

**Determinación de brechas tecnológicas en la cadena de valor de las arenas silíceas  
con uso potencial para Frac Sand en Colombia**

**Autores:**

**Miguel Ángel Abadía Vélez**

**Elmer José Escudero Pico**

**Asesora:**

**Diana Cristina Ortega Pérez**

**Proyecto de grado**

**Universidad EAFIT**

**Medellín, Colombia**

**Octubre 2021**

## Tabla de contenido

1. Resumen .....	7
2. Introducción .....	7
3. Generalidades .....	9
3.1. Pregunta de investigación .....	9
3.2. Hipótesis .....	9
3.3. Planteamiento del problema.....	9
3.4. Objetivo general.....	12
3.5. Objetivos específicos .....	12
4. Marco Conceptual .....	13
4.1. Contexto actual del mercado de Frac Sand a nivel internacional .....	13
4.2. Geología asociada .....	17
4.2.1. Estados Unidos .....	17
4.2.1.2. Formación Wonewoc .....	17
4.2.1.3. Formación Oil Creek .....	18
4.2.1.4. Formación Oriskany .....	19
4.2.1.5. Formación Queen City .....	19
4.2.1.6. Formación Sylvania .....	19
4.2.1.7. Formación Hickory .....	19
4.2.1.8. Dunas Monahans.....	20
4.2.1.9. Dunas de Kermit .....	20
4.2.1.10. Formación Jordan .....	20
4.2.2. Canadá .....	20
4.2.2.1. Formación Peace River (Miembro Paddy) .....	20
4.2.3. Argentina .....	20
4.2.3.1. Depósitos de terrazas fluviales del Rio Chubut .....	20
4.2.3.2. Depósitos subacuáticos del Rio Paraná .....	21
4.3. Cadena de valor asociada al mercado de Frac Sand a nivel internacional.....	21
4.4. Conceptos claves.....	21
4.4.1. Vigilancia estratégica .....	21
4.4.2. Nivel de madurez tecnológica (TRL) .....	22
4.4.3. Ficha técnica y ficha de seguridad.....	23

4.4.4.	Referencia o grade .....	24
4.4.5.	Variables de la Hoja de Ruta Tecnológica para Frac Sand .....	24
5.	Metodología .....	25
5.1.	Alcance temático.....	26
5.2.	Cronograma .....	26
5.3.	Recopilación Bibliográfica .....	26
5.4.	Construcción HRT .....	26
5.5.	Aplicación de herramientas de innovación .....	26
5.6.	Avance tecnológico del Frac Sand en Latinoamérica.....	27
5.7.	Análisis mediante criterios de priorización.....	27
5.8.	Elaboración de diagrama de flujo de validación experimental.....	27
5.9.	Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones .....	27
6.	Resultados .....	28
6.1.	Hoja de Ruta Tecnológica para el mercado del Frac Sand .....	28
6.2.	Matriz de vigilancia estratégica .....	33
6.3.	Nivel de madurez tecnológica para el mercado del Frac Sand en Colombia.....	38
6.4.	Brechas tecnológicas identificadas en la cadena de valor del mercado del Frac Sand en Colombia.....	39
6.4.1.	Investigación limitada de depósitos potenciales.....	39
6.4.2.	Calidad de las arenas locales .....	39
6.4.3.	Laboratorios locales certificados con normas internacionales .....	39
6.4.4.	Logística de transporte.....	39
6.4.5.	Infraestructura.....	40
6.5.	Ruta de validación experimental para muestra de arena silíceo colombiana para Frac Sand .....	40
7.	Discusión.....	43
7.1.	Hoja de Ruta Tecnológica para el mercado de Frac Sand a nivel internacional ...	45
7.2.	Matriz de vigilancia para el mercado del Frac Sand a nivel internacional .....	47
7.3.	Brechas tecnológicas identificadas para el mercado de Frac Sand en Colombia ..	48
8.	Conclusiones .....	49
9.	Recomendaciones.....	51
10.	Referencias bibliográficas .....	52
11.	Anexos .....	57

## Lista de figuras

Figura 1. Consumo de agentes de sostén en Norteamérica con tendencia a 2020 (billones de libras). Tomada de Weijers et al. (2019) .....	10
Figura 2. Costo de procesos para la elaboración de un pozo no convencional. Elaboración propia. Fuente: Patri et al. (2018) .....	13
Figura 3. Costo del proceso de estimulación en un pozo no convencional. Elaboración propia. Fuente: Giglio (2018). .....	14
Figura 4. Costo del Frac Sand como agente de sostén. Elaboración propia. Fuente: Patri et al. (2018).....	14
Figura 5. Consumo de Frac Sand a nivel global entre los años 2013 y 2020. Elaboración propia. Fuente: Giglio (2018). .....	15
Figura 6. Mercado del Frac Sand avaluado para el año 2020 y 2026. Elaboración propia. Fuente: Rodriguez (2021). .....	15
Figura 7. Tendencia de referencias de Frac Sand en Estados Unidos para los años 2014-2019. Elaboración propia. Fuente: Vista Proppants And Logistics Inc (2018). .....	16
Figura 8. Comparación entre calidades de Frac Sand de Argentina con calidades premium. Fuente:(Giglio, 2018) .....	16
Figura 9. Areniscas de Formación St. Peters y minas de Frac Sand en Wisconsin (EE.UU.) Tomado y modificado de:Brown, (2012) .....	18
Figura 10. Cadena de valor para el mercado de Frac Sand. Elaboración propia. Fuente: Losa & Pruscino (2016). .....	21
Figura 11. Vigilancia estratégica para un mercado. Elaboración propia. Fuente: Castro (2007). .....	22
Figura 12. TRL para los mercados. Elaboración propia. Fuente: Pearsons & Mackin (2020). .....	22
Figura 13. Esquema para la elaboración de la hoja de ruta tecnológica para un mercado. Elaboración propia. Fuente: Phaal et al. (2006). .....	24
Figura 14. Metodología para la elaboración del proyecto de grado. ....	25
Figura 15. Compañías internacionales mapeadas en el mercado del Frac Sand. Elaboración propia. ....	28
Figura 16. Talleres de ideación por grupo de investigadores. Fuente: Propia.....	28
Figura 17. Comparación entre las calidades ofrecidas por las compañías mapeadas. Elaboración propia.....	30
Figura 18. Prospección de demanda de las calidades de Frac Sand entre 2021 y 2025. Elaboración propia.....	30
Figura 19. Vigilancia estratégica para el mercado de Frac Sand en Colombia. Elaboración propia. ....	34

Figura 20. Producciones de Frac Sand comparativa entre Estados Unidos y Argentina. Elaboración propia.....	34
Figura 21. Comparación entre las referencias de Frac Sand ofrecidas en Estados Unidos y Argentina. Elaboración propia.....	35
Figura 22. TRL para el mercado del Frac Sand en Colombia, Argentina y Estados Unidos. Elaboración propia.....	38
Figura 23. Brechas tecnológicas identificadas en Colombia. Elaboración propia. ....	39
Figura 24. Ruta de validación experimental para una muestra de arena silíceas colombiana para uso como Frac Sand. Elaboración propia. ....	40

### **Lista de tablas**

Tabla 1 Disparadores para la industria del Frac Sand prospectiva entre los años 2021-2025. Elaboración propia.....	29
Tabla 2. Compilado de las compañías mapeadas para cada año prospectivo con la calidad de Frac Sand que ofrecen y país de origen. Elaboración propia.....	29
Tabla 3. Formaciones geológicas de donde se extrae el Frac Sand por país y calidad. Elaboración propia.....	31
Tabla 4. Conocimientos requeridos para el mercado del Frac Sand entre los años 2021 y 2025. Elaboración propia.....	32
Tabla 5. Recursos requeridos para el mercado del Frac Sand entre los años 2021 y 2025. Elaboración propia.....	33
Tabla 6. Tecnología patentada utilizada por algunas compañías mapeadas en el desarrollo del Frac Sand. Elaboración propia.....	36
Tabla 7. Geología de las formaciones fuente de Frac Sand. Elaboración propia.	
Fuente:(Bauer, 2010; Benson & Wilson, 2015; Energy, 2018; Hobday et al., 1980; Kostelnik & Carter, 2009; Menga & Solsona, 2019; Plint et al., 2018; SPETSERIS, 1985; Wise, 2014;Elizabeth & Waitt, 1969;Transporte Rada Tilly S.A., 2014).....	37

## **Agradecimientos**

### ***Elmer José Escudero Pico***

*En primer lugar, quiero agradecer Dios que me ha permitido realizar este proyecto, a mi familia que son mi soporte y me han guiado en el camino, a nuestra asesora Diana que siempre estuvo presente.*

*También quiero agradecer a la Universidad por las experiencias vividas, a los profesores que me han dejado una parte de su conocimiento, a mis compañeros que han estado en el proceso.*

*A Miguel mi compañero de proyecto de grado que siempre brindo su apoyo y se convirtió en un hermano.*

*Por último, le dedico este proyecto a María y Elmer mis papas, y a Juan mi hermano, que los llevo siempre conmigo.*

### ***Miguel Angel Abadia Velez***

*Gratitud primero a Dios por las bendiciones recibidas a lo largo de mi carrera y de mi vida. A mis padres que son mi motivación más grande para crecer como persona y profesional que me brindan su apoyo en los momentos más difíciles, creen en mí, me demuestran su amor incondicional, los honraré siempre. A mi familia que soñaron conmigo la culminación de este primer paso, que me dieron siempre una palabra de aliento cada que sentía que no iba a lograrlo. A mis abuelos Faustino, Abraham y Yolanda que se encuentran en el cielo y mi abuela Carmen que me guiaron siempre a ser una buena persona, con principios y valores. A mis mejores amigos y grupo de trabajo Alejandra, Juan Guillermo y Elmer mi hermano con quienes en toda la carrera construí día a día una familia. A nuestra asesora Diana por su disposición, su ayuda y su forma de ser que permitió que este proyecto de grado se convirtiera en un proyecto de vida. A cada una de las personas que hacen parte del Departamento de Geología. A cada persona que hizo parte de este camino en mi vida le doy gracias porque cada uno puso un grano de ARENA para estar donde me encuentro hoy.*

*Le dedico este trabajo a las personas que me dieron la oportunidad de vivir, Amanda y Jair esto es para ustedes.*

## **1. Resumen**

En Colombia la industria de los yacimientos no-convencionales aún no se ha desarrollado; en la actualidad se están ejecutando algunos proyectos piloto para conocer la viabilidad del fracturamiento hidráulico en el territorio nacional. Aún no está definida la factibilidad técnica y financiera en estudios de prospectiva, que permitan definir los escenarios de implementación en diferentes periodos de tiempo de un mercado relacionado con la industria de los hidrocarburos como es el Frac Sand. Es importante determinar cuáles son las brechas tecnológicas asociadas a las actividades primarias de la cadena de valor y el procesamiento de las arenas silíceas en Colombia para obtener el producto final.

Para la ejecución del proyecto se hizo una recopilación bibliográfica de la información disponible del Frac Sand a nivel mundial; con esta se construyó una hoja de ruta tecnológica para conocer la tendencia del mercado a cinco años, y se aplicaron herramientas de innovación como la vigilancia estratégica y el nivel de madurez tecnológica.

A partir de este diagnóstico inicial se identificó un referente para Latinoamérica y se evaluaron las brechas tecnológicas que presenta Colombia respecto al mismo. Luego, se seleccionó una posible ruta para el cierre de una de estas brechas, con el fin de ser implementada en el corto plazo en el país. Se propone para trabajos futuros, una ruta de validación a escala de laboratorio expresada en un diagrama de flujo para aplicar en una muestra de arena silícea de origen colombiano.

En el país se identificaron cinco brechas tecnológicas en la cadena de valor en comparación con Latinoamérica: la investigación limitada de depósitos potenciales, el desconocimiento de la calidad de las arenas locales respecto a las dos calidades mundiales de Frac Sand: “White Sand” y “Brown Sand”, y la que se seleccionó como de mayor oportunidad para implementación en corto plazo en Colombia, la falta de laboratorios certificados con las normas ISO 13503-2 y API 19C.

## **2. Introducción**

El Frac Sand es uno de los insumos para el método de fracturamiento hidráulico de pozos no-convencionales, usado para la extracción de petróleo y gas en el mundo, específicamente en el proceso de generación de fracturas como agente de sostén (Liang et al., 2016). Este insumo ha sido de importancia económica para las operadoras petroleras debido a que representa aproximadamente el 16% del costo de la elaboración final de un pozo no-convencional, específicamente en el costo de la estimulación de los pozos el 40%-45%. Por lo anterior, la arena natural para uso en fracturamiento hidráulico (Frac Sand) se ha

convertido en el agente de sostén mayormente utilizado en la industria con 80% de consumo a nivel global (Giglio, 2018).

A nivel internacional el Frac Sand se divide en dos tipos de calidades: las “White Sand” se describen como la calidad premium por sus excelentes propiedades de resistencia a la compresión según las normas API 19C e ISO 13503-2, alto contenido de cuarzo monocristalino (>99%) y su color blanco. Por otro lado, las “Brown Sand” contienen un menor porcentaje de cuarzo de tipo policristalino, produciendo una disminución en la resistencia a la compresión, además de presentar un color marrón asociado a impurezas presentes (Campos et al., 2018).

Otra calidad existente es la “Resin Coated Sand”; estos productos generalmente utilizan como sustrato arena natural de calidad “White Sand” y se recubren con resina con el fin de mejorar condiciones, como el aumento de la resistencia a la compresión, evitar o disminuir el retorno de flujo del agente de sostén en pozos profundos de altas presiones y optimizar esfericidad y redondez (Secretaría de Política Mínera Ministerio de Producción de Argentina, 2017).

La necesidad de disminuir costos de las empresas ha hecho que los países donde se realiza fracturamiento hidráulico, principalmente Estados Unidos y Argentina en el continente americano, estudien la posibilidad de obtener el Frac Sand de depósitos locales, con el objetivo de eliminar importaciones del material y tener mejor eficiencia en la producción de los pozos (Ferrer Deheza & Montamat, 2018). Por lo tanto, como resultado de que el precio sea favorable, la calidad del material disminuye (Weijers et al., 2019).

En la actualidad Colombia desarrolla pilotos de fracturamiento hidráulico (Decreto Número 328 Del 28 de Febrero de 2020, 2020) pero no posee información referente al mercado local de Frac Sand. Por consiguiente, se requieren estudios referentes al desarrollo de la industria en el país teniendo en cuenta aspectos como vigilancia estratégica a nivel global y latinoamericano, los participantes del mercado, el funcionamiento del entorno de oferta y demanda y la validación técnica que pueden tener depósitos locales para tal uso (J. W. Castro y Acero, 2019).

Con el fin de contribuir a los requerimientos nacionales del desarrollo de fracturamiento hidráulico, este proyecto tiene el propósito de identificar los principales aspectos que direccionan el mercado del Frac Sand, las características técnicas y geológicas de las referencias minerales, las tecnologías que se requieren para la producción del material y los conocimientos técnicos de validación necesarios. Para esto se elaboró una Hoja de Ruta Tecnológica de Frac Sand, una Matriz de Vigilancia Estratégica del mercado del Frac Sand a nivel internacional y una ruta de validación técnica para muestras de arenas nacionales que tengan factibilidad de uso para Frac Sand.

### **3. Generalidades**

#### **3.1. Pregunta de investigación**

¿Existen brechas tecnológicas en la cadena de valor asociadas a las actividades primarias de la cadena de las arenas silíceas para Frac Sand en Colombia, y si así es, cuáles son?

#### **3.2. Hipótesis**

El mercado de las arenas silíceas para Frac Sand en Colombia presenta brechas tecnológicas en las actividades primarias de la cadena de valor, en las etapas de operaciones y procesamiento mineral.

#### **3.3. Planteamiento del problema**

La implementación de la cadena de valor en las empresas ha sido una herramienta que permite la optimización de diferentes procesos en el desarrollo de los productos, además, un aumento significativo en las ganancias, por la disminución de los costos de producción (Quintero & Sánchez, 1997). En la cadena de valor se discriminan dos tipos de actividades, las primarias que hacen referencia a la creación del producto y la agregación de valor, donde entran aspectos como la logística, operaciones y mercadeo. Por otro lado, las de apoyo que soportan las actividades primarias, donde entra el desarrollo de tecnología (Porter, 2002).

En el sector minero, la aplicación de esta herramienta ha desencadenado resultados positivos, como la identificación de los procesos que requieren cambios debido a desventajas competitivas, integración de las actividades de la cadena de valor con los procesos de las plantas de tratamiento, y mejoras significativas en costos de producción aplicando reingeniería de la cadena de valor cambiando procesamientos minerales y adoptando nuevas tecnologías (Carhuapoma et al., 2014).

El mercado de los insumos del fracturamiento hidráulico se compone de diversos elementos, entre ellos los agentes de sostén que son materiales utilizados para mantener abiertas las fisuras en un pozo no-convencional, un tipo de estos son las arenas silíceas (Frac Sand). Este insumo representa hasta el 30% del costo de un pozo, y el precio oscila entre los \$USD 0,024/lb y \$USD 0,13265/lb según su calidad; en promedio por perforación se emplean cinco millones de libras de Frac Sand (Roach, 2014). Lo anterior, ha generado diferentes pensamientos en la industria petrolera sobre cómo reducir los costos del fracturamiento hidráulico desde el punto de vista logístico de la industria de los agentes de sostén, específicamente del Frac Sand que es el más económico (Wiseman, 2019).

De esta forma se da apertura a la idea de optar por el uso de arenas con unas características de menor calidad, pero más cercanas a las zonas de perforación, lo que resultaría en ahorros de cientos a miles de dólares en los costos del fracturamiento hidráulico por pozo (Weijers

et al., 2019; Wiseman, 2019). Por lo tanto, con el objetivo de seguir disminuyendo costos y trabajar hacia la sostenibilidad, la industria del fracturamiento hidráulico empieza a optar por usar en el fluido inyectado menos químicos por cada libra de arena, generando que el volumen del agente de sostén aumente drásticamente de casi 76 billones de libras usadas en 2012 a más de 200 billones de libras en 2018 en Norteamérica (Figura 1) (Weijers et al., 2019).

