acceso: diciembre 18, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la902675s>
11. Intersilices | Lideres de la producción de silicato de sodio Venezolano, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.intersilicesdevenezuela.com/>
12. Silicato de Sodio - Intersilices, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.intersilicesdevenezuela.com/productos/silicato-de-sodio>
13. GIGAQUIM - Grupo Donvic, Venezuela, acceso: diciembre 18, 2025, <https://donvic.com.ve/gigaquim.html>
14. Quibarca - Química para la Industria, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.quibarca.com/>
15. Silicato de Sodio: Características, ventajas y usos de este endurecedor - PSQ Argentina, acceso: diciembre 18, 2025, <https://psqargentina.com/novedades/silicato-de-sodio/>
16. Silicato de sodio: Todo lo que necesitas saber sobre este endurecedor - deepEX, acceso: diciembre 18, 2025, <https://deepex.net/silicato-de-sodio/>
17. Fertiquim, acceso: diciembre 18, 2025, <https://fertiquim.com.ve/>
18. MASUCA - Productos Químicos., acceso: diciembre 18, 2025, <https://masuca.com.ve/>
19. SULFATO FERROSO P/ TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES - Contyquim, acceso: diciembre 18, 2025, <https://contyquim.com/productos/sulfato-ferroso>
20. Sulfato Ferroso Hierro 300 mg Laproff Blister x 10 Tabletas - Farmatodo, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.farmatodo.com.ve/producto/111969515-hierro-sulfato-ferroso-300mg-blister-10tabletas-laproff>
21. TRATAMIENTOS QUIMICOS | www.tratamientosquimicos.com, acceso: diciembre 18, 2025, <https://tratamientosquimicos.com/>
22. Coupling agent (3-Mercaptopropyl)trimethoxysilane/KH-590 -Beijing Entrepreneur Science & Trading Co., Ltd, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.entrepreneur-cn.com/Products/-3-Mercaptopropyl-trimethoxysilane-KH-590-CAS-4420-74-0-310.html>
23. kh590 | CAS#:14814-09-6 | Chemsrcc, acceso: diciembre 18, 2025, https://www.chemsrc.com/en/cas/14814-09-6_313015.html
24. (3-Mercaptopropyl)trimethoxysilane | $\text{C}_6\text{H}_{16}\text{O}_3\text{Si}$ | CID 20473 - PubChem, acceso: diciembre 18, 2025, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3-Mercaptopropyl-trimethoxysilane>
25. Nosotros - Labtronic, acceso: diciembre 18, 2025,

- <https://labtronicca.com/nosotros/>
26. Biochemicals de Venezuela – Equipos de Laboratorios, acceso: diciembre 18, 2025, <https://biochemicals.com.ve/>
 27. KH-590 (CAS No.14814-09-6) - silane coupling agent, acceso: diciembre 18, 2025, <http://www.silanecouplingagent.com/kh-590-cas-no-14814-09-6-products.html>
 28. Overview of CFS-740 3-Mercaptopropyltrimethoxysilane Cas 4420-74-0 [KBM-803;A-189;KH590;Z-6062;MTMO;GENIOSIL GF70;M8500] - Hubei Co-Formula Material Tech Co.,Ltd., acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.cfmats.com/about-co-formula/overview-of-cfs-740-3-mercaptopropyltrimethoxysilane-cas-4420-74-0-kbm-803a-189kh590z-6062mtmogeniosil-gf70m8500.html>
 29. Venta Imanes De Neodimio En Caracas | MercadoLibre, acceso: diciembre 18, 2025, <https://listado.mercadolibre.com.ve/venta-imanes-de-neodimio-en-caracas>
 30. Imanes Neodimio Carabobo | MercadoLibre, acceso: diciembre 18, 2025, <https://listado.mercadolibre.com.ve/imanes-neodimio-carabobo>
 31. Imanes De Neodimio Maracaibo | MercadoLibre, acceso: diciembre 18, 2025, <https://listado.mercadolibre.com.ve/imanes-de-neodimio-maracaibo>
 32. 50 ml Magnetic Separation Rack - NEB, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.neb.com/en-us/products/s1507-50-ml-magnetic-separation-rack>
 33. Build Your Own Magnet Separator | K&J Magnetics Blog, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.kjmagnetics.com/blog/build-your-own-magnet-separator>
 34. Magnetic Separation Stand : 3 Steps (with Pictures) - Instructables, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.instructables.com/Magnetic-Separation-Stand/>
 35. Stick a magnet on a trash can for this GENIUS hack! - YouTube, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=y-ajknIAU1w>
 36. Nanoparticles Standard Operating Procedure (SOP), acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.purdue.edu/ehps/rem/documents/sops/sopnanoparticles.docx>
 37. How can I synthesize Fe₃O₄ nanoparticles by co-precipitation method? - ResearchGate, acceso: diciembre 18, 2025, [https://www.researchgate.net/post/How-can-I-synthesize-Fe₃O₄-nanoparticles-by-co-precipitation-method](https://www.researchgate.net/post/How-can-I-synthesize-Fe3O4-nanoparticles-by-co-precipitation-method)
 38. Synthesis nano core-shell material Fe₃O₄@SiO₂ for magnetorheological finishing with Halbach array and regenerative abrasive system | Manufacturing Review, acceso: diciembre 18, 2025, https://mfr.edp-open.org/articles/mfreview/full_html/2024/01/mfreview240017/mfreview240017.html
 39. Preparation and Characterization Iron Oxide (Fe₃O₄) Magnetic Nano Particleg, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.jrmds.in/articles/preparation-and-characterization-iron-oxide-fesub3subosub4sub-magnetic-nano-particleg-44904.html>
 40. US7879153B1 - Method for cleaning metal nanoparticles - Google Patents, acceso: diciembre 18, 2025, <https://patents.google.com/patent/US7879153B1/en>
 41. Protocols for isolation and characterization of nanoparticle biomolecular corona complexes, acceso: diciembre 18, 2025,

- <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11301017/>
42. Effect of concentration of sodium silicate solution in the synthesis of silica-coated magnetite nanoparticles by ultrasonication - ResearchGate, acceso: diciembre 18, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/313264740_Effect_of_concentration_of_sodium_silicate_solution_in_the_synthesis_of_silica-coated_magnetite_nanoparticles_by_ultrasonication
 43. Coating of magnetite with mercapto modified rice hull ash silica in a one-pot process - PubMed Central, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4177443/>
 44. Synthesis and Characterization of Magnetic Fe₃O₄@SiO₂ Core/Shell Nanocomposite - AIP Publishing, acceso: diciembre 18, 2025,
https://pubs.aip.org/aip/acp/article-pdf/doi/10.1063/5.0093462/16203535/020010_1_online.pdf
 45. Preparation of silica-magnetite nanoparticle mixed hemimicelle sorbents for extraction of several typical phenolic compounds from environmental water samples, acceso: diciembre 18, 2025,
<http://library.dphen1.com/documents/papers/ZhaoX-JChromA-2008Final.pdf>
 46. Surface functionalization of silica particles for their efficient fluorescence and stereo selective modification - Instituto de Física, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://www.fisica.unam.mx/liquids/papers/86.pdf>
 47. Kinetics of silanization: Effects of silica content and contact time - PlumX, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://plu.mx/plum/a/?doi=10.1016%2Fj.dental.2023.08.041&theme=plum-science-direct-theme&hideUsage=true>
 48. The Effect of Silanization Temperature and Time on the Marching Modulus of Silica-Filled Tire Tread Compounds - Semantic Scholar, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://pdfs.semanticscholar.org/d43b/e6612f35f32510e31f314b4ec4fa2515f38b.pdf>
 49. Enhancing the Silanization Reaction of the Silica-Silane System by Different Amines in Model and Practical Silica-Filled Natural Rubber Compounds - MDPI, acceso: diciembre 18, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/6/584>
 50. Can I dry magnetic nanoparticles at 60 degree Celcius in oven? - ResearchGate, acceso: diciembre 18, 2025,
https://www.researchgate.net/post/Can_I_dry_magnetic_nanoparticles_at_60_degree_Celcius_in_oven
 51. SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF Fe₃O₄@SiO₂ SUB-NANO CORE/SHELL WITH SiO₂ DERIVED FROM RICE HUSK ASH - Semantic Scholar, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://pdfs.semanticscholar.org/79f2/f38a49cc5b967ff5206fdb4826a2ece1a066.pdf>
 52. Soda Caustica Maracaibo | MercadoLibre, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://listado.mercadolibre.com.ve/soda-caustica-maracaibo>
 53. Synthesis of Silica Nanoparticles from Sodium Silicate: Application Notes and

- Protocols - Benchchem, acceso: diciembre 18, 2025,
https://www.benchchem.com/pdf/Synthesis_of_Silica_Nanoparticles_from_Sodium_Silicate_Application_Notes_and_Protocols.pdf
54. Mercaptopropyl trimethoxy silane(KH-590) - WUHAN GLORY Co., Ltd., acceso: diciembre 18, 2025,
https://www.glorywh.com/e_productshow/?53-Mercaptopropyl-trimethoxy-silane-KH-590-53.html
55. Ácido clorhídrico 25% - T3 Química, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://www.t3quimica.com/acido-clorhidrico-25>
56. Ácido clorhídrico de uso industrial | Garrafa de 20L - Mr Quimi Central de Abastos, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://mrquimicentraldeabastos.com/producto/acido-clorhidrico/>
57. Proveedor de sosa cáustica líquida 50% 🐼 Grupo Acsol, acceso: diciembre 18, 2025, <https://grupoacsol.com/sosa-caustica-liquida-50>
58. Room Temperature Co-Precipitation Synthesis of Magnetite Nanoparticles in a Large pH Window with Different Bases - NIH, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5452734/>
59. A Silica-Supported Iron Oxide Catalyst Capable of Activating Hydrogen Peroxide at Neutral pH Values - PMC - NIH, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2792909/>
60. SEM images of magnetite particles prepared in a sodium silicate solution and b water, acceso: diciembre 18, 2025,
https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-magnetite-particles-prepared-in-a-sodium-silicate-solution-and-b-water_fig1_234045689
61. Impact of Silica-Modification and Oxidation on the Crystal Structure of Magnetite Nanoparticles - MDPI, acceso: diciembre 18, 2025,
<https://www.mdpi.com/2312-7481/9/1/18>