Sin embargo, por fines económicos la calidad del agente de sostén se ha visto afectada, y el enfoque actual de la industria es que el agente de sostén funcione y el precio sea favorable, esto sería una oportunidad para las arenas locales como ocurre en Estados Unidos y Argentina (Navazo, 2021; Weijers et al., 2019)

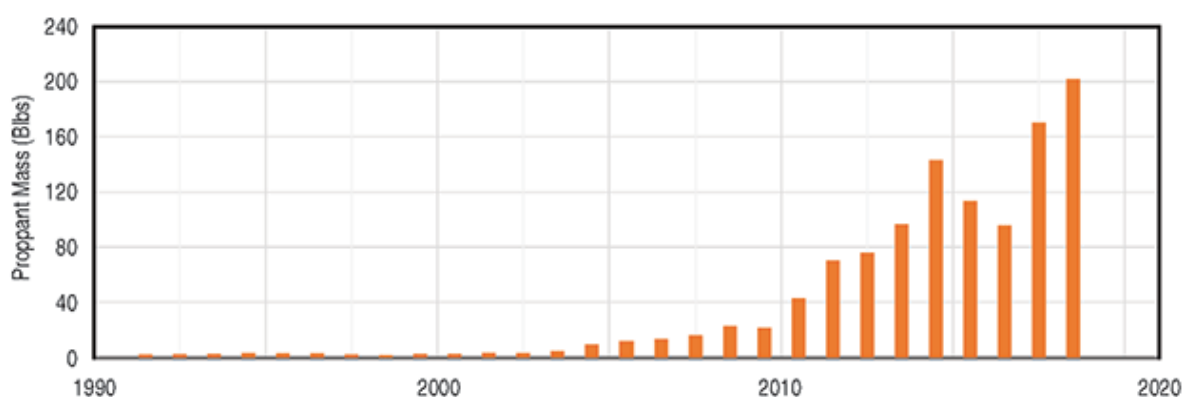


Figura 1. Consumo de agentes de sostén en Norteamérica con tendencia a 2020 (billones de libras). Tomada de Weijers et al. (2019)

En Colombia se encuentran brechas en el proceso tecnológico requerido por las arenas silíceas y en su cadena de valor como producto a comercializar para ser utilizado como Frac Sand. Hasta el momento se han realizado estudios referentes a evaluación económica para el suministro de agentes de sostén en el Valle Medio del Magdalena donde se concluye que la importación directa del material es más factible (Garcés et al., 2016). Por otra parte, Serrano et al. (2013) muestra un análisis para la implementación de agentes de sostén de baja densidad de materiales como bauxita, cerámicos y arenas resinadas, en el que determina que con la implementación de estos se puede reducir la masa necesaria de material para llenar un volumen de fracturas. Otra investigación elaborada por Toncel (2013) evalúa como suplir la demanda de agentes de sostén en Colombia por medio de cuatro alternativas (compra de arena nacional a compañías de servicio técnico, compra de arena importada a las compañías de servicio técnico, compra de arena nacional a un intermediario y compra de arena importada a un intermediario), teniendo como resultado que las arenas locales al ser de fabricación artesanal generan un impacto negativo en la calidad del producto.

En el país la industria de los yacimientos no-convencionales no se encuentra activa, hay una ausencia de información relacionada con la factibilidad técnica y financiera, de los potenciales depósitos de arenas silíceas para Frac Sand (Garcés et al., 2016). De la misma forma, el Frac Sand presenta importantes retos económicos, técnicos y sociales en Colombia relacionados al fracturamiento hidráulico (Martínez et al., 2019); la disponibilidad del recurso llevaría a la posibilidad de reducción de costos en la logística, un aumento de producción de hidrocarburos, un ahorro de las divisas, creación de empleo y disminución de importación de arenas para fracturamiento hidráulico, permitiendo el desarrollo de las industrias nacionales con una fuerte expansión de la economía (Peñaranda, 2014).

El vacío de conocimiento asociado al Frac Sand en Colombia se podría disminuir con herramientas prospectivas que permitan direccionar el mercado de este material hacia las tendencias que se presentan a nivel global. La Hoja de Ruta Tecnológica (HRT) es una herramienta que tiene como objetivo poner en relación un producto con sus parámetros tecnológicos y determinar una prospección futura del mercado (Phaal et al., 2006).

La HRT en la minería permite establecer la importancia del material, buscando el éxito en la cadena de valor desde una mirada estratégica y sostenible en la industria, y la relevancia de las materias primas autóctonas (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020). Para esto se consideran variables como el mercado, tecnología, productos, conocimientos y recursos necesarios para el desarrollo de esta aplicación mineral, con la finalidad de determinar las brechas tecnológicas, oportunidades relacionadas al campo de la geología económica, generación de conocimiento que permita una reducción de incertidumbres futuras afines al mercado mineral y la articulación entre innovación, investigación y desarrollo de las materias primas (Fundación Chile, 2016).

En la literatura se encuentran algunos ejemplos de la aplicación de esta herramienta en el sector económico de los minerales; un ejemplo específico es la HRT elaborada para el cobre en Chile con el objetivo de generar una prospección del mercado para ese mineral al 2035, según Fundación Chile (2016) en esta se tienen en cuenta los participantes (proveedores y clientes) y las variables mencionadas anteriormente. Adicionalmente, en España el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020) desarrolló una consulta previa a la elaboración de una HRT para las materias primas minerales, con el fin de impulsar de forma eficiente y sostenible el suministro de materiales locales que impacten positivamente la cadena de valor.

En Estados Unidos la National Mining Association & (U.S.) Department of Energy (2000) hizo una HRT enfocada en el procesamiento mineral del hierro, uranio, cobre, carbón y otros. Con una visión de la industria minera para el año 2020, basándose en ítems como preparación mineral, separaciones físicas y químicas. Además, otras investigaciones asociadas a las HRTs para minerales en Sudáfrica (Department of Mineral Resources of South Africa, 2014) y

Europa (European Network of Mining Regions, 2006) muestran que las HRTs son un factor primordial para el desarrollo de la cadena de valor de los mercados minerales a futuro.

Actualmente, en Colombia no hay información referente a HRTs para el mercado del Frac Sand, por lo cual se hace necesario hacer estudios de estrategias para el desarrollo de la cadena de valor de esta industria, para esto se requiere el uso de herramientas de innovación como lo son la vigilancia estratégica que buscaría encontrar un panorama en aspectos sobre el mineral de interés, un análisis de competencia en el mercado, los principales participantes del mercado y los aspectos básicos del entorno que puedan afectar su oferta y consumo (J. W. Castro & Acero, 2019). Otra herramienta sería el grado de alistamiento o madurez tecnológica (TRL) del mercado mineral para entender en que punto de desarrollo se encuentra el Frac Sand con respecto a factores como el conocimiento, tecnología y mercado (Héder, 2017; Pearsons & Mackin, 2020; Rose et al., 2017).

Por consiguiente, este proyecto, busca a partir de información suministrada por estudios a nivel internacional y nacional en relación con la industria de Frac Sand, identificar los principales aspectos del mercado que direccionan su consumo, las características de los productos minerales ofertados, las tecnologías asociadas a su producción, y las competencias en términos de conocimiento técnico y tecnológico requeridos para su desarrollo; todo esto se pretende realizar a través de metodologías de innovación, entre ellas la elaboración de una hoja de ruta tecnológica (Technology Road Map), de tal manera que se pueda obtener un análisis tipo “prospectivo” de las principales tendencias que tendrá este mercado en los próximos cinco años, y que permitirá a partir de ella, realizar un análisis detallado del estado de avance tecnológico de Latinoamérica en comparación a Colombia y detectar las principales brechas tecnológicas que tiene el país, para finalmente dar algunas recomendaciones generales sobre al menos una ruta de validación técnica.

### **3.4.Objetivo general**

Determinar las brechas tecnológicas en Colombia, en términos de la cadena de valor de las arenas silíceas con uso potencial para Frac Sand, en comparación con el avance de Latinoamérica en este campo.

### **3.5.Objetivos específicos**

- Elaborar un diagnóstico del estado actual y la tendencia a 5 años del estado de avance técnico, tecnológico, comercial y de conocimiento requerido para el desarrollo del mercado internacional de arenas silíceas con uso potencial para Frac Sand
- Identificar brechas de desarrollo tecnológico en Colombia, en relación con el estado de avance tecnológico del procesamiento de las arenas silíceas con uso potencial para Frac Sand en Latinoamérica, a partir de diagnóstico inicial.
- Proponer un diagrama de flujo que permita la validación experimental a escala de laboratorio, de la brecha tecnológica seleccionada en el estado de procesamiento

como de mayor interés a corto plazo, con muestras de arenas silíceas colombianas para Frac Sand.

#### 4. Marco Conceptual

##### 4.1. Contexto actual del mercado de Frac Sand a nivel internacional

El fracturamiento hidráulico o “fracking” es un proceso de extracción de hidrocarburos; este consiste en perforar horizontalmente una formación geológica que tiene composición shale. Se bombea un fluido compuesto de agua, químicos y arena a alta presión con el fin de generar fracturas en la roca y mantenerlas abiertas, que por objeto tiene aumentar la casi nula permeabilidad en esta litología para que tanto el gas como el petróleo puedan fluir (Rios Roca, 2020).

En la actualidad, la economía de la industria de los hidrocarburos que realiza fracturamiento hidráulico ha tenido un cambio hacia la reducción de costos debido a que el precio de elaboración de un pozo no-convencional se compone de aspectos como la perforación, estimulación y complementación, de los cuales la estimulación hace referencia al 40% del valor total (Figura 2) (Patri et al., 2018).

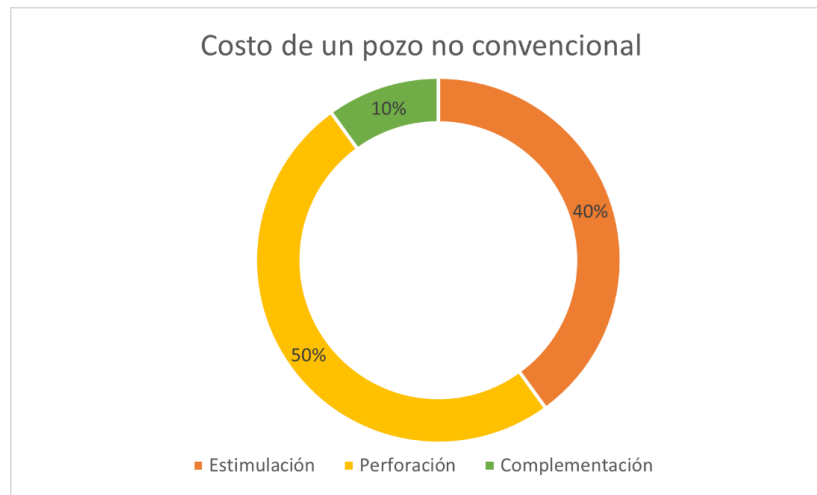


Figura 2. Costo de procesos para la elaboración de un pozo no convencional. Elaboración propia. Fuente: Patri et al. (2018)

El Frac Sand participa como agente de sostén presente en el fluido que se bombea en los pozos no-convencionales. El proceso de estimulación es de importancia porque con él se generan las fracturas que posteriormente permitirán la fluidez del petróleo o gas, en este punto de la producción de un pozo se determinan rubros dirigidos hacia el agente de sostén, la fractura y otros índices como maquinaria, personal, entre otros. El agente de sostén cubre el 40% del costo de la estimulación (Figura 3) (Giglio, 2018).

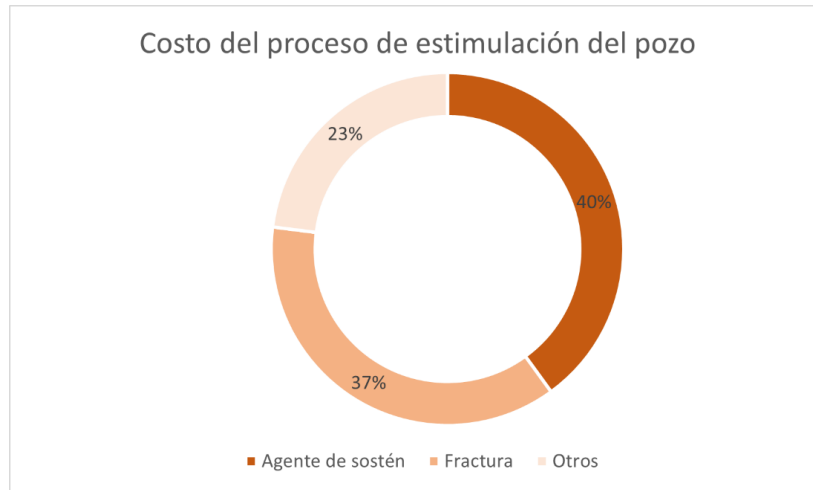


Figura 3. Costo del proceso de estimulación en un pozo no convencional. Elaboración propia. Fuente: Giglio (2018).

Para el costeo del Frac Sand se incluyen todas las actividades de su cadena productiva, una de ellas el proceso logístico de transporte hasta las centrales de almacenamiento donde son entregadas a las operadoras petroleras. Este eslabón de la cadena es el que más inversión necesita por parte de las compañías proveedoras de Frac Sand siendo el 70% del valor (Patri et al., 2018)(Figura 4). Por lo cual, la industria tiende a llevar sus minas de extracción y plantas de procesamientos cerca de las cuencas petroleras donde se utiliza el insumo, para ahorrar en el alquiler de camiones o trenes que deben realizar largos viajes desde el lugar de procesamiento hasta las unidades de almacenamiento. Esto impacta positivamente el precio del pozo final, dándole a sus clientes la oferta que necesitan y generando competitividad (Locke, 2015). Lo anterior ha direccionado a las compañías a utilizar como agentes de sostén las arenas naturales por encima de otras opciones en el mercado, como arenas modificadas o agentes de sostén sintéticos de cerámica, aunque presentan mejor calidad, tienen un precio mayor.

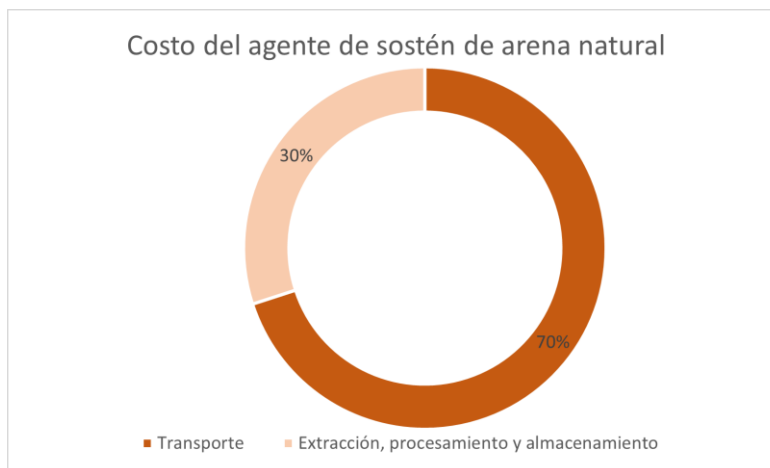


Figura 4. Costo del Frac Sand como agente de sostén. Elaboración propia. Fuente: Patri et al. (2018)

Para el 2017 se estimaba que la cantidad de uso de Frac Sand a nivel global sería de 100 billones de libras y al 2019 de alrededor de 200 billones de libras (Figura 5), indicando que el Frac Sand ocupa casi el 95% del total de agentes de sostén empleados en proyectos no-convencionales (Giglio, 2018).

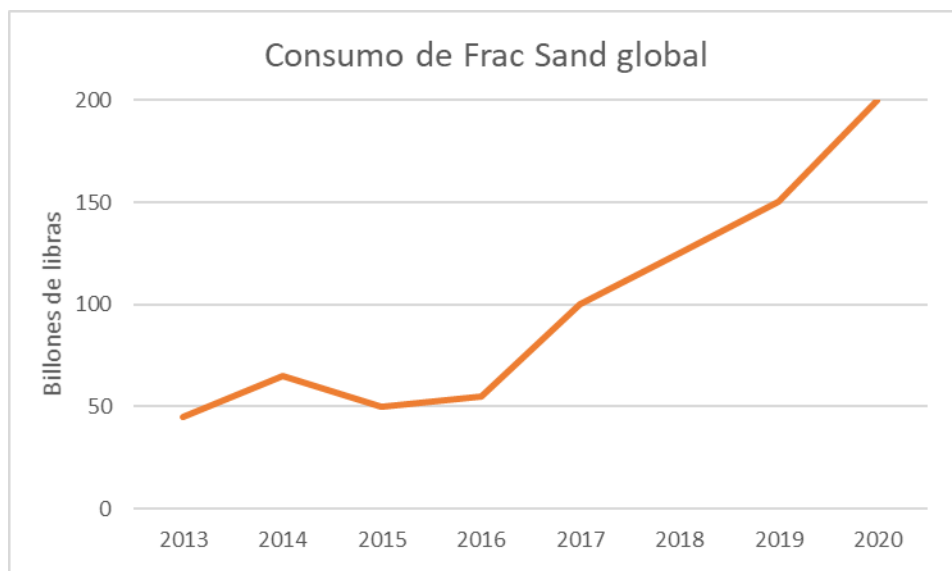


Figura 5. Consumo de Frac Sand a nivel global entre los años 2013 y 2020. Elaboración propia. Fuente: Giglio (2018).

Adicionalmente, para el 2021 el mercado global de Frac Sand se encuentra avaluado en 5491,8 millones de dólares y se proyecta un crecimiento en este valor para el año 2026 de 9515,5 millones de dólares (Figura 6) (Rodríguez, 2021).

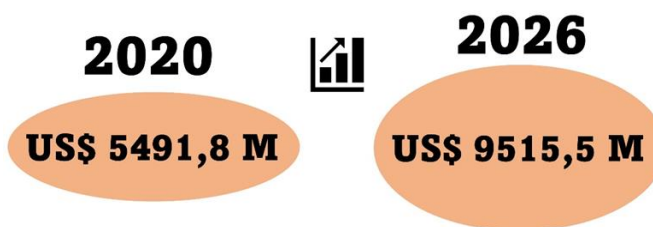


Figura 6. Mercado del Frac Sand avaluado para el año 2020 y 2026. Elaboración propia. Fuente: Rodríguez (2021).

El mercado pionero de la producción y demanda de Frac Sand en el mundo se encuentra en Estados Unidos donde se comercializan las calidades “White Sand” y “Brown Sand”. En este país se han realizado estudios de prospección donde se determinan cambios en las granulometrías ofrecidas para los productos, mostrando una tendencia de aumento de la producción y demanda de arenas finas de referencias 40/70 y 70/140, mientras disminuyen las arenas gruesas 20/40 y 30/50 (Figura 7). Esto explicado porque las arenas de granulometría más fina tienen un mejor rendimiento en las plantas de procesamiento por lo que son menos costosas de producir (Vista Proppants And Logistics Inc., 2018).

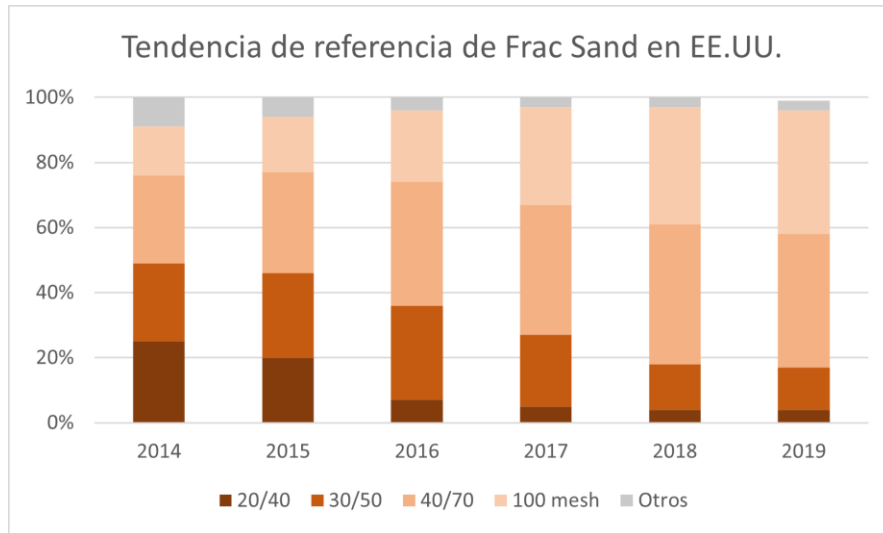


Figura 7. Tendencia de referencias de Frac Sand en Estados Unidos para los años 2014-2019. Elaboración propia. Fuente: Vista Proppants And Logistics Inc (2018).

En Latinoamérica el país más desarrollado en el mercado para Frac Sand es Argentina, debido a su extracción de petróleo y gas por fracturamiento hidráulico en la Formación Vaca Muerta (Cuenca Neuquén), aunque es un mercado menos desarrollado que el de Estados Unidos en temas de producción. El mercado argentino con la meta de alivianar costos en el proceso, elimina la importación de Frac Sand y produce arenas locales (Patri et al., 2018).

La arena local en Argentina ha funcionado para las empresas petroleras a pesar de que sus calidades no son premium (Figura 8), presentan alta presencia de fisuras y disminución en la resistencia a la compresión asociado a una calidad “Brown Sand”. Además, exponen una limitada cantidad de depósitos disponibles que cumplan las especificaciones técnicas requeridas, y dificultades en la logística debido a los altos costos en transporte como consecuencia de no contar con vías férreas en buen estado (Escamilla, 2017; Le Capitaine & Carlson, n.d.; Patri et al., 2018).

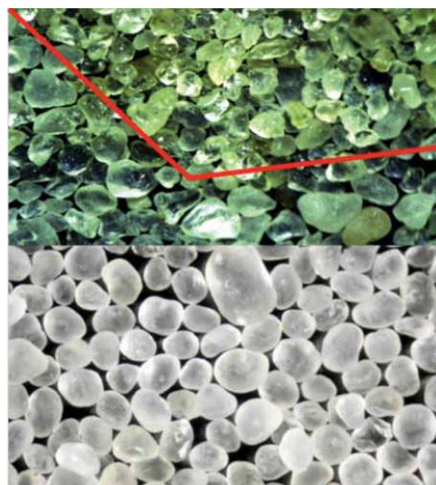


Figura 8. Comparación entre calidades de Frac Sand de Argentina con calidades premium. Fuente:(Giglio, 2018)

## **4.2. Geología asociada**

Los depósitos de arenas silíceas para Frac Sand requieren unas propiedades específicas que se asocian a su posible origen. A continuación, se muestran las principales unidades geológicas a nivel mundial de las cuales se extraen las arenas silíceas que se usan como Frac Sand; se muestra información de su edad, génesis, ambiente de formación y características geológicas principales.

### **4.2.1. Estados Unidos**

#### **4.2.1.1. Formación St. Peters**

Esta Formación del Ordovícico Medio tiene una génesis relacionada a un depósito de playa con sistema transgresivo en aguas marinas poco profundas o dunas de playa; el ambiente de formación corresponde a un ambiente marino con múltiples ciclos entre procesos de costa marina y eólicos costeros; presenta una arenisca muy madura tanto de textura como de composición, posee 97% de cuarzo monocristalino con buena redondez, exhibe un color blanco, pero en algunos casos manchas de color rosado o verde; en algunas superficies presentan meteorización característica con colores grises o cafés oscuros, el tamaño de grano varía entre 0.075mm - 2mm y una dureza de 7 en la escala de Mohs; en general es una arenisca con baja compactación, tiene una gravedad específica de 2.24g/cm<sup>3</sup> y una porosidad alrededor del 15%. De esta Formación se obtiene la calidad “White Sand”(Figura 9) (Benson & Wilson, 2015).

#### **4.2.1.2. Formación Wonewoc**

La Formación Wonewoc de edad Cámbrica Tardía posee un origen cratónico con estratigrafía compleja caracterizada por una acumulación continua de arena en una cuenca de bajo relieve relativamente estable, que se fue hundiendo uniformemente y se asocia a un ambiente de formación marino cerca de la costa controlado por las olas, Wonewoc presenta dos miembros de areniscas cuarzosas: uno de los miembros se llama Ironton con colores blancos y cafés con algunos óxidos, tamaño de grano de medio a grueso, granos subredondeados y pobremente seleccionados; el otro miembro se llama Galesville con tonalidades blancas, tamaño de grano de fino a medio, granos redondeados a subredondeados y buena selección. Este último es el de mayor importancia para Frac Sand ya que tiene una composición de cuarzo mayor al 98%. De esta Formación se extrae la calidad “White Sand” (Benson & Wilson, 2015).

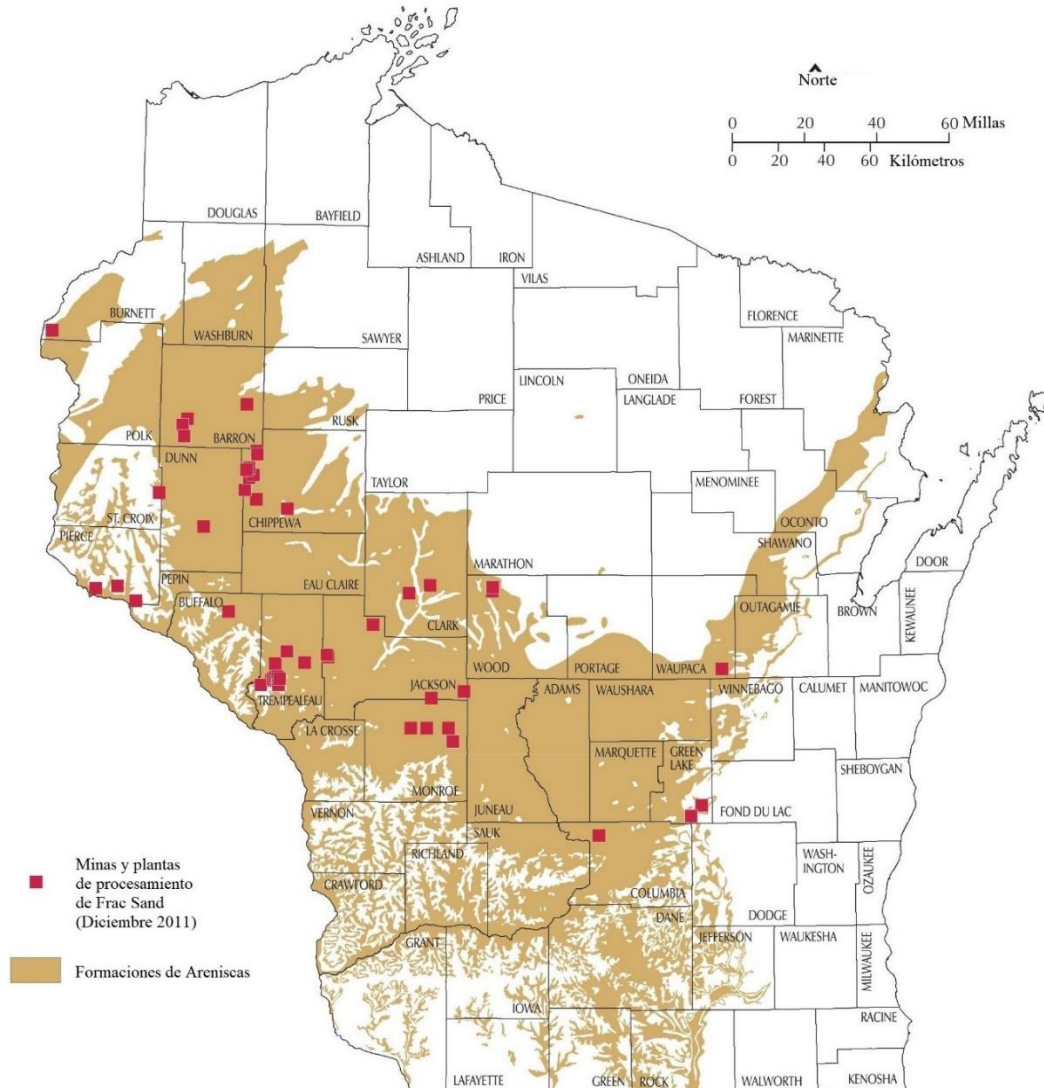


Figura 9. Formaciones de areniscas y minas de Frac Sand en Wisconsin (EE.UU.) Tomado y modificado de: Brown, (2012)

#### 4.2.1.3. Formación Oil Creek

Esta unidad del Ordovícico Medio hace parte del grupo Simpson; está relacionada a un depósito formado en una cuenca larga, lineal y tropical cerca de la margen de Laurentia, dentro de la cuenca hubo subsidencia lenta por largos periodos de acumulación asociados a agua superficial; tiene espesores entre los 6 y 15 metros, el ambiente de formación es marino con procesos transgresivos y regresivos y las areniscas tienen composición de cuarzo limpio mayor al 95%, con presencia de granos bien seleccionados y redondeados (Bauer, 2010; Benson & Wilson, 2015).

#### **4.2.1.4. Formación Oriskany**

Esta Formación del Devónico Temprano tiene su génesis asociada a tres intervalos diagenéticos evidenciados en la corrosión de los granos de cuarzo a lo largo de los contactos con las superficies de las conchas; se formó en un ambiente marino transgresivo poco profundo, plataforma de alta energía, playa, crestas mareales o dunas submarinas; tiene granos de cuarzo bien redondeados sin sobrecrecimientos, con una composición de 99%, Oriskany tiene espesores de aproximadamente 90 metros, colores entre blanco y gris, una porosidad entre 4 a 7%, y tamaño de grano de fino a grueso; se clasifica como una arenisca suelta con intercalaciones de calizas, cherts y litologías de shale, (Benson & Wilson, 2015; Energy, 2018; Kostelnik & Carter, 2009).

#### **4.2.1.5. Formación Queen City**

La unidad tiene edad del Eoceno y su origen corresponde a sucesiones cíclicas entre transgresiones y condiciones de inundación, seguidos de episodios de regresión, este proceso puede estar acompañado de subsidencia en la cuenca o elevación en el nivel del mar; se interpreta que la formación se depositó en un entorno de plataforma interior donde los agentes dominantes fueron las olas superficiales y las corrientes, por lo que se originaría en un ambiente deltaico progradacional dominado por las olas. La Formación presenta arenas, limos y arcillas de origen fluvial y deltaico, hay facies fluviales, deltaicas, de barrera y mareales, exhibe intervalos de areniscas cuarzosas bien seleccionadas con un tamaño de grano entre muy fino y fino, los espesores varían entre los 6 y 30 metros (Hobday et al., 1980; SPETSERIS, 1985; Wise, 2014).

#### **4.2.1.6. Formación Sylvania**

Se formó hacia Devónico Medio, las areniscas muestran características típicas de arenas marinas retrabajadas por efectos eólicos de un sistema transgresivo en un ambiente marino somero influenciado por la marea; tiene espesores entre 0 y 30 metros y se caracteriza por presentar areniscas friables de color blanco con granos de cuarzo bien redondeados, presencia de calcita y dolomita intercalada con dolomita arenosa y bandas de cherts (Benson & Wilson, 2015).

#### **4.2.1.7. Formación Hickory**

La formación tiene una edad del Cámbrico tardío; cuando se depositó en un ambiente marino transgresivo tenía altos contenidos de feldespato, luego se dio una alteración diagenética producto de depósitos fluviales y dunas eólicas donde se removieron los feldespatos y concentro el alto contenido de cuarzo. En esta se encuentran calidades “Brown Sand”, las areniscas contienen cuarzo policristalino bien seleccionado y redondeado, con una resistencia a la compresión menor (Benson & Wilson, 2015).

#### **4.2.1.8. Dunas Monahans**

Las dunas se formaron en el Pleistoceno en un ambiente eólico derivadas de la Formación Blackwater Draw, tienen un muy buen grado de madurez mineralógico lo que quiere decir que poseen un mayor porcentaje de minerales estables y más resistentes físicamente (Blair & McPherson, 1999) por lo que el cuarzo es casi del 100%, con un diámetro medio inferior a 0,22 mm, espesores de 2 m aproximadamente y tienen una geoforma parabólica (Elizabeth & Waitt, 1969; Benson & Wilson, 2015).

#### **4.2.1.9. Dunas de Kermit**

Estas dunas se formaron en el pleistoceno derivadas de depósitos lacustres y eólicos de la formación Blackwater Draw en un ambiente eólico, las areniscas cuarzosas subangulares a subredondeadas tienen colores cafés y amarillentos (Elizabeth & Waitt, 1969; Benson & Wilson, 2015).

#### **4.2.1.10. Formación Jordan**

Esta unidad se formó en un ambiente marino intermareal de alta energía hacia Cámbrico Tardío - Ordovícico Temprano por medio de la acumulación de sedimentos en un mar epicontinental que suministraba sedimentos clásticos y carbonatos y que avanzó hacia el interior del cratón. La formación muestra areniscas marinas típicas de una regresión, de composición cuarzosa con colores entre blanco, café, amarillo o naranjado, el tamaño de grano va de fino a medio, y la selección de pobre a moderada con una buena redondez; puede verse afectada por procesos diagenéticos donde se dan óxidos de hierro (Benson & Wilson, 2015).

### **4.2.2. Canadá**

#### **4.2.2.1. Formación Peace River (Miembro Paddy)**

Se originó en el Cretácico Temprano en ambientes aluviales a marinos poco profundos; el miembro Paddy es la facie continental de la sedimentación de Peace River y tiene patrón de delta en una plataforma somera y espesores promedio de 37 metros. Las areniscas son blancas, pobremente seleccionadas con tamaños de grano que varían de fino a muy grueso, con presencia de limos y carbonatos, colores cafés pálidos a grises pálidos y formas de granos subangulares a bien redondeados (Plint et al., 2018).

### **4.2.3. Argentina**

#### **4.2.3.1. Depósitos de terrazas fluviales del Río Chubut**

Los depósitos del Cuaternario tienen su génesis en ambiente fluvial principalmente en antiguas planicies de inundación del Río Chubut; están conformados por gravas, gravas arenosas, arenas finas a gruesas y en menor proporción por limos y arcillas (Transporte Rada Tilly S.A., 2014).

#### 4.2.3.2. Depósitos subacuáticos del Rio Paraná

Se originaron en un ambiente fluvial por la erosión de las unidades geológicas aledañas del río; son sedimentos con composición variada, generalmente sueltos o parcialmente consolidados, con granulometría de material arenoso fino y mediano y con presencia aislada de arcillas y limos (Menga & Solsona, 2019).

#### 4.3. Cadena de valor asociada al mercado de Frac Sand a nivel internacional

La obtención del producto de Frac Sand en sus dos calidades internacionales “White Sand y Brown Sand”, incluye una cadena de valor compuesta de diferentes actividades y etapas. Las actividades se clasifican en primarias y de apoyo (Carhuapoma et al., 2014).

Las actividades primarias para este mercado comienzan en una extracción del material, posteriormente la arena es llevada a una planta de procesamiento donde se realiza el lavado, cribado y secado para luego ser almacenada en unidades de almacenamiento compuesta de silos. El siguiente paso es el proceso al que se le denomina en la industria “Ultima Milla”, asociado al transporte de la arena hasta los pozos no-convencionales donde se realizaría el bombeo (Figura 10).

Por otra parte, las actividades de apoyo se discriminan en la administración de los recursos humanos requeridos en cada eslabón y el desarrollo de tecnología que permita un crecimiento económico de cada compañía junto con diferenciación que permita una mejor competitividad (Losa & Pruscino, 2016; Patri et al., 2018).

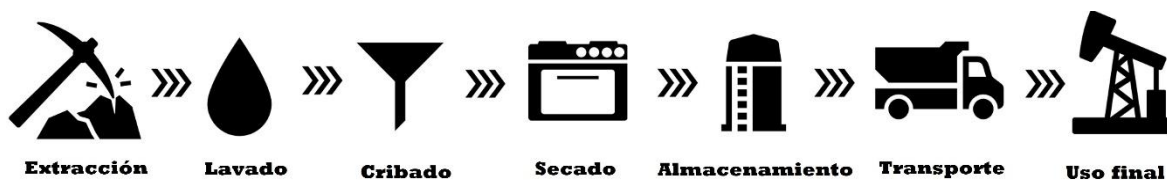


Figura 10. Cadena de valor para el mercado de Frac Sand. Elaboración propia. Fuente: Losa & Pruscino (2016).

#### 4.4. Conceptos claves

En este apartado se definen y explican los diferentes conceptos utilizados en el proyecto como la vigilancia estratégica, el nivel de madurez tecnológica, las variables utilizadas en la hoja de ruta, entre otros.

##### 4.4.1. Vigilancia estratégica

Es una herramienta de innovación que permite adquirir datos, examinarlos, rastrearlos y transformarlos en observaciones con el fin de pronosticar los cambios y tomar mejores decisiones. La vigilancia tiene dos focos fundamentales: el primero es examinar el entorno para obtener información oportuna y establecer la validez del sondeo, el segundo foco es aprovechar los datos recolectados y utilizarlos para tomar decisiones estratégicas. Dentro de

esta herramienta se pueden definir cuatro pilares o ejes esenciales, la vigilancia tecnológica, competitiva, comercial y del entorno (Figura 11) (Castro, 2007; Coca et al., 2010).



Figura 11. Vigilancia estratégica para un mercado. Elaboración propia. Fuente: Castro (2007).

#### 4.4.2. Nivel de madurez tecnológica (TRL)

El TRL en un principio fue un concepto establecido por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), con la finalidad de medir el grado de madurez de las tecnologías espaciales y las nuevas tecnologías, aunque posteriormente fue adoptado para para otros usos (Rose et al., 2017). Esta herramienta se utiliza para exponer de forma sistémica la madurez de las tecnologías que están a la vanguardia, clasificando las cualidades que puntualizan niveles progresivos de desarrollo técnico, en una escala del 1 al 9 (Figura 12) (Pearsons y Mackin, 2020).

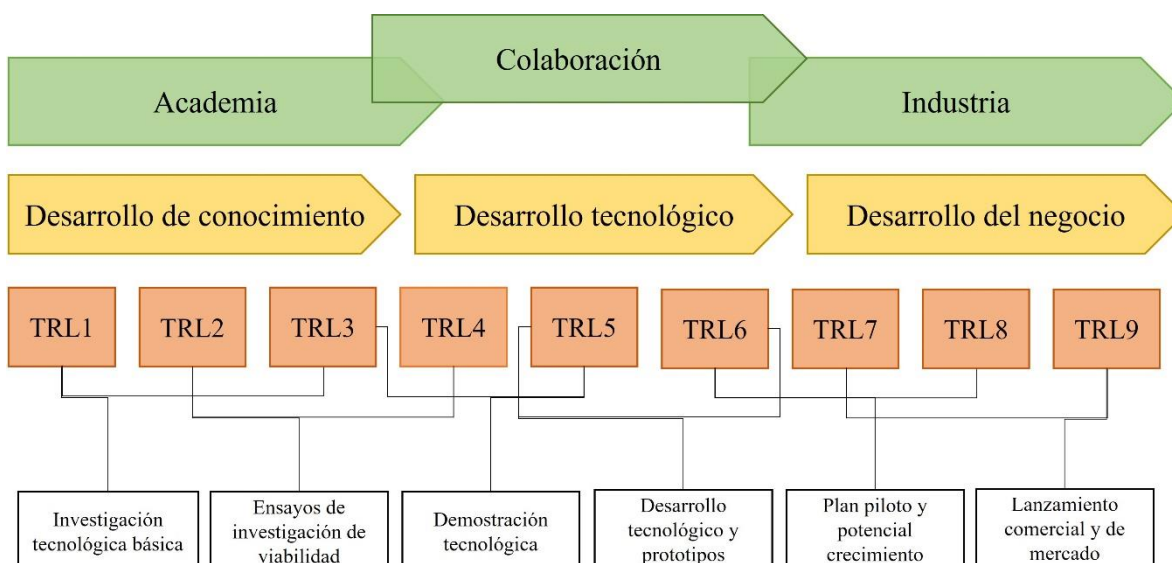


Figura 12. TRL para los mercados. Elaboración propia. Fuente: Pearsons & Mackin (2020).

A continuación se definen los diferentes niveles de TRL teniendo en cuenta la guía de la Oficina de Responsabilidad del Gobierno de los Estados Unidos (Pearsons y Mackin, 2020) y de la segunda convocatoria de ecosistema científico para la financiación de programas de investigación, desarrollo e innovación (Departamento administrativo de ciencia, tecnología e innovación, 2017).

- **TRL1:** Este es el nivel menos avanzado con relación a la madurez tecnológica, no hay nada de desempeño comercial, en este nivel se hace investigación básica y se colocan los pilares hacia una investigación aplicada.
- **TRL2:** En esta fase aún no hay pruebas que demuestren la validez de la nueva tecnología, se empiezan a usar herramientas analíticas para hacer simulaciones o a crearse aplicaciones de las tecnologías.
- **TRL3:** Se hacen tareas de investigación y desarrollo, pruebas analíticas y a escala de laboratorio para mostrar la factibilidad técnica de la tecnología, se validan algunos componentes específicos, pero no la integración de todos ellos en un sistema.
- **TRL4:** En esta etapa se integran los componentes que hacen parte de la nueva tecnología para determinar si funcionan en un sistema.
- **TRL5:** Se deben integrar los componentes buscando que la configuración final sea próxima a la aplicación final, pero la operación del sistema ocurre a escala de laboratorio.
- **TRL6:** En esta fase se requieren de tener prototipos pilotos que tengan la competencia necesaria dentro de un sistema en condiciones de operación real.
- **TRL7:** En esta etapa se encuentra la tecnología a un nivel pre-comercial, se deben tener encuentra características asociadas a la evaluación económica, fabricación y periodo de vida.
- **TRL8:** Las tecnologías ya deben tener aprobación de su desempeño bajo el contexto deseado, logrando la última etapa del avance en el sistema.
- **TRL9:** Fase final, el sistema ya debe estar disponible para su producción y comercialización.

#### **4.4.3. Ficha técnica y ficha de seguridad**

La ficha técnica de un producto es un resumen de las especificaciones técnicas del mismo, es de ayuda para la comercialización debido a que el cliente puede observar información detallada de las especificaciones ofrecidas y otra información técnica de interés para su uso (Duque Grisales, 2013). De otro modo, la ficha de seguridad es un complemento de la ficha técnica del producto que permite establecer aspectos de cuidado o emergencia asociados a la utilización del material (Universidad de Jaén, n.d.).

#### 4.4.4. Referencia o grade

Las referencias o grades hacen alusión a la calidad ofrecida por un productor de una materia prima mineral no metálica (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, 2018). Para el caso de Frac Sand, se determinan en función de la granulometría de los diferentes productos ofrecidos por una compañía. Determinando así la posibilidad de oferta de diferentes especificaciones técnicas que puedan suplir las diferentes necesidades del mercado (DeNoyer & Owen, 2019).

#### 4.4.5. Variables de la Hoja de Ruta Tecnológica para Frac Sand

La Hoja de Ruta Tecnológica para Frac Sand se compone de algunos apartados basados en Phaal et al. (2006) (Figura 13) como lo son:

- El mercado para identificar las compañías en los diferentes países que ofrecen Frac Sand y los disparadores principales que dictaran las tendencias de consumo.
- Productos asociados a los mercados identificados y las referencias que se ofrecen a partir de las necesidades de las empresas petroleras.
- Tecnologías asociadas a la fabricación y procesamiento de dichos productos.
- Recursos requeridos para llevar a cabo la implementación de la idea tecnológica y de mercado y
- El conocimiento (know how) requerido para dicha implementación

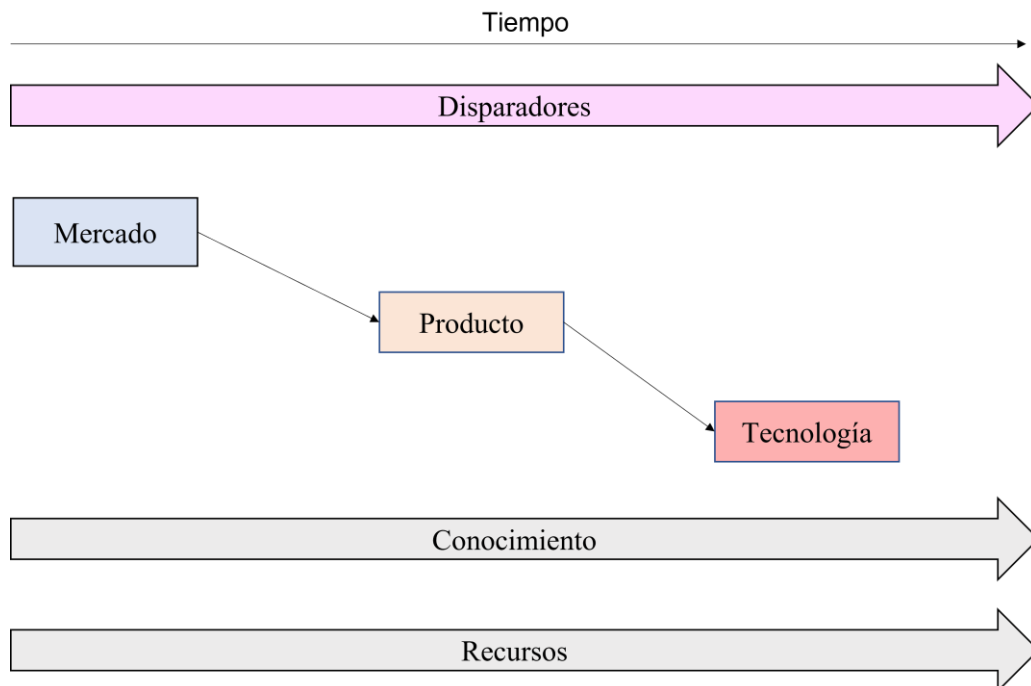


Figura 13. Esquema para la elaboración de la hoja de ruta tecnológica para un mercado. Elaboración propia. Fuente: Phaal et al. (2006).

## 5. Metodología

En la Figura 14 se muestra un diagrama de flujo de la metodología llevada a cabo en el proyecto, en la cual se integran las diferentes fases y actividades relacionadas al cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación.

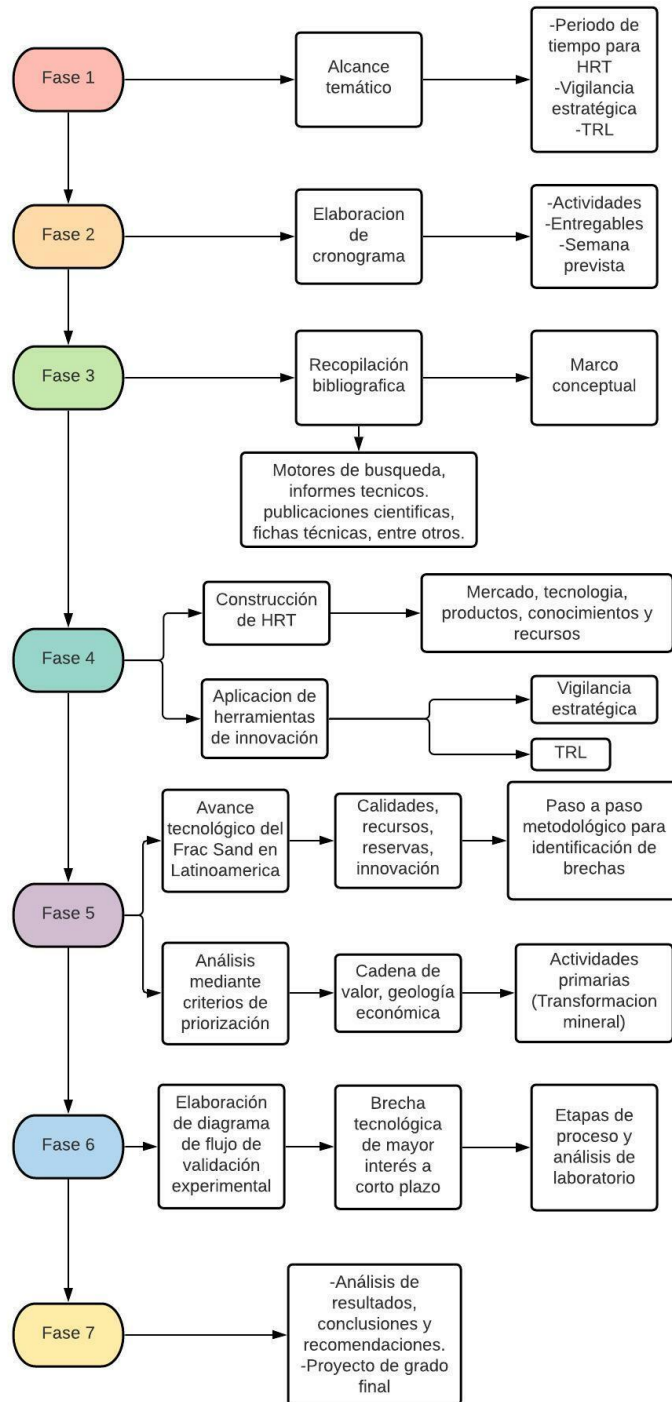


Figura 14. Metodología para la elaboración del proyecto de grado.

### **5.1. Alcance temático**

Esta sería la primera fase que se realizó en el proyecto, la cual consistió en definir el alcance temático para la vigilancia estratégica, el TRL y el periodo de tiempo de la HRT a cinco años a partir del 2021, con el fin de lograr un análisis prospectivo del mercado mineral de las arenas silíceas con potencial uso para Frac Sand en Colombia.

### **5.2. Cronograma**

En esta etapa se desarrolló un control de los diferentes avances y entregables respecto a una fecha estipulada, para esto se realizó una tabla en Excel que contiene las actividades, entregables respectivos y una semana prevista.

### **5.3. Recopilación Bibliográfica**

La recopilación de datos e información se elaboró con el objetivo de construir un marco conceptual alrededor de las brechas tecnológicas que existen en Colombia relacionadas al mercado mineral del Frac Sand afines a la cadena de valor, para obtener una comparación con el avance a nivel de Latinoamérica en este campo. En este apartado se emplearon diferentes fuentes de información como motores de búsqueda, informes técnicos, publicaciones en revistas científicas, periódicos, bases de datos, tesis, fichas técnicas de diferentes referencias de Frac Sand a nivel global y reportes económicos de compañías privadas y públicas (Héder, 2017).

### **5.4. Construcción HRT**

La HRT para el mercado del Frac Sand en Colombia se hizo por medio de la ejecución diferentes talleres de ideación por parte de los autores y personas consideradas de interés para su realización. En los cuales se recopiló y analizó información bibliográfica técnica y comercial de los diferentes aspectos definidos en la metodología “Technology Roadmapping: linking technology resources to business objectives” (Phaal et al., 2006), donde se tienen en cuenta el mercado, tecnología, productos, conocimientos y recursos requeridos por empresas líderes en este campo.

### **5.5. Aplicación de herramientas de innovación**

Se implementaron herramientas para la innovación enfocadas hacia el mercado mineral de las arenas silíceas con uso potencial para Frac Sand en Colombia y Latinoamérica, tales como la vigilancia estratégica siguiendo la metodología de los lineamientos para la elaboración de estudios de vigilancia estratégica e inteligencia competitiva (S. Castro, 2007) y la metodología para las rutas tecnológicas de empresas TIC (Instituto Tecnológico de Aragón, 2015).

Estas metodologías se basaron en los diferentes tipos de vigilancia estratégica que hacen referencia a la tecnología, que son datos de carácter técnico y científico sobre el Frac Sand a partir de artículos científicos y patentes de las compañías mapeadas; competidores, que fue

un análisis de cuáles son los principales actuales o potenciales; comercial, que se asocian a mercados, clientes, proveedores y principales actores; y entornos, donde se tuvo en cuenta todo lo relacionado a reglamentaciones, leyes o normas referentes al Frac Sand.

Otra herramienta para considerar fue el grado de alistamiento o madurez tecnológica (TRL) enfocado a entender el nivel de desarrollo en el que se encuentra el Frac Sand en Colombia y Latinoamérica, para lo cual se utilizaron las guías metodológicas “Technology Readiness Assessment Guide” (Pearsons & Mackin, 2020) y “Technology Readiness Level: Guidance Principles for Renewable Energy technologies” (Rose et al., 2017).

### **5.6. Avance tecnológico del Frac Sand en Latinoamérica**

En esta fase se realizó un seguimiento detallado de cuál es el estado de desarrollo del mercado mineral del Frac Sand en Latinoamérica y sus diferentes referencias de producto, contemplando características como calidades, recursos, reservas, innovación, procesamientos minerales e infraestructuras. A partir de esta información, se hicieron gráficos, mapas, y tablas que permitieron presentar un análisis comparativo con Colombia, la identificación de los vacíos que tiene el país, y la descripción del paso a paso metodológico para el análisis de brechas tecnológicas.

### **5.7. Análisis mediante criterios de priorización**

En esta sección primero se determinaron los criterios de priorización por parte de los investigadores considerando las actividades de la cadena de valor y la geología económica, dando un enfoque a la sección de transformación mineral de las actividades primarias, asimismo presentar los resultados de manera gráfica con figuras y tablas.

### **5.8. Elaboración de diagrama de flujo de validación experimental**

Una vez seleccionada la brecha tecnológica de mayor interés a corto plazo en la cadena de valor del Frac Sand en Colombia, se construyó un diagrama de flujo que permitió identificar las etapas de los procesos y análisis de laboratorio necesarios para evaluar las muestras de arenas silíceas de interés, y así determinar la viabilidad técnica de uso como Frac Sand.

### **5.9. Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones**

Una de las fases finales del proyecto fue un análisis integral de toda la información para establecer conclusiones alrededor del objetivo general propuesto, incorporando los resultados relacionados con cada objetivo específico de la investigación y proponer una ruta inicial de cierre de brechas para el desarrollo de este tema tecnológico en el país. Finalmente, se plantearon recomendaciones para proyectos futuros de investigación aplicada y descripciones de las principales lecciones aprendidas en esta investigación.

## 6. Resultados

Para la elaboración de la HRT, la aplicación de herramientas de innovación y para el planteamiento de la propuesta de una ruta de validación experimental, se mapearon 26 compañías, ubicadas en cuatro países y una en Colombia (Figura 15). El criterio de selección de estos países es que se relacionan actualmente con el desarrollo de los yacimientos no convencionales por lo que la demanda de los insumos, en este caso Frac Sand es mayor que en otros países.



Figura 15. Compañías internacionales mapeadas en el mercado del Frac Sand. Elaboración propia.

### 6.1. Hoja de Ruta Tecnológica para el mercado del Frac Sand

En la elaboración de la HRT se tuvo en cuenta como primera medida un análisis prospectivo para el mercado de Frac Sand a nivel internacional que varía entre los años 2021 y 2025 por medio de talleres de ideación elaborados por el grupo de investigadores (Figura 16). Por ser la HRT un formato robusto con mucha información se adjunta completo en el Anexo 1.



Figura 16. Talleres de ideación por grupo de investigadores. Fuente: Propia

Se estipularon unos disparadores de mercado que encaminarían las compañías proveedoras del insumo para los próximos años (Tabla 1).

<b>Disparadores de mercado para Frac Sand 2021-2025</b>
Ampliar el portafolio de arenas locales
Realizar avances en la perforación de petróleo y gas
Mejorar rendimiento para las empresa de Frac Sand buscando referencias 50/140 (finas) y 30/70 (gruesas)
Reducir costos en logística de transporte
Reducir la participación del Frac Sand en el costo final de un pozo no-convencional
Obtener una mayor cantidad de libras de Frac Sand por perforación
Aumentar el valor del mercado de Frac Sand que actualmente es de 0,024 US/Lb y 0,12365 US/Lb
Realizar operaciones seguras de baja generación de polvo
Aumentar eficiencia operativa de las plantas
Evitar o reducir el retorno del fluido

Tabla 1 Disparadores para la industria del Frac Sand prospectiva entre los años 2021-2025. Elaboración propia.

Adicionalmente, se presentan las calidades de Frac Sand que ofrece cada compañía actualmente (White Sand, Brown Sand o Resin Coated Sand) (Tabla 2), ya que ellas, dirigen los principales criterios para la exploración y explotación de Frac Sand, en un futuro cercano.

<b>Año</b>	<b>Compañía</b>	<b>Calidad</b>	<b>País</b>
<b>2021</b>	Source Energy Services	White Sand	Canadá
	GTM Chemicals	White Sand	Colombia
	U.S Silica	White Sand	Estados Unidos
	Badger Mining Corp	White Sand	Estados Unidos
	Superior Silica Sand	White Sand	Estados Unidos
	Superior Silica Sand	Brown Sand	Estados Unidos
	Black Mountain Sand	Brown Sand	Estados Unidos
	Grupo Arenas Patagónicas	Brown Sand	Argentina
	Chongqing Chanejiarg	Resin Coated Sand	China
<b>2022</b>	Mammoth Energy Services	White Sand	Estados Unidos
	Hi Crush Inc.	White Sand	Estados Unidos
	High Roller Sand	Brown Sand	Estados Unidos
	U.S Silica	Brown Sand	Estados Unidos
	Atlas Sand	Brown Sand	Estados Unidos
	Vista Proppants and Logistics	Brown Sand	Estados Unidos
	Arenas Argentinas del Paraná	Brown Sand	Argentina
<b>2023</b>	AMI Silica Sand	White Sand	Canadá
	Naviera Lojda S.Ab	Brown Sand	Argentina
<b>2024</b>	La Prierie	White Sand	Canadá
	Grupo Masur	Brown Sand	Argentina
	Badger Mining Corp	Resin Coated Sand	Estados Unidos
<b>2025</b>	Texas Silica LLc	Brown Sand	Estados Unidos
	NRG Proppants	Brown Sand	Argentina
	Preferred Sands	Resin Coated Sand	Estados Unidos

Tabla 2. Compilado de las compañías mapeadas para cada año prospectivo con la calidad de Frac Sand que ofrecen y país de origen. Elaboración propia.

al final, se estableció un gráfico que muestra la proporción de calidades ofrecidas en cada país mapeado (Figura 17).

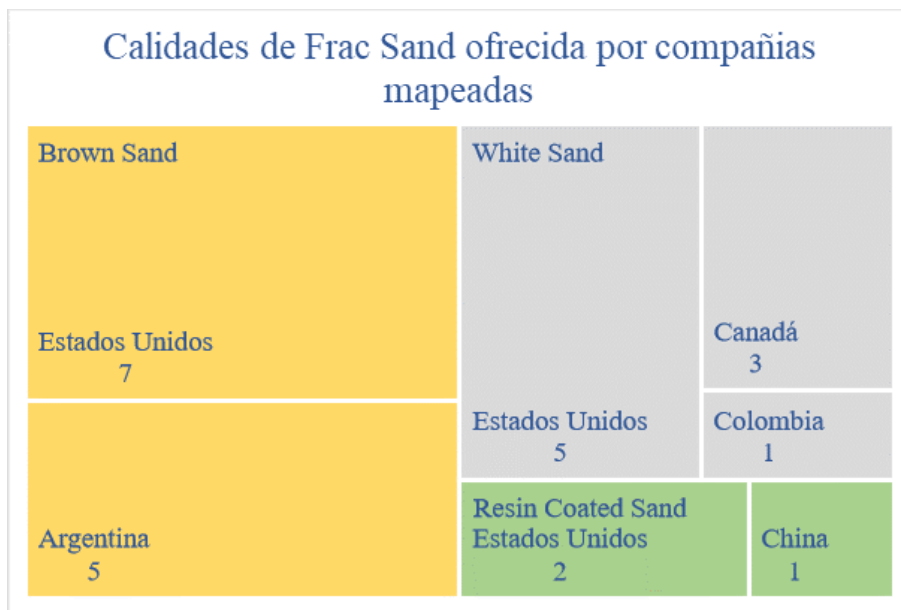


Figura 17. Comparación entre las calidades ofrecidas por las compañías mapeadas. Elaboración propia.

A su vez, con la información recolectada, se puede establecer el cambio de tendencia en la demanda de Frac Sand en los próximos cinco años, para las diferentes calidades; se resalta el crecimiento significativo en la demanda de la calidad “Brown Sand”, seguido por la calidad “Resin Coated Sand” y un decrecimiento de la calidad “White Sand” (Figura 18).

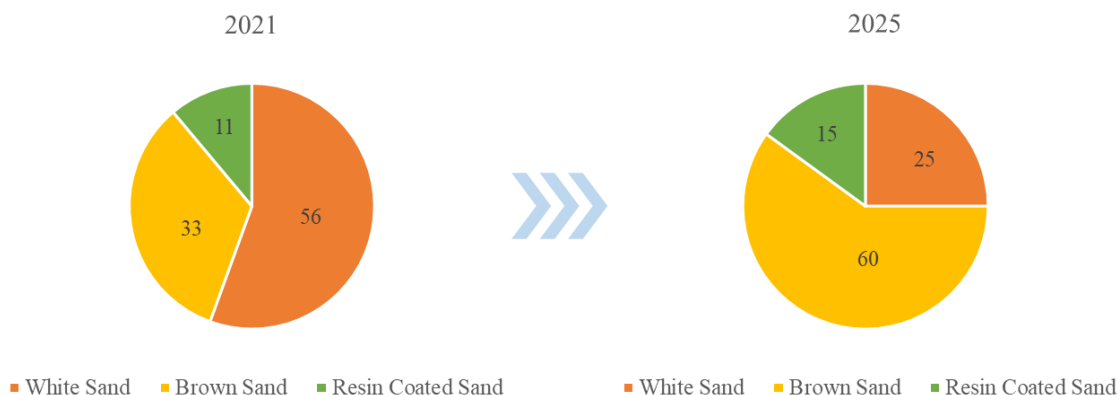


Figura 18. Prospección de demanda de las calidades de Frac Sand entre 2021 y 2025. Elaboración propia.

Se encontró información para cada uno de los productos finales de las compañías sobre el nombre, referencias de tamaño, información geológica, procesamiento y otras tecnologías usadas para lograr un valor diferenciador (Tabla 3).

Calidad de Frac Sand	País	Unidad geológica
White Sand	Estados Unidos	Formación St. Peters
		Formación Wonewoc
		Formación Jordan
		Formación Oriskany
		Formación Queen City
		Formación Oil Creek
	Canadá	Formación Peace River (Miembro Paddy)
		Cuenca Duvernay
		Cuenca Montney
Brown Sand	Estados Unidos	Formación Hickory
		Formaciones regionales en Texas
		Dunas Monahans
		Dunas Kemit
		Cuenca Permian
		Cuenca Mid-Con
	Argentina	Depósitos de terrazas fluviales del Río Chubut
		Lecho del Río Paraná
		Canteras subacuáticas del Río Paraná
*Para las arenas resinadas se utiliza como sustrato arenas de calidad White Sand de las formaciones estipuladas		

Tabla 3. Formaciones geológicas de donde se extrae el Frac Sand por país y calidad. Elaboración propia.

La tecnología asociada a la producción del Frac Sand consta de un procesamiento mineral dependiente de la fuente de extracción, para las arenas de canteras existen etapas de extracción, traslado a planta, lavado, corte en húmedo, secado, clasificación y almacenamiento. De otro modo, para las arenas silíceas extraídas por dragado, el procesamiento mineral varía ya que no debe ser lavado el material.

Algunas de las compañías poseen tecnologías de innovación con el fin de generar un valor agregado al producto, disminuir tiempos de elaboración o costos finales; NRG Proppants tiene una planta de lavado con sistemas de tratamiento y recirculación de agua para el ahorro del recurso, además cuenta con una fracción de fuente de energía solar para la planta y un sistema de aspersión de partículas en suspensión que reduce el riesgo al impacto en la salud de los trabajadores y las comunidades cercanas; Superior Silica Sands utiliza en el proceso de lavado el agua de lluvia recolectada para evitar el desperdicio del recurso hídrico.

Otras compañías como Black Mountain Sand reciclan el 98% del agua usada en el procesamiento, e implementan un software que permite el ingreso de cada camión a las plantas especificando la posición de los silos, proceso de carga e inventario de arena lo que genera un tiempo de 2,5 minutos para cargar cada camión con 23 Ton de arena; Source Energy Services emplea un proceso de recuperación de tierras para cuando se concluyen las actividades mineras, contribuyendo a la conservación del medio ambiente; Mammoth Energy Services ejecuta pruebas de calidad en laboratorio mientras el producto se procesa y Badger

Minning Corporation posee un centro de investigación y desarrollo para investigación aplicada a avances en las tecnologías y proveer soporte técnico en cualquier etapa de procesamiento.

Por otra parte, se identificaron como elementos importantes de prospección, conocimientos necesarios por parte de las compañías para entrar en la tendencia del mercado para los próximos cinco años. Algunos, se deben considerar en toda la prospección como las regulaciones de partículas en suspensión de sílice, las normas gubernamentales que rigen la industria de los hidrocarburos del sector no-convencional, vigilancia estratégica del mercado de los agentes de sostén y conocimiento técnico del procesamiento mineral para el Frac Sand.

Otros conocimientos son más puntuales, y se relacionan con las normas de calidad del Frac Sand para el año 2021, procesos de minerales industriales y desarrollo sostenible para los años 2021 y 2022, herramientas de comercialización de Frac Sand entre los años 2024 y 2025, entre otros (Tabla 4).

	2021	2022	2023	2024	2025	
<b>Conocimiento</b>	Conocimiento de las regulaciones nacionales e internacionales para las partículas en suspensión de sílice. Específicamente Estados Unidos y Argentina					
	Conocimiento de las normas o leyes gubernamentales acerca de la industria de los hidrocarburos en Colombia					
	Seguimiento a propiedad intelectual de los competidores: DustPro, SandBox, SandGuard, etc.					
	Conocimiento de tendencias del mercado de agentes de sostén: Arenas resinadas, Cerámicos, micropropantes					
	Vigilancia estratégica y tecnológica del mercado del Frac Sand nacional e internacional					
	Conocimiento de operación de planta de procesamiento y centro de I+D					
	Conocimiento en procesos de minerales industriales y desarrollo sostenible					
	Conocimiento de características geológicas de depósitos de Frac Sand					
				Herramientas de comercialización de Frac Sand		
	Conocimiento de las propiedades establecidas en la norma (ISO 13503-2 API19C					
		Conocimiento de pozos no convencionales prospectivos				
	Comprensión de la cadena de valor optima para el mercado de Frac Sand					
			Conocimiento de desarrollo de negocio para Frac Sand			
Conocimiento de la función del Frac Sand en el fracturamiento hidráulico						

Tabla 4. Conocimientos requeridos para el mercado del Frac Sand entre los años 2021 y 2025. Elaboración propia.

Por último, se determinaron unos recursos que permiten a los proveedores del Frac Sand alcanzar el crecimiento esperado durante el periodo 2021 a 2025. Algunos de los recursos son vigentes para todo el intervalo de tiempo como lo son una mina fuente de extracción de Frac Sand ubicada cerca de las cuencas donde se desarrollan pozos de fracturamiento hidráulico, laboratorios certificados para validar las muestras de arena silíceas a partir de las normas ISO 13503-2 y API 19 C, por lo menos una planta de procesamiento para Frac Sand que tenga cada proceso necesario para la elaboración del producto (lavado, cribado, secado, clasificación y almacenamiento) y una estrecha colaboración investigativa por parte de entes como universidades, empresas (proveedoras y operadoras), consultores y el Estado.

Otros recursos se encuentran estipulados para intervalos de tiempo puntuales como lo son centros de investigación y desarrollo para el 2025, programas que minimicen o eliminen los impactos de las compañías en los Objetivos de Desarrollo Sostenible entre los años 2022 y 2023, procesos automatizados desde la extracción hasta la entrega del producto final a los clientes entre los años 2024 y 2025, entre otros (Tabla 5).

	2021	2022	2023	2024	2025
<b>Recursos</b>	Mina fuente de extracción de Frac Sand cercana al consumidor final				
	Laboratorio especializado con equipos de validación de normas (ISO13503-2 y API 19C)				
	Planta de procesamiento para Frac Sand (Lavado, cribado, secado, clasificación y almacenamiento)				
	Colaboración con equipos de investigación (universidades, empresas, consultores, proveedores)				
				Servicio al cliente para ventas a cliente final	
	Recurso técnico especializado e inclusivo			Centro de I+D	
	Servicio de última milla por medio de transporte terrestre				
				Alianzas con clientes	
	Sistema de aspersión para el polvo de sílice				
	Identificación de proveedores de Frac Sand en Latinoamérica				
				Software de seguimiento a proceso en tiempo real	
	Estudios de efectos al medio ambiente				
				Proceso automatizado desde extracción a entrega final	
				Impacto en ODS	
				Flota propia de camiones	

Tabla 5. Recursos requeridos para el mercado del Frac Sand entre los años 2021 y 2025. Elaboración propia.

## 6.2. Matriz de vigilancia estratégica

A partir de la información recopilada en términos técnicos y tecnológicos, de mercados, de competidores y de las características del entorno mundial, se elaboró una matriz de vigilancia estratégica que se presenta en el Anexo 2 de manera completa; sin embargo, se representan a manera de resumen, los principales hitos de cada una de ellas en la Figura 19.

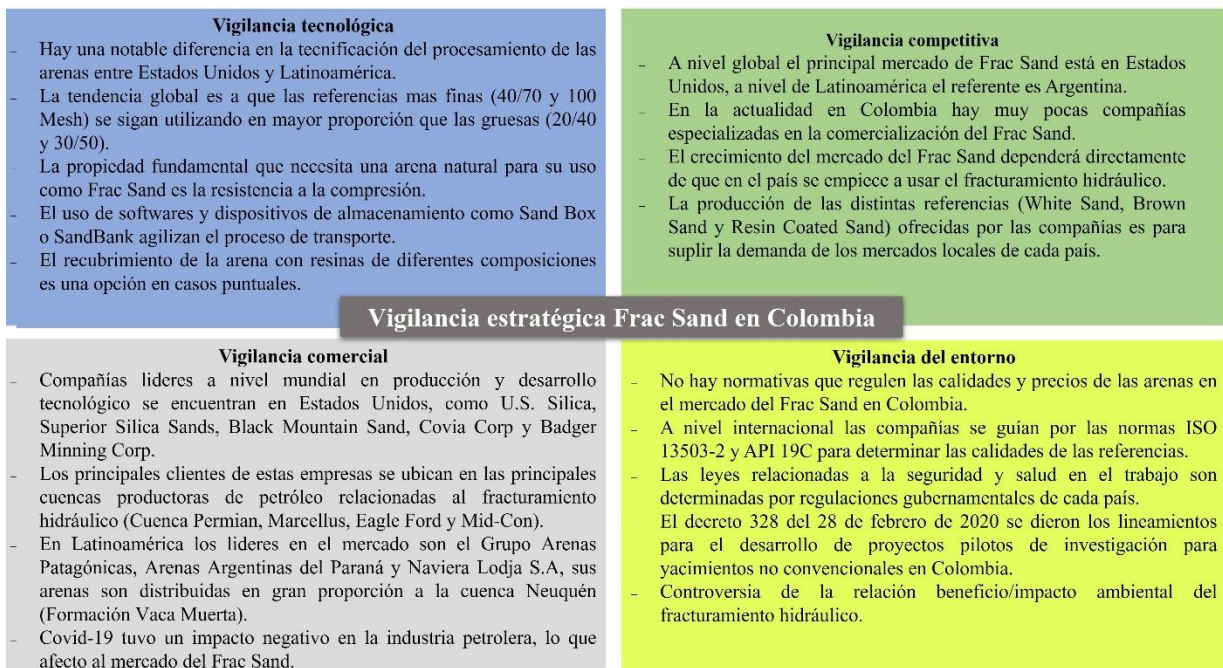


Figura 19. Vigilancia estratégica para el mercado de Frac Sand en Colombia. Elaboración propia.

Para la presentación de la información obtenida de la vigilancia estratégica se inicia explicando la información comercial y de competidores, seguido a esto la tecnología y por último la relación con el entorno.

La Figura 20 destaca la diferencia en la producción de las compañías mapeadas en Estados Unidos con 73,71 Mt/Año con relación a las de Argentina con apenas 3,6 Mt/Año.

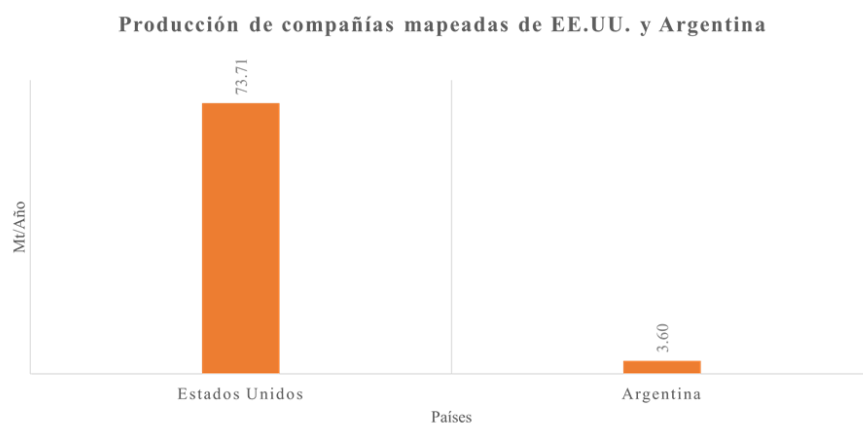


Figura 20. Producciones de Frac Sand comparativa entre Estados Unidos y Argentina. Elaboración propia.

Según la información de los productos ofrecidos por las 14 compañías de Estados Unidos y las 7 de Argentina (Figura 21) se puede observar que tanto para el país norteamericano como el suramericano hay una mayor concentración de productos hacia las referencias más finas que abarcan la 40/70 y la 100 Mesh.

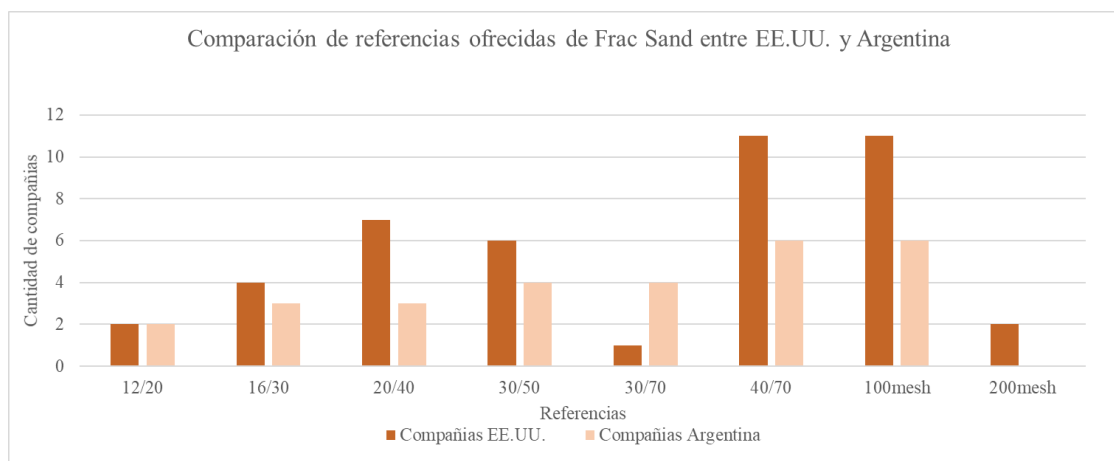


Figura 21. Comparación entre las referencias de Frac Sand ofrecidas en Estados Unidos y Argentina. Elaboración propia.

La Tabla 6 muestra la tecnología patentada de algunas compañías y su respectiva función, la mayoría relacionadas con el proceso logístico como el Sand Box o los softwares especializados, y otras afines al mejoramiento del producto como FloPRO o el DustPRO.

Tecnología patentada	Función	Compañía	País
Sand Box	Logística segura y eficiente eliminando los problemas de entrega, reduce el impacto en la salud y seguridad de las partículas de sílice en los puestos de trabajo y comunidades aledañas, aumenta el 30% del rendimiento del pozo por día, disminuye el área de almacenamiento.	U.S. Silica	Estados Unidos
NEXSTAGE	El sistema de silos almacena grandes volúmenes de apuntalante en silos verticales de pequeño tamaño. Disponible en una variedad de tamaños y configuraciones, cada silo se entrega y se monta en aproximadamente dos horas con un sistema de transporte sin grúa.	Hi Crush	Estados Unidos
SandGuard	Método para revestir y proteger los granos de arena de la abrasión, lo que minimiza la generación de polvo.	Superior Silica Sands	Estados Unidos
Sahara Proppant Storage Unit	Unidades de almacenamiento (más pequeño de la industria), monitoreo de inventario en tiempo real, capacidad de hasta más de cuatro millones de libras, operaciones seguras, diseño de baja generación de polvo, recolección de polvo adicional que minimiza la exposición a la sílice y son totalmente eléctricas.	Source Energy Services	Canadá
DustPRO	Solución diseñada para reducir las partículas de polvo de sílice en el aire durante todos los puntos de transferencia de arena, incluida la transferencia neumática.	Preferred Sands	Estados Unidos
DuPont STOP	El proceso DuPont STOP es utilizado para el seguimiento de la seguridad de los empleados en la planta.	Superior Silica Sands	Estados Unidos
FloPRO	Combina la tecnología de transporte del agente de sostén con un revestimiento hidrofóbico duradero para una distribución superior y una mayor producción.	Preferred Sands	Estados Unidos
ONCORE Processing	Solución totalmente integrada gestiona toda la cadena de valor de la última milla del apuntalante con la flexibilidad de proporcionar el equipo adecuado para satisfacer cualquier necesidad del cliente.	Hi Crush	Estados Unidos

AMI RockChain	Es la plataforma más grande de Norteamérica para comprar, vender y transportar grava, arena y materiales de superficie.	AMI Silica Sand	Canadá
PROPDISPATCH	La plataforma de logística y gestión de agente de sostén proporciona visibilidad, automatización y adquisición de datos en tiempo real. El software de aplicación móvil y basado en la web aumenta la eficiencia operativa de muchas maneras:	Hi Crush	Estados Unidos
SandBank	Sistema de silos móviles con altos estándares de seguridad y menor impronta en locación, está Completamente cerrado, eliminando así el problema del material particulado, esta solución permite reducir el impacto en la zona de operación de la fractura, minimizar desperdicios de material y proteger la salud y el ambiente mitigando ruido y polvo en suspensión, incrementando así la cantidad de etapas de fractura realizables por día de trabajo.	National Oilwell Varco*	Estados Unidos
*Firmó contrato de exclusividad con NRG Proppants (Argentina)			

Tabla 6. Tecnología patentada utilizada por algunas compañías mapeadas en el desarrollo del Frac Sand. Elaboración propia.

La Tabla 7 presenta las formaciones geológicas con su edad y ambiente de formación, donde extraen las arenas silíceas para Frac Sand las diferentes compañías, se distingue que U.S. Silica es la que tiene mayor diversificación en las formaciones.

Geología			
Compañías	Formación geológica	Edad	Ambiente de formación
U.S. Silica, Covia Corp., Hi Crush, Emerge Energy Services, Badger Mining Corp., LaPrairie	Formación St. Peters	Ordovícico Medio	Ambiente marino con multihilo entre procesos de costa marina y eólicos costeros
Covia Corp., Mammoth Energy Services, Badger Mining, U.S. Silica	Formación Wonewoc	Cámbrico Tardío	Ambiente marino cerca de la costa controlado por las olas
U.S. Silica	Formaciones Oil Creek	Ordovícico Medio	Ambiente marino transgresivo - regresivo
U.S. Silica	Formación Oriskany	Devónico Temprano	Ambiente marino transgresivo poco profundo, plataforma de alta energía o playa, crestas mareales o dunas submarinas
U.S. Silica	Formación Queen City	Eoceno	Ambiente deltaico progradacional dominado por las olas
U.S. Silica	Formación Sylvania	Devónico Medio	Ambiente marino somero influenciado por la marea, sistema transgresivo
U.S. Silica	Formación Hickory	Cámbrico Tardío	Ambiente marino transgresivo
Atlas Sand	Dunas Monahans	Pleistoceno	Ambiente eólico
Atlas Sand, High Roller Sand	Dunas de Kermit	Pleistoceno	Ambiente eólico
Mammoth Energy Services, Covia Corp.	Formación Jordan	Cámbrico Tardío - Ordovícico Temprano	Ambiente marino intermareal de alta energía

LaPrairie	Formación Peace River (Miembro Paddy)	Cretácico Temprano	Ambientes aluviales a marinos poco profundos
Grupo Arenas Patagónicas	Depósitos de terrazas fluviales del Río Chubut	Cuaternario	Ambiente fluvial
Arenas Argentinas del Paraná, Naviera Lodja S.A.	Canteras subacuáticas del Río Paraná	Cuaternario	Ambiente fluvial

Tabla 7. Geología de las formaciones fuente de Frac Sand. Elaboración propia. Fuente: (Bauer, 2010; Benson & Wilson, 2015; Energy, 2018; Hobday et al., 1980; Kostelnik & Carter, 2009; Menga & Solsona, 2019; Plint et al., 2018; SPETSERIS, 1985; Wise, 2014; Elizabeth & Waite, 1969; Transporte Rada Tilly S.A., 2014)

Para la vigilancia de entorno se destaca lo siguiente, en términos de la situación socioambiental se distingue que el Frac Sand sería un tema controversial. Debido a la posible afectación a las fuentes hídricas y la relación con el fracturamiento hidráulico y la minería.

Las Normas ISO 13503-2 y API 19C establecen los estándares de calidad y los parámetros físicos y químicos que deben tener los agentes de sostén a nivel internacional (Peñaranda, 2014), mientras en China los agentes de sostén cumplen con el estándar Q/SY125-2007 de la Corporación Nacional de Petróleo de China (CNPC) y el estándar SY/T5108-2006 de la industria de petróleo y gas (Chongqing Changjiang River Moulding Material Group, 2021).

En Argentina no hay una ley que estandarice la explotación de los yacimientos no-convencionales, según la Constitución Argentina en el artículo 124 las provincias tienen autoridad sobre el manejo de sus recursos. La provincia de Neuquén en el año 2002 acogió el Decreto 1483/2012 que ponía en práctica el fracturamiento hidráulico, permitiendo un avance en el conocimiento alrededor de este. Asimismo, Estados Unidos el marco regulatorio para el fracturamiento hidráulico depende del estado en el que se esté explotando (Barreto, 2016).

En Canadá, la Provincia de New Brunswick denegó el fracturamiento hidráulico mediante la Regulación 2015-28 y en Quebec hay una prohibición parcial únicamente cuando se aplica para extraer gas (Fierro Morales, 2019).

En Colombia no hay normativas relacionadas al Frac Sand, sino a la industria del petróleo y gas, la Ley 37 de 1931 indica que los hidrocarburos son de propiedad del país y solo podrán extraerse a partir de contratos (Jaramillo Mora, 2015), el Ministerio de Minas y Energía en el Decreto 328 de 2020 indica los lineamientos a seguir para los proyectos piloto de investigación de yacimientos no-convencionales en el territorio nacional.

Otra información identificada es la de los riesgos que existen debido a la exposición del sílice, la silicosis es una enfermedad causada por la inhalación frecuente de polvo de sílice, afecta

la arquitectura de los pulmones y genera fibrosis que no se puede revertir (Abú-Shams et al., 2005). Para esto, en estados Unidos la Ley de Salud y Seguridad Ocupacional de 1970 indica que se deben identificar las acciones que comprometan a los trabajadores a la exposición periódica y tomar precauciones, así el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH, por sus siglas en inglés) y la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, por sus siglas en inglés) trabajan en conjunto para contrarrestar la silicosis (OSHA, 2010).

En el marco de las regulaciones en Colombia, el artículo 9 de la Ley 1562 de 2012 señala que en las empresas donde existan sustancias que causen enfermedades, tendrán que efectuar una cantidad mínima de actividades de prevención conforme a las regulaciones que expida el Ministerio de Trabajo, Salud y Protección Social (Ley 1562 de 2012, 2012). El ministerio en el Decreto 1072 de 2015, en la Resolución 0312 de 2019 proporciona los estándares mínimos del sistema de gestión de la salud y seguridad en el trabajo en el que incluyen las operaciones de prevención contra las sustancias cancerígenas o tóxicas (Decreto 1072 de 2015, 2015).

### 6.3. Nivel de madurez tecnológica para el mercado del Frac Sand en Colombia

De acuerdo con la clasificación establecida para los TRL se puede clasificar el grado de desarrollo tecnológico en un nivel TRL 4, que se ha adelantado con la colaboración de entidades públicas, privadas, académicas, centros de investigación y la industria minera e hidrocarburos, donde se determina si las especificaciones técnicas tienen la capacidad de funcionar correctamente en el sistema de un pozo no-convencional. Para los países referentes que son Estados Unidos y Argentina el TRL es 9 (Figura 22) ya que el Frac Sand se encuentra disponible para producción y comercialización. No obstante, el nivel de desarrollo en Estados Unidos es más avanzado por la trayectoria de la explotación de yacimientos no-convencionales.

Etapa	Fase	Nivel	TRL
Academia	Desarrollo de conocimiento	1	Principios básicos observados y reportados
		2	Concepto de tecnología y/o aplicación formulada
		3	Función crítica analítica y/o prueba de concepto característica
		4	Validación de Componentes y/o prototipo en un entorno de laboratorio
Colaboración (Alianzas)	Desarrollo tecnológico	5	Validación de Componentes y/o prototipo en un entorno relevante
		6	Modelo del sistema/subsistema o demostración del prototipo en un entorno relevante
Industria	Desarrollo del negocio	7	Demostración del prototipo del sistema en un entorno operativo
		8	Sistema real completado y calificado mediante prueba y demostración
		9	Sistema real probado en el entorno operativo

■ Colombia      ■ EE.UU y Argentina

Figura 22. TRL para el mercado del Frac Sand en Colombia, Argentina y Estados Unidos. Elaboración propia.

## 6.4. Brechas tecnológicas identificadas en la cadena de valor del mercado del Frac Sand en Colombia

Según la información recopilada en el proyecto, se identificaron cinco brechas tecnológicas en el desarrollo de la cadena de valor del Frac Sand (Figura 23), teniendo como referencia el mercado a nivel internacional, principalmente el argentino que es el mercado a seguir a nivel de Latinoamérica por sus avances y ciclo productivo.



Figura 23. Brechas tecnológicas identificadas en Colombia. Elaboración propia.

### 6.4.1. Investigación limitada de depósitos potenciales

En Colombia se identificó una falta de información geológica y de factibilidad técnica en relación con los posibles depósitos de arenas silíceas para Frac Sand, que cumplan con las especificaciones necesarias para ser utilizadas en el fracturamiento hidráulico.

### 6.4.2. Calidad de las arenas locales

A nivel nacional no existe una zonificación de las calidades Frac Sand (White Sand y Brown Sand) que permita comparar información técnica local con el material que se usa en Estados Unidos y Argentina. Además, se encontró una referencia de Frac Sand comercializada por GTM Chemicals en Colombia. Sin embargo, esta no se produce en el país.

### 6.4.3. Laboratorios locales certificados con normas internacionales

No hay disponibilidad de laboratorios estandarizados con las normas ISO 13503-2 y API 19C en Colombia que certifiquen las arenas silíceas para su uso como Frac Sand. Esta sería la principal brecha tecnológica asociada a corto plazo para el desarrollo del mercado nacional.

### 6.4.4. Logística de transporte

El estado actual de las vías nacionales posiblemente no sea el más adecuado para el transporte de los volúmenes relacionados a la producción de Frac Sand. Así mismo, es probable que la oferta de las unidades de carga sea inferior a las que se necesitan.

### 6.4.5. Infraestructura

Esta brecha es determinada por la falta de plantas de procesamiento específicas para Frac Sand, que ejecuten todos los procesos necesarios de calidad para la obtención del producto final. Adicionalmente, hasta el momento no hay unidades de almacenamiento para el material que garanticen condiciones de seguridad y salud.

### 6.5. Ruta de validación experimental para muestra de arena sílice colombiana para Frac Sand

En Colombia las brechas identificadas se encuentran en la etapa de procesamiento y en la aprobación de su calidad en las diferentes etapas del proceso, según los requerimientos de la norma ISO 13503-2 y API 19C, de las arenas síliceas que hacen parte de las actividades primarias de la cadena de valor del Frac Sand. Para esto se desarrolla un flujograma que especifica la ruta de validación experimental que se propone para la selección de una muestra de arena con referencia 40/70 o 100 mesh con una calidad “Brown Sand”, y los criterios de selección fueron el ambiente de formación, la composición mineralógica (Cuarzo > 90%), el grado de madurez mineralógico y textural para garantizar un uso final adecuado como agente de sostén en un pozo no convencional y seguir las tendencias del mercado actual (Figura 24).

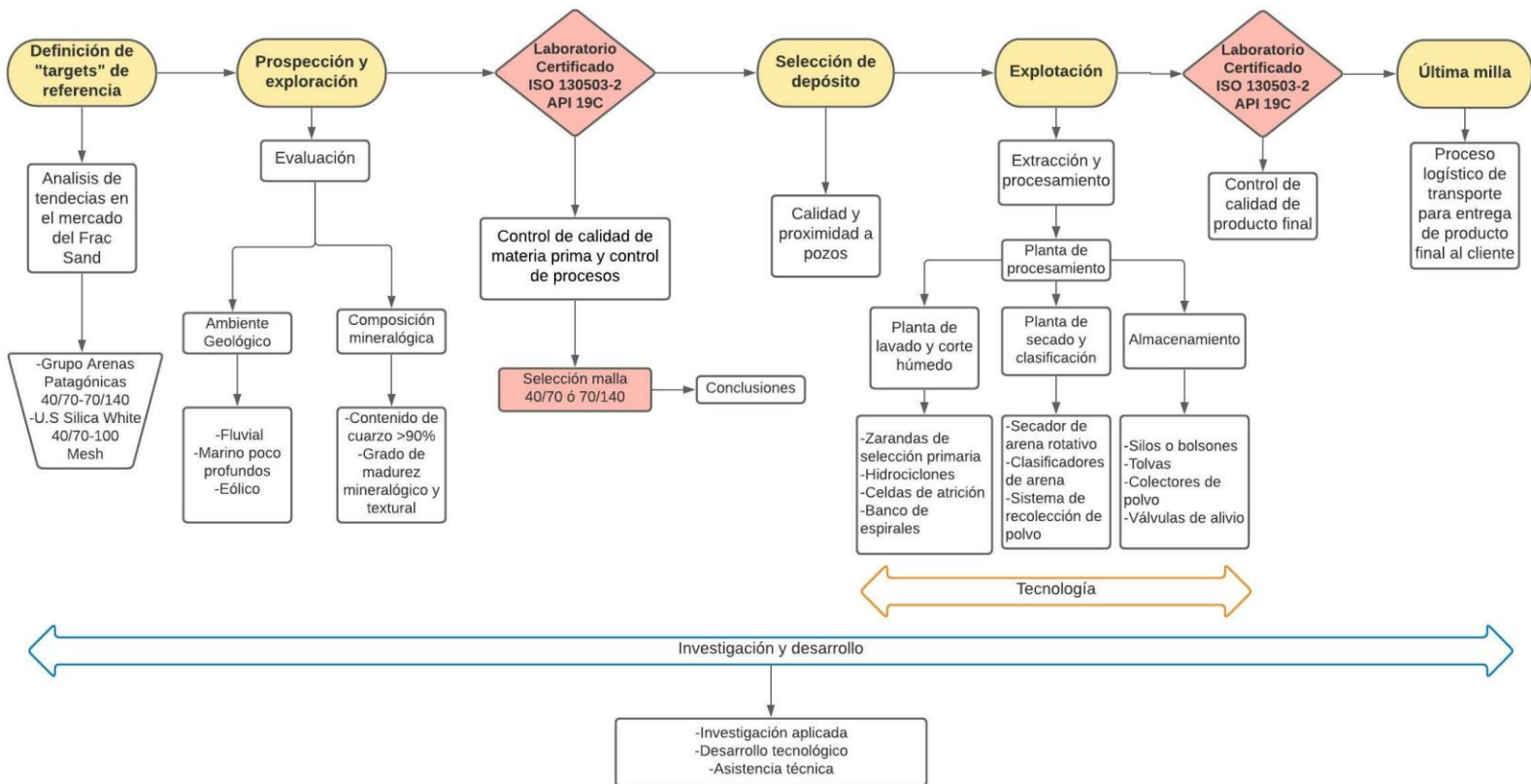


Figura 24. Ruta de validación experimental para una muestra de arena sílice colombiana para uso como Frac Sand. Elaboración propia.

- 1. Definición de “targets” de referencia:** esta etapa inicial es importante para identificar las especificaciones de productos comerciales que serán referentes para calificar la calidad de las muestras de estudio, en este caso son los productos del Grupo Arenas Patagónicas con referencias 40/70 y 70/140 de calidad “Brown Sand” y el producto U.S Silica White de la compañía U.S Silica con referencias 40/70 y 100 mesh de calidad “White Sand”.
- 2. Prospección y exploración:** esta fase consiste en el diseño del proyecto, una exploración de reconocimiento regional y una exploración a detalle. De esta manera, debe reconocerse el ambiente geológico asociado a los depósitos de Frac Sand existentes. En los países de referencia mapeados se establece que los depósitos son de origen marino, fluvial y eólico, entre edades que pueden variar entre el paleozoico y cuaternario, por lo cual se debe realizar una zonificación de los depósitos nacionales con el fin de identificar los prospectivos y posteriormente explorarlos.

Además, se debe realizar una evaluación primaria de la calidad de la arena que debe cumplir la composición mineralógica mayor al 90% de cuarzo presente, el tipo de cuarzo de preferencia monocristalino, el grado de madurez textural y mineralógico, el tamaño del depósito, estimación de reservas, la cercanía de los depósitos a las cuencas donde se realizaría el bombeo y de esta manera se podría avanzar o descartar inicialmente una muestra.

- 3. Laboratorio certificado:** esta fase consiste en la validación técnica que requiere el Frac Sand para ser utilizado como agente de sostén basado en las normas correspondientes ISO 13503-2 y API 19C. Para esto se realizan determinados ensayos (tamizado, esfericidad y redondez, solubilidad en ácido, densidades bulk y aparente, turbidez y resistencia a la compresión) y posteriormente se comparan los resultados con los valores que establece la norma para cada granulometría.

Hay algunos ensayos que las empresas proveedoras del insumo y los clientes consideran más determinantes que otras, como lo son la relación de granulometría y la resistencia a la compresión ofrecida en cada producto Frac Sand (Escamilla, 2017). Para Colombia se establece la selección de referencias 40/70 o 100 Mesh, esto con el fin de entrar en la tendencia del mercado que tiene como disparador aumentar la oferta de estos tamaños de arenas al año 2025.

Esta etapa se ve reflejada dos veces en la ruta de validación experimental de la muestra de arena, primero deben incluirse procesos de aprobación de calidad en procesos y no de producto terminado, en la evaluación de las muestras provenientes

de las minas. Estas pruebas no tienen que ser todas las de la norma, sino las que se definan como estrictamente necesarias por su alto grado de correlación con las propiedades del producto final. Esto se establece así por costos y por rapidez de la información. Luego, se deben realizar pruebas de aprobación de calidad de producto final después del procesamiento, estas se hacen para establecer las especificaciones que van en la ficha técnica y deben estar sujetas a la norma siempre. De esta forma poder comparar los resultados obtenidos con las fichas técnicas de los materiales de referencia y los requerimientos solicitados por el cliente.

4. **Selección de depósito:** en esta etapa, se procede a definir el potencial económico de los depósitos considerando reservas estimadas, aspectos geográficos, logísticos y una buena relación calidad-proximidad al pozo no-convencional de aplicación.
5. **Explotación y procesamiento mineral del material:** en esta fase se encuentra todo el proceso metalúrgico que requiere la arena para un uso como Frac Sand. Los procesos de beneficio están asociados al tipo de material extraído, si el material es extraído de un depósito aluvial, se procede a lavar, secar, clasificar y almacenar, si el material es extraído de una cantera, se requiere primero un proceso de molienda para luego ser lavado, secado y clasificado, y si el material es extraído por dragado se procede a secar, clasificar y almacenar. Cada proceso se instala dependiendo de las características del material explotado.

Con relación a la tecnología que se debe utilizar con el fin de lograr una calidad en el Frac Sand optima comparable con los productos internacionales, se debe cumplir: para la planta de lavado y corte en húmedo una utilización de zarandas de selección primaria que permiten una clasificación inicial en seco de los tamaños más grandes del resto de la granulometría, hidrociclones que permiten clasificar un tamaño grueso de un tamaño fino e indirectamente una pequeña pulida a los granos que puede ser beneficiosa, unas celdas de atrición que permiten eliminar impurezas como óxidos y arcillas presentes en los granos de cuarzo y un banco de espirales que se utiliza para separar los minerales pesados de los sedimentos.

Para la planta de secado y clasificación se debe utilizar secaderos de arena rotativo con el fin de eliminar la humedad del material al 0,01%, clasificadores de arena que permite diferenciar la arena seca en las mallas 40/70 y 70/140, colectores de polvo y sistemas ambientales con el fin de disminuir las partículas en suspensión de sílice que son nocivas para la salud de los colaboradores de la planta y la comunidad aledaña. Para el almacenamiento la planta debe contar con silos de acero abulonados y unidades de descargue del producto terminado, acordes con el volumen de producto final definido por el proyecto minero.

Además, se sugiere que exista una estrecha relación con el centro de investigación y desarrollo con el propósito de que todo el proceso esté en constante mejoramiento a partir de investigación aplicada al depósito y sus características geológicas y productivas, desarrollo tecnológico que permita un mejor rendimiento del ciclo productivo de la planta de procesamiento, y por último que permita la asistencia técnica en todo momento para mejorar las condiciones de proceso o de producto, apoyar los operadores y mejorar los indicadores de producción, entre otros.

- 6. Última milla:** esta sección se encuentra relacionada con la entrega del producto final a los clientes que serían las operadoras petroleras. Se debe buscar la posibilidad de que tanto la mina, la planta de procesamiento y la unidad de almacenamiento se encuentren a distancias cercanas de los pozos no convencionales donde será bombeado el Frac Sand.

Adicionalmente, es importante conocer la relación costo-beneficio de diferentes opciones de transporte, como por ejemplo la opción de contar con una flota propia de camiones o una opción de subcontratación de estos servicios. Los camiones deberían contar con gas natural como combustible con el fin de minimizar los efectos negativos en el medio ambiente, transportarían aproximadamente 30 toneladas en tolvas construidos específicamente para el Frac Sand, asegurando que el material llegue al cliente sin humedad y sin generación de partículas de sílice en suspensión.

## 7. Discusión

A partir de la información obtenida en este proyecto, se puede confirmar la hipótesis establecida acerca de que en Colombia existen brechas tecnológicas asociadas al mercado del Frac Sand en las actividades primarias de la cadena de valor, teniendo en cuenta las etapas de operaciones y procesamiento mineral. Sin embargo, se pudieron determinar unas brechas tecnológicas en otras etapas como el transporte y almacenamiento.

Estos resultados guardan relación con lo que sostienen Escamilla (2017) Losa & Pruscino (2016) Patri et al. (2018) Secretaría de Política Mínera de Argentina (2017) y (Giglio, 2018) en el mercado de Frac Sand Latinoamericano, quienes señalan que en el mercado argentino existe un camino largo por recorrer para llegar a la dimensión que presenta el desarrollo en Norte América en cuestión de los volúmenes de producción, el proceso logístico, el procesamiento del mineral y la situación de oposición social presente para este tipo de industria. Esto acorde con lo que en este estudio se identifica para Colombia.

A su vez, los resultados obtenidos se logran comparar positivamente con lo que sostienen Le Capitaine & Carlson (n.d.) Locke (2015) Weijers et al. (2019) Wiseman (2019) y HartEnergy (2018) quienes explican como el mercado global de los agentes de sostén ha estipulado una mayor proporción de uso de arenas naturales con el fin de reducir costos en el proceso de producción del insumo, lo que se ve reflejado en una disminución en el costo total de la

elaboración de un pozo no convencional. Además, explican que la tendencia apunta a que se desarrolle mercado local de Frac Sand con calidades “Brown Sand” para cada país productor de petróleo y gas por fracturamiento hidráulico, siempre y cuando se garantice la buena finalidad en la utilización del agente de sostén, esto permitiría a las compañías proveedoras del material disminuir costos de importaciones y de fletes de transporte debido a la cercanía que tendría las minas, plantas de procesamiento y las formaciones petroleras.

Adicionalmente, los autores realizan una prospección hacia los tamaños de arena fina que presentarán una mayor demanda para los próximos años, específicamente las referencias 40/70 y 70/140, que mejoran el rendimiento de las plantas de procesamiento y equivale a que las compañías reduzcan tiempo de producción e inversión a lo largo del ciclo de desarrollo del Frac Sand. Por último, señalan que el mercado de Frac Sand seguirá en crecimiento y su valor será dependiente del desarrollo de la industria de hidrocarburos. Esto también es acorde a los hallazgos de este estudio.

Sin embargo, en lo que no se concuerda con Le Capitaine & Carlson (n.d.) Locke (2015) Weijers et al. (2019) Wiseman (2019) y HartEnergy (2018) es respecto a la situación colombiana acerca del nivel de desarrollo del mercado del Frac Sand. Estados Unidos es el mayor productor de Frac Sand en el mundo, tiene muy bien elaborada la cadena de valor del producto y cuenta con una tecnología a la vanguardia que permite un amplio conocimiento del proceso productivo.

Por otra parte, Argentina en Latinoamérica es el país que mejor desarrollo presenta en términos del mercado del agente de sostén ya que cuenta con un avance en desarrollo del fracturamiento hidráulico para extraer los hidrocarburos presentes en la Formación Vaca Muerta, y siendo un mercado con volúmenes de producción mucho menores que el entorno norteamericano, con menos depósitos de extracción y menos tecnología de innovación en los procesos tanto del material como de logística; es un mercado que se encuentra en crecimiento con alta demanda de las empresas petroleras y una gama de competidores de compañías proveedoras.

No obstante, Colombia está realizando proyectos piloto de fracturamiento hidráulico, pero el mercado de Frac Sand se encuentra con un nivel de madurez bajo, debido a que hay poca investigación científica para depósitos de arenas silíceas prospectivos para Frac Sand, ausencia de laboratorios certificados con las normas ISO 13503-2 y API 19C, vacíos de conocimiento en las tendencias a nivel internacional que direccionan el mercado, falta de colaboración entre la academia y compañías petroleras en el país, poca vigilancia estratégica al recurso mineral y la oposición social al fracturamiento hidráulico con sus efectos en el medio ambiente.

Actualmente el gobierno tiene interés en el desarrollo de esta técnica debido a la disminución de las reservas de hidrocarburos en la nación como lo señala Martínez et al. (2019) esto coloca en un escenario complejo la autosuficiencia energética del país, por lo que es posible

que el mercado de Frac Sand local en Colombia se convierta en uno de los focos de interés de desarrollo por parte de la industria petrolera y minera.

Cada uno de los resultados obtenidos por este estudio arrojó información para analizar de forma independiente. Por lo tanto, se explicarán detalladamente a continuación.

### **7.1. Hoja de Ruta Tecnológica para el mercado de Frac Sand a nivel internacional**

Con los resultados obtenidos se pudo establecer como es el funcionamiento del mercado de Frac Sand a nivel internacional por medio de las 25 empresas mapeadas productoras de Frac Sand en los países de Estados Unidos, Canadá, China y Argentina.

Estados Unidos se ubica como mayor productor de Frac Sand en el mundo, ofrece toda la gama de referencias y calidades “White Sands, Brown Sands y Resin Coated Sands”, poseen el suficiente conocimiento geológico de las formaciones de extracción, utilizan tecnologías patentadas por empresas para mejorar el procesamiento y la función del agente de sostén, optimizar los recursos en el aspecto logístico y la reducción de partículas en suspensión de sílice.

Argentina como representante de Latinoamérica poseen un mercado de Frac Sand en crecimiento, tiene compañías que incursionan el uso de nuevas tecnologías para asemejarse al nivel de Estados Unidos, ofrecen calidad “Brown Sand” en sus productos y las diferentes referencias necesarias para generar una buena oferta para las compañías petroleras. En brechas con respecto a Estados Unidos se encuentran limitaciones de canteras de extracción, hasta el momento son muy pocas; altos costos en el transporte desde las plantas de procesamiento hasta las plantas de almacenamiento, resultado de la limitada oferta de flota de camiones que hay, los largos trayectos desde la mina al pozo y la calidad de las arenas locales, ya que no cumplen con algunos ensayos de la norma API 19C.

El direccionador de las compañías proveedoras y operadoras en Argentina es que el agente de sostén cumpla su función, por ende, se toma en cuenta como principal criterio que la resistencia a la compresión de los materiales para cada tamaño sea el de la norma, el resto de los ensayos pueden variar, esto hace que el precio por tonelada de Frac Sand sea mucho menor ahí que en Estados Unidos.

Lo que tienen en común ambos mercados en los diferentes países es que las industrias tienden a llevar sus minas de extracción y plantas de procesamientos a la cercanía de las cuencas petroleras donde se utiliza el insumo, esto con el fin de ahorrar en el alquiler de camiones o trenes que deben realizar largos viajes desde el lugar de procesamiento hasta las unidades de almacenamiento. Esto impacta positivamente el precio del pozo final, dándole a sus clientes la oferta que necesitan y generando competitividad.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecen unos disparadores de mercado que tiene la industria del Frac Sand entre los años 2021 y 2025 con el fin de generar mayor producción,

mejorar el nivel de ventas y garantizar que cada proveedor tenga una cartera de clientes que permita la continua existencia de oportunidades.

Uno de los controladores de mayor importancia son los avances en la perforación de pozos no convencionales para la extracción de petróleo y gas dado que el aumento de esto genera más demanda de Frac Sand. En cuestión logística las industrias buscan la reducción del costo de este rubro, en algunos casos sacrificando la calidad del material, pero asegurando que funcione; así las ventajas competitivas de las empresas son estipuladas por la cercanía que hay entre las minas de extracción, las plantas de procesamiento y los pozos de aplicación de las operadoras. Adicionalmente, dado el crecimiento del fracturamiento hidráulico, la industria del Frac Sand espera aumentar los precios de sus productos finales; para el 2020 el mercado estaba avaluado en 5491,8 millones de dólares, con un valor de 0,024 US/Lb y 0,12365 US/Lb dependiendo de la calidad ofrecida, y se estima que este valor cambie para el 2026 a aproximadamente 9515,5 millones de dólares.

Otro direccionamiento de la industria del Frac Sand es que la generación de partículas de sílice suspendidas en el aire disminuya debido a los problemas de salud, enfermedades y contaminación que esto trae para el personal que trabaja en las minas y las comunidades aledañas; para esto algunas de las empresas a nivel global han desarrollado tecnologías que permiten un mejoramiento de la situación, lo que les da un valor agregado a sus productos y servicios.

A su vez, algunos de los pozos de mayores profundidades con exposición a presiones mayores presentan el problema del retorno de flujo de algunas referencias de productos ofertados, por lo que algunas compañías también han optado por el desarrollo de tecnologías, o procesamiento mineral en sus productos que permitan reducir o eliminar este fenómeno.

Otras de las compañías han optado por implementar mezclas entre arenas extraídas de diferentes ambientes de formación para complementar las especificaciones técnicas requeridas como la resistencia a la compresión.

La industria a nivel global busca ampliar el portafolio de arenas locales que cumplan con las especificaciones de las normas ISO 13503-2 y API19C, con el ánimo de detener costosas importaciones del insumo y así lograr establecer mercados nacionales dentro de cada país que supla la demanda de los pozos no convencionales existentes en su territorio.

Por otro lado, con el fin de generar mejor rendimiento en las plantas de procesamiento de arenas desde el año 2014 al año 2020 según Vista Proppants And Logistics Inc (2018), las referencias bombeadas en los pozos tienden a ser de granulometrías más finas entre 40/70 y 100 Mesh ya que ofrecen una mejor resistencia a la compresión y se pueden producir en mayores proporciones lo que las operadoras petroleras como clientes necesitan, esto dando como resultado una mayor eficiencia en temas económicos y temporales. Lo que se puede relacionar con los hallazgos de este estudio.

En la Figura 15 se observa el análisis de las principales compañías mapeadas en el mercado del Frac Sand a nivel global. A su vez, se determina cual es la calidad del material que ofrece cada una de las empresas y como se estima la tendencia de éstas para un periodo entre los años 2021 y 2025. Se puede observar que la calidad “White Sand” reduce la proporción de aparición en el mercado hacia el último año de prospección, esto relacionado con el disparador que tiene la industria de los hidrocarburos sobre reducir los costos del agente de sostén en la elaboración de pozos no convencionales. Canadá es un participante que ofrece únicamente calidad “White Sand” en su producto, China ofrece las calidades “White Sand y Resin Coated Sand” con el fin de suplir las altas profundidades de los pozos que sus clientes solicitan y Argentina ofrece calidad “Brown Sand” a sus pozos locales con el fin de garantizar la demanda del país y disminuir costos de importación del insumo desde otros países.

## **7.2. Matriz de vigilancia para el mercado del Frac Sand a nivel internacional**

La vigilancia estratégica exhibe la diferencia que existe entre un mercado consolidado como el de los Estados Unidos, con respecto al argentino que es pionero a nivel regional, desde el número de compañías presentes en cada país, la producción de Frac Sand y hasta las tecnologías patentadas que manejan las empresas muestran la enorme brecha de desarrollo.

Se observan que las tendencias globales de los productos están directamente relacionadas a la demanda del sector de los yacimientos no convencionales, ya que como se mencionó anteriormente, es clara la tendencia hacia el uso de referencias 40/70 y 100 mesh. La calidad “Brown Sand”, está marcando una tendencia disruptiva en el mercado, las “White Sand” y las “Resin Coated Sand” aún se utilizan para casos más puntuales en los pozos, como algunas arenas resinadas para presiones muy elevadas por la profundidad a la que hace el fracturamiento hidráulico, sin permitir el reflujo del material cuando hay cambios de presión en el pozo.

La geología tiene una influencia importante en las calidades obtenidas por las compañías. En Estados Unidos las arenas White Sand se extraen hacia el norte del país, en Formaciones como St. Peters o Wonewoc que debido a su génesis y ambiente de formación los granos de cuarzo monocristalino tienen unas mejores características como la resistencia a la compresión y el contenido de cuarzo de casi el 99%. Mientras que las “Brown Sand” se extraen de Formaciones regionales al sur en Texas, el origen de estas unidades hace que las arenas presenten cuarzo policristalino y una menor resistencia a la compresión.

En Argentina, que es una referencia importante para el desarrollo de un futuro mercado colombiano, la calidad que domina es la Brown Sand que se extrae de ambientes fluviales, la mayoría de las compañías la ofrecen; solamente de las empresas mapeadas el Grupo Masur que es distribuidor Badger Mining Corp. (EE. UU.) ofrece la calidad White Sand.

Hay que destacar que en Colombia aún no se está haciendo fracturamiento hidráulico a gran escala, pero el Ministerio de Minas y Energía en el Decreto 328 de 2020 permitió la implementación de pilotos de investigación de este método de extracción. Esto se convierte

en una oportunidad para que se desarrollen investigaciones aplicadas al Frac Sand a nivel local.

Las normativas que regulan las especificaciones técnicas del Frac Sand como la ISO 13503-2 y la API 19C aunque fueron desarrolladas para depósitos en otros países, deberían ser adoptadas como un guía para la evaluación de las arenas en Colombia. Las leyes relacionadas a la salud y seguridad en el trabajo son establecidas por las entidades gubernamentales de cada país, es importante que las compañías las implementen para así disminuir los riesgos ocupacionales como la silicosis.

El covid-19 impactó negativamente la demanda mundial de petróleo, si se compara el primer cuatrimestre de 2019 con el del 2020 la demanda cayó un 57%, debido al efecto de las medidas que se tomaron en contra de la pandemia como las restricciones a la movilidad y los confinamientos establecidos por los países (Domenichini et al., 2020). No obstante, el mercado del Frac Sand se vió afectado de igual manera al tener una relación directa con la industria de los hidrocarburos.

### **7.3. Brechas tecnológicas identificadas para el mercado de Frac Sand en Colombia**

Con respecto a los resultados obtenidos se identifica que Colombia presenta muy poca información sobre la factibilidad técnica depósitos de arenas silíceas para uso como Frac Sand (Herazo & Lora, 2020; Toncel, 2013) y las calidades que puedan encontrarse. Esto genera un vacío de conocimiento que pone la situación del mercado local por debajo de la referencia regional que es Argentina, e impide estimar los volúmenes de producción del material que cumplan con la demanda de los proyectos piloto actuales o el posible mercado futuro.

Por otra parte, la inexistencia de laboratorios que certifiquen los productos respecto a la norma ISO 13503-2 y API 19C no permite un avance constante para el mercado nacional ya que se hace necesario hacerle un seguimiento constante a las muestras de arena silícea con el fin de que se determine si las especificaciones técnicas cumplen con los requerimientos de uso. En la actualidad, se debe recurrir a laboratorios por fuera del país para obtener este tipo de ensayos lo que se traduce para los investigadores en un aumento de costos de investigación, tiempos de espera y complejos logísticos de análisis más complejos. Por lo anterior, se establece que este factor representa la brecha tecnológica de mayor interés para ser intervenida a corto plazo, debido a que es crítico para apoyo a los proyectos presentes y futuros del país.

El conocimiento geológico relacionado a la prospección de depósitos de arenas silíceas para uso como Frac Sand es una brecha identificada, que por medio de investigación científica aplicada con alianzas entre la academia y la industria de los hidrocarburos se podría disminuir el vacío de información a corto plazo. Un ejemplo de esto son las alianzas que tiene la compañía Superior Silica Sands con el Servicio Geológico de los estados unidos (USGS),

para determinar el impacto de la minería en el agua subterránea y con la Universidad de Wisconsin para las técnicas de remediación del suelo debido a las plantas de procesamiento.

Así mismo, existen brechas tecnológicas asociadas al largo plazo en este estudio como lo son las actividades relacionadas a la logística de la cadena de valor del Frac Sand, específicamente la última milla y el almacenamiento. Para lograr tener una buena utilidad las empresas proveedoras de este material a nivel internacional poseen un sistema entre automatizado o semiautomatizado que permite disminuir costos en la producción y brindar a los clientes la eficacia de entrega que necesitan, para esto se requieren flotas de camiones, unidades de carga especiales y vías en buen estado. En Colombia la demanda de los camiones se encuentra hacia otros sectores de mercado, en este caso sería un costo muy elevado de este elemento si la compañía no cuenta con flota propia.

Las vías en Colombia por su flujo y estado actual pueden dificultar los tiempos de entrega desde una planta de procesamiento hasta las cuencas productoras de hidrocarburos con fracturamiento hidráulico. En cuestión de las unidades de almacenamiento en los países de referencia se utilizan silos con capacidad de centenares a miles toneladas que aseguran que la arena no se contamine de otras partículas y evita la generación de partículas de sílice en suspensión peligrosas para salud. En Colombia si se da el mercado de Frac Sand a largo plazo deben tenerse en cuenta los dos elementos referidos para lograr un crecimiento exitoso y un desarrollo del producto óptimo.

La propuesta de ruta de validación experimental de una muestra de arena silíceas colombiana para ser usada como Frac Sand, permite identificar la brecha tecnológica que existe a corto plazo mencionada anteriormente, la ausencia de laboratorios que certifiquen las normas ISO 13503-2 y API 19C para garantizar las especificaciones tendencias de los agentes de sostén naturales. De ese modo, para construir un laboratorio en Colombia se debería tener en cuenta que estén disponibles todos los equipos que se requieren para las pruebas de las normas, que exista logística interna que permita una metodología en corto tiempo que permita entregas al cliente rápidamente, establecer un punto de localización estratégico preferiblemente cercano a las principales capitales del país o a las minas de extracción de las compañías, contar con personal técnico capacitado que tenga conocimiento industrial del Frac Sand y generar alianzas con las instituciones académicas para investigaciones aplicadas a productos que permitan un avance en el desarrollo de las especificaciones técnicas

## **8. Conclusiones**

En Colombia actualmente existen brechas tecnológicas en el mercado de Frac Sand, existe muy poca información sobre la factibilidad técnica depósitos de arenas silíceas con prospección de uso para Frac Sand, un vacío de conocimiento que pone el mercado nacional por debajo del país referencia en la región que es Argentina, y además no permite estimar los volúmenes de producción del material en Colombia que suplan la demanda de los proyectos

piloto de fracturamiento hidráulico en el presente y un posible mercado de Frac Sand en el futuro.

En Colombia hay inexistencia de laboratorios que certifiquen los productos respecto a la norma ISO 13503-2 y API 19C, esto no hace posible que el mercado nacional avance en su desarrollo pues se debe actualmente usar laboratorios en el exterior que involucran mayores costos, tiempos de espera y logística compleja. Por lo cual, se establece que los laboratorios certificados representan la brecha tecnológica de mayor interés para ser intervenida a corto plazo, debido a que es crítico para apoyo a los proyectos presentes y futuros del país.

El mercado del Frac Sand en Colombia al compararse a nivel regional (Latinoamérica) presenta cinco brechas tecnológicas las cuales son, la investigación restringida de depósitos potenciales, el desconocimiento de la calidad en las que se clasifican arenas locales (White Sand y Brown Sand), la logística de transporte, la infraestructura y la que se definió más determinante a corto plazo, la falta de laboratorios certificados con las normas ISO 13503-2 y API 19C.

El Frac Sand como agente de sostén tiene una prospección de uso del 95% para los próximos años con respecto a otras opciones, por lo cual en el país con el desarrollo del fracturamiento hidráulico será un mercado muy apetecido por las empresas petroleras para disminuir costos en la elaboración de los pozos no convencionales.

Las calidades de Frac Sand proyectadas con mayor porcentaje de uso son las “Brown Sand” por encima de las “White Sand y las Resin Coated Sand” por temas de un costo menor e igual funcionamiento en el pozo.

Las referencias de Frac Sand con mayor tendencia de demanda para los próximos años son las finas, de mallas 40/70 y 70/140 debido al mejor rendimiento en las plantas de procesamiento que ofrecen a las empresas proveedoras un menor costo de producción y a las empresas operadoras una disminución en el costo de compra del producto.

El principal actor del mercado del Frac Sand en el mundo es Estados Unidos, las compañías revisadas suman una producción aproximada de 73,71 Mt/Año.

El actor más importante de la región latinoamericana es Argentina que según las compañías revisadas suma un aproximado de producción de 3,6 Mt/Año, es menor que la producción de Estados Unidos, pero es un mercado en crecimiento que actualmente se encuentra realizando investigación aplicada e innovación con el fin de lograr cerrar las brechas existentes con el referente mundial.

Colombia se encuentra en estado de investigación aplicada de material Frac Sand como insumo para el sistema de hidrocarburos no convencional y aún no existe mercado establecido para ello.

La ruta de validación experimental para una muestra de arena silíceas colombiana para uso como Frac Sand requiere las etapas de: determinación de cuáles son las tendencias de productos a investigar, prospección y exploración teniendo en cuenta variables como ambientes de formación y composición mineralógica, uso de laboratorio certificado con las normas ISO 13503-2 y API 19C para aprobación de calidad en procesos y para aprobación de calidad del producto final, selección de depósitos según las calidades que ofrecen y la cercanía a los pozos de aplicación, explotación en relación a la extracción y procesamiento del recurso mineral y la etapa de última milla para determinar el proceso logístico de entrega al cliente.

Las metodologías que se aplicaron en el trabajo tienen un valor para el análisis de la viabilidad técnica, comercial y tecnológica del mercado del Frac Sand a nivel nacional. La HRT permitió identificar las tendencias del mercado a cinco años, y visionar cuáles de las compañías mapeadas se convertirían en participantes importantes, fue una herramienta de prospección a futuro sobre como funcionaria lo relacionado con el Frac Sand en el mundo. De otro modo, la vigilancia estratégica y el TRL fueron herramientas que nos dieron la posibilidad de revisar actualmente cómo funciona el Frac Sand a nivel global y compararlo con la situación colombiana, fundamental para analizar brechas tecnológicas presentes.

## **9. Recomendaciones**

Se recomienda para trabajos futuros la realización de estudios de zonificación de depósitos prospectivos para Frac Sand con estimación de volúmenes en Colombia, teniendo en cuenta los aspectos descritos en este trabajo.

Se puede presentar para investigaciones posteriores la aplicación de las normas ISO 13503-2 y API 19C a muestras diferentes calidades de Frac Sand que ofrezcan los depósitos locales.

Se aconseja a las empresas operadoras de petróleo que actualmente hacen parte de los proyectos piloto de fracturamiento hidráulico en el país, que determinen un interés para el Frac Sand local como agente de sostén.

Se sugiere para futuros trabajos actualizar los resultados obtenidos para la HRT y la matriz de vigilancia estratégica, debido a que continuamente el mercado cambia y se debe tener información actualizada.

Se recomienda para próximos estudios que se consulten a detalle patentes de procesamiento mineral de las arenas silíceas para Frac Sand que permitan una toma de decisiones a nivel industrial de las compañías.

Como lección aprendida de este trabajo, los informes de mercado de Frac Sand y la información técnica de los productos que ofrecen las compañías es difícil de obtener, por lo tanto, no se tiene una mayor cantidad de empresas revisadas.

## 10. Referencias bibliográficas

- Abú-Shams, K., Abú-Shams, K., Fanlo, P., & Lorente, M. P. (2005). Silicosis. *Suplemento 1 Camino. Pamplona. An. Sist. Sanit. Navar*, 28, 83–89.
- Barreto, N. (2016). *PANORAMA ACTUAL DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LOS PROCESOS E IMPACTOS AMBIENTALES RECOPIADOS DE ALGUNAS EXPERIENCIAS EN ESTADOS UNIDOS Y ARGENTINA*. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA.
- Bauer, J. A. (2010). *Conodonts and Conodont Biostratigraphy of the Joins and Oil Creek Formations, Oklahoma Geological Survey*.
- Benson, M. E., & Wilson, A. B. (2015). *Frac Sand in the United States — A Geological and Frac Sand in the United States — Reporte*.
- Blair, T., & McPherson, J. (1999). Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1), 6–19.
- Brown, B. (2012). *Frac sand in Wisconsin*.
- Campos, V. P. P. de, Sansone, E. C., & Silva, G. F. B. L. e. (2018). Hydraulic fracturing proppants. *Cerâmica*, 64(370), 219–229. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702219>
- Carhuapoma, G., Marchena Gil, J. B., Quispe Ocorima, G., & Dilas Ubaldo, D. (2014). *Cadena de valor y ventaja competitiva para una empresa minero-metalúrgica* [Universidad Nacional de Ingeniería]. [https://www.academia.edu/9273085/Cadena\\_de\\_valor\\_y\\_ventaja\\_competitiva\\_para\\_una\\_empresa\\_minero-metalurgica](https://www.academia.edu/9273085/Cadena_de_valor_y_ventaja_competitiva_para_una_empresa_minero-metalurgica)
- Castro, J. W., & Acero, N. J. (2019). Lineamientos para la elaboración de estudios de vigilancia estratégica e inteligencia competitiva. *Editorial Neogranadina*.
- Castro, S. (2007). *Guía práctica de vigilancia estratégica*. [www.anain.com](http://www.anain.com)
- Chongqing Changjiang River Moulding Material Group. (2021). *Company Profile*. <http://www.ccrmm.com.cn/english/view.php?id=1>
- Coca, P., Ana, G., Santos, D., & Fernández, A. (2010). *GUÍA DE VIGILANCIA ESTRATÉGICA PROYECTO CENTINELA: VIGILANCIA ESTRATÉGICA AL ALCANCE DE LAS EMPRESAS ASTURIANAS*. [www.mglab.es](http://www.mglab.es)
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales. (2018). *Estándar Colombiano para el reporte publico de resultados de exploración, recursos y reservas minerales - ECRR*.
- DeNoyer, B., & Owen, J. (2019). An Analysis Of Fine-mesh Proppant . *Hart Energy*. <https://www.hartenergy.com/exclusives/analysis-fine-mesh-proppant-182211>
- Departamento administrativo de ciencia tecnologia e innovación. (2017). *2ª CONVOCATORIA ECOSISTEMA CIENTÍFICO PARA LA FINANCIACIÓN DE PROGRAMAS DE I+D+i QUE*

*CONTRIBUYAN AL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LAS INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR COLOMBIANAS.*

- Department of Mineral Resources of South Africa. (2014). *Taking SA Mining to 2030 through Resourceful Collaboration. A Technology Innovation Roadmap for the South African Minerals Industry.*
- Domenichini, F., Mutti, F., & Olivero, M. (2020). *Impacto del COVID-19 en la demanda mundial de petróleo.* Universidad Nacional de San Martín.
- Duque Grisales, C. S. (2013). *Elaboración de la ficha técnica de los productos de la empresa G.M.P PRODUCTOS QUIMICOS S.A. Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero de Alimentos.*
- Elizabeth, M., & Waitt, C. (1969). *DESERT DUNES OF ~HE KERMIT SANDHILLS, WINKLER COUNTY, TEXAS.*
- Energy, F. (2018). *History , Sampling , Porosity and Permeability Testing of Salem Limestone , Oriskany Sandstone and Marcellus Shale.* August. <https://doi.org/10.18141/1465140>.An
- Escamilla Cabrera, E. E. (2017). *Plan de Negocios Producción y comercialización de Proppant Argentino Ultra Liviano Master in Business Administration Plan de Negocios Producción y comercialización de Proppant Argentino Ultra Liviano Mentor :*
- European Network of Mining Regions. (2006). *Towards a Roadmap for European Mining Regions.* [http://www.interreg4c.eu/uploads/%0Amedia/pdf/5\\_ENMR\\_Roadmap.pdf%0A](http://www.interreg4c.eu/uploads/%0Amedia/pdf/5_ENMR_Roadmap.pdf%0A)
- Ferrer Deheza, T., & Montamat, G. (2018). *ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DEL DESARROLLO DEL MERCADO DE PROPPANT EN LA ARGENTINA.* Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- Fierro Morales, J. (2019). Fracking viene de fractura. In *La inviabilidad del fracking frente a los retos del siglo XXI.*
- Fundación Chile. (2016). *Desde el cobre a la innovación. Roadmap tecnológico 2015-2035. [en línea]. Santiago, Chile. Ministerio de Minería; CORFO.* <https://www.dii.uchile.cl/wp-content/uploads/2016/05/Roadmap.pdf>
- Garcés Carreño, L. D., Duarte Duarte, J. B., Garavito Hernández, E. A., Mateus Tarazona, D. C., & Pérez Carrillo, E. R. (2016). Evaluación De Alternativas De Costo Para El Suministro De Propantes a Un Yacimiento No Convencional En Colombia. *Revista Fuentes El Reventón Energético, 14(1), 53–66.* <https://doi.org/10.18273/revfue.v14n1-2016005>
- García Maya, J. C. (2015). *CARACTERIZACIÓN DE UN CUERPO SEDIMENTARIO PARA SU UTILIZACIÓN COMO ARENA DE HIDROFRACTURAMIENTO, FRAC SAND.* UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Giglio, M. (2018). Actualidad de los agentes de sostén. *Petrotecnia, 26–35.*
- HartEnergy. (2018). *Sand demand. As operators push the envelope on lateral lengths and completion intensity, sand rises as both a star player and potential bottleneck.* (Issue August).

- Héder, M. (2017). From NASA to EU: The evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. *Innovation Journal*, 22(2).
- Herazo German, T. D., & Lora Montiel, A. V. (2020). *DEFINICIÓN DE LOS RECURSOS MINERALES EN EL DEPÓSITO DE ARENAS SILÍCEAS EN EBÉJICO, ANTIOQUIA, COLOMBIA*. Universidad EAFIT.
- Hobday, D. K., Norton, R. A., & Collins, E. D. (1980). The Queen City Formation in the east Texas embayment: a depositional record of riverine, tidal and wave interaction. *University of Texas, Bureau of Economic Geology, Geological Circular*, 80(4).
- Instituto Tecnológico de Aragón. (2015). *METODOLOGÍA RUTAS TECNOLÓGICAS PARA EMPRESAS TIC. 1*.
- Jaramillo Mora, M. G. (2015). *Retos y propuestas para mantener los flujos de inversión en petróleo*.
- Kostelnik, J., & Carter, K. M. (2009). Unraveling the stratigraphy of the Oriskany Sandstone: A necessity in assessing its site-specific carbon sequestration potential. *Environmental Geosciences*, 16(4), 187–200. <https://doi.org/10.1306/eg.04210909005>
- Le Capitaine, S., & Carlson, C. (n.d.). Argentina Looks for Frac Sand to Reduce Shale Drilling Costs. *FEECO International*. Retrieved October 13, 2021, from <https://feeco.com/argentina-looks-for-frac-sand-to-reduce-shale-drilling-costs/>
- Liang, F., Sayed, M., Al-Muntasheri, G. A., Chang, F. F., & Li, L. (2016). A comprehensive review on proppant technologies. *Petroleum*, 2(1), 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.11.001>
- Locke, C. (2015). Frac sand mines are preferentially sited in unzoned rural areas. *PLoS ONE*, 10(7). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0131386>
- Losa, G., & Pruscino, A. (2016). *MANEJO DE AGENTE SOSTEN EN LA EXPLOTACIÓN DE NO CONVENCIONALES EN LA CUENCA NEUQUINA*. Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA).
- Martínez Cruz, F. R., Perilla Castañeda, C. M., & Urquijo Vanegas, J. D. (2019). Fracking viabilidad económica y ambiental en Colombia. *Econografos Escuela de Economía*, 133, 1–34.
- Menga, M., & Solsona, M. N. (2019). Panorama de mercado de rocas y minerales industriales- Arenas para Fracking. In *Dirección de Gestión de Servicios y Prestaciones Complementarias*.
- Decreto Número 328 del 28 de febrero de 2020, "Por el cual se fijan lineamientos para adelantar Proyectos Piloto de Investigación Integral -PPI/ sobre Yacimientos No Convencionales - YNC de hidrocarburos con la utilización de la técnica de Fracturamiento Hidráulico Multietapa con Perforación Horizont (2020).
- Ley 1562 de 2012, (2012). Congreso de La República de Colombia.
- Decreto 1072 de 2015, Republica de Colombia 326 (2015). <http://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/0/DUR>

Sector+Trabajo+Actualizado+a+15+de+abril+de+2016.pdf/a32b1dcf-7a4e-8a37-ac16-c121928719c8%0Ahttp://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/50711/DUR+Sector+Trabajo+Actualizado+a+Abril+de+2017.pdf/1f52e341-

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Hoja de Ruta para la gestión sostenible de Materias Primas Minerales*.
- National Mining Association, & (U.S.) Department of Energy. (2000). *Mining Industry of the Future: Mineral Processing Technology Roadmap*. September.
- Navazo, C. (2021). Los desafíos de la arena rionegrina para llegar a Vaca Muerta. *MÁS ENERGÍA*. <https://mase.lmneuquen.com/arena/los-desafios-la-arena-rionegrina-llegar-vaca-muerta-n795383>
- OSHA. (2010). *Exposición de los trabajadores a la sílice al realizar operaciones de fracturación hidráulica*. 6742, 1–8. [https://www.osha.gov/Publications/OSHA\\_HA-3567.pdf](https://www.osha.gov/Publications/OSHA_HA-3567.pdf)
- Patri, R., Tokatlian, Á., Villegas, J. M., Courrèges, A., & Bottaro, M. (2018). *Instalación de una planta de procesamiento de arena de sílice para la extracción de shale gas y shale oil*. <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1691>
- Pearsons, T., & Mackin, M. (2020). Technology Readiness Assessment Guide: Best Practices for Evaluating the Readiness of Technology for Use in Acquisition Programs and Projects. *US Government Accountability Office Washington United States, January*. <https://www.gao.gov/assets/680/679006.pdf>
- Peñaranda, V. F. (2014). Arenas más allá del acatamiento a las normas. *Petrotecnia, Junio*, 66–81.
- Phaal, R., Farrukh, C., & Probert, D. (2006). Technology Roadmapping: linking technology resources to business objectives. *Novel*, 39(3), 338–360. <https://doi.org/10.1215/ddnov.039030337>
- Plint, A. G., Krawetz, J. R., Buckley, R. A., Vannelli, K. M., & Walaszczyk, I. (2018). Tectonic, eustatic and climatic controls on marginal-marine sedimentation across a flexural depocentre: Paddy Member of Peace River Formation (Late Albian), Western Canada Foreland Basin. *The Depositional Record*, 4(1), 4–58. <https://doi.org/10.1002/dep2.37>
- Porter, M. E. (2002). *Ventaja competitiva : creación y sostenimiento de un desempeño superior*. Compañía Editorial Continental.
- Quintero, J., & Sánchez, J. (1997). *La cadena de valor: Una herramienta del pensamiento estratégico The Value Chain: A Strategic Thought Tool*. 8(3), 377–389.
- Rios Roca, A. (2020). *Fracking in Latin America – utopia or reality? | Gas Energy Latin America*. [https://www.gasenergyla.com/fracking-in-latin-america-utopia-or-reality\\_for\\_alvaro\\_rios\\_roca/](https://www.gasenergyla.com/fracking-in-latin-america-utopia-or-reality_for_alvaro_rios_roca/)
- Roach, E. (2014). Proppant: The Greatest Oilfield Innovation of the 21st Century. *ENVERUS*. <https://www.enverus.com/blog/proppant-the-greatest-oilfield-innovation/>
- Rodriguez, E. (2021). *Frac Sand Estadísticas de crecimiento del mercado 2021 Tendencia global*,

*tamaño de la industria, participación, estrategias comerciales, tecnología emergente, cartera de productos, datos de países, estado de la demanda y pronóstico 2026 .*

<http://obregondigital.mx/2021/09/05/frac-sand-estadisticas-de-crecimiento-del-mercado-2021-tendencia-global-tamano-de-la-industria-participacion-estrategias-comerciales-tecnologia-emergente-cartera-de-productos-datos-de-paises-es-4/>

Rose, A. De, Buna, M., Strazza, C., Olivieri, N. N., Stevens, T., Peeters, L., Tawil-Jamault, D., De Rose, A., Buna, M., Strazza, C., Olivieri, N. N., Stevens, T., Leen, P., & Daniel, T.-J. (2017). Technology Readiness Level : Guidance Principles for Renewable Energy technologies. In *Eur 27988 En*. <https://www.gransking.fo/media/2900/trl-orka.pdf>

Secretaría de Política Mínera Ministerio de Producción de Argentina. (2017). *PANORAMA DE MERCADO DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES ARENAS PARA FRACKING*.

Serrano Serrano, D., Pineda Gómez, C., Corzo Rueda, R., & Castillo Núñez, R. (2013). Implementación de propanes ultralivianos en el fracturamiento hidráulico de pozos. *Fuentes: El Reventón Energético, 11(1)*, 1.

SPETSERIS, J. J. (1985). DEPOSITIONAL ENVIRONMENT OF THE QUEEN CITY FORMATION (EOCENE) IN THE HAGIST RANCH FIELD, DUVAL AND McMULLEN COUNTIES, TEXAS. *Habitat of Oil and Gas in the Gulf Coast*. <https://doi.org/10.5724/GCS.85.04.0209>

Toncel Hernández, E. A. (2013). *FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIAL PROPANTE, BASE ARENA NATURAL, UTILIZADO EN EL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN COLOMBIA*. Universidad Industrial de Santander UIS.

Transporte Rada Tilly S.A. (2014). *INFORME AMBIENTAL DEL PROYECTO Planta de Procesamiento de Arenas Silíceas*.

Universidad de Jaén. (n.d.). *FICHA DE SEGURIDAD*.

Vista Proppants And Logistics Inc. (2018). *FORM S-1.REGISTRATION STATEMENT UNDER THE SECURITIES ACT OF 1933. Vista Proppants and Logistics Inc*. [https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1713854/000119312518010066/d498363ds1.htm#rom498363\\_14](https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1713854/000119312518010066/d498363ds1.htm#rom498363_14)

Weijers, L., Fisher, K., & Weddle, P. (2019). Data Illustrates Evolution Of Fracturing Designs In Resource Plays. *The American Oil & Gas Reporter*. <https://www.aogr.com/magazine/cover-story/data-illustrates-evolution-of-fracturing-designs-in-resource-plays>

Wise, M. (2014). *Queen City and Sparta Aquifers, Atascosa and McMullen Counties, Texas: Structure and Brackish Groundwater*. May.

Wiseman, P. (2019). Shifting Sands. *Revista Permian Basin Oil and Gas*. <https://pboilandgasmagazine.com/shifting-sands/>

## **11. Anexos**

Los anexos del proyecto se adjuntarán en conjunto con este documento para la entrega final, la siguiente es la lista de anexos con su respectivo formato:

- Anexo 1: Hoja de Ruta Tecnológica para el mercado del Frac Sand a nivel internacional.
- Anexo 2: Matriz de vigilancia estratégica para el mercado del Frac Sand a nivel internacional.