

Resumen

Las arenas silíceas son la principal materia prima en la fabricación de vidrio. Las características y tipo de depósito, su mineralogía y composición, entre otras características son condicionantes de la calidad para todo tipo de vidrio. Para lograr la máxima transparencia en el vidrio, se requiere una composición particular en la que la cantidad de óxido de hierro sea extremadamente baja. De acuerdo al análisis realizado en este trabajo sobre la disponibilidad de arenas con bajo contenido de hierro se concluye que ninguno de los depósitos existentes en Argentina puede proveer arena apta para su uso en la fabricación de vidrio, sin procesamiento. A pesar de ello, el depósito de Diamante, Entre Ríos, es considerado el más apropiado debido a tener un bajo contenido de hierro y además, está relativamente cerca de Buenos Aires, donde se encuentra concentrada la fabricación de vidrio. En este caso se recomendaría como método más apropiado la lixiviación con ácido oxálico, aunque de mayor costo, tiene la ventaja de la fotodegradación de los efluentes del proceso no ocasionarían un eventual problema de contaminación. La evaluación entre diferentes depósitos argentinos de arenas silíceas y métodos para reducir la cantidad de hierro en este tipo de arena, indican que la lixiviación con ácido oxálico de las arenas del depósito de Diamante podría ser competitiva si se las compara con las arenas importadas que cumplen con las especificaciones técnicas. Esto sería posible considerando una producción a largo plazo con un consumo de 11,500 toneladas de arena silícea por año, con un costo por tonelada de \$21,40.

Abstract

Silica sand is the main raw material involved in the glass production. The characteristics, its mineralogy and chemical composition, among other conditioning for the quality for every type of glass. A composition is necessary to achieve the maximum glass transparency where the amount of iron oxides is extremely low. Considering the analysis, silica sand deposit from Argentina meets the technical specifications for clear glass production in a float furnaces, without processing. Although this assumption, the Diamante silica sand deposit, Entre Rio Province is considered the most suitable due to its low iron content as located at relatively short distance from Buenos Aires where glass manufacturing is concentrated. In this case, leaching with oxalic acid would be recommended as the most appropriate method, which, although more expensive, has the advantage of photodegradation, minimizing an eventual environmental contamination problem. Evaluating among different silica sand argentine deposits and methods to reduce the amount of iron in the silica sand, the oxalic acid leaching of the Diamante silica sands could be competitive compared to imported sands which meet the technical specifications requirements. This would be possible if a long term production with a consumption of 10,500 siliceous sand per year is considered, with a cost of per ton U \$S 121, 40.

Índice

1.	Introducción	6
1.1.	El vidrio	6
1.1.1.	Clasificación de los vidrios	8
1.1.2.	Vidrios extraclaros	13
1.2.	Las materias primas para la fabricación de vidrio	15
1.2.1.	Materias primas para la incorporación de sio	15
1.2.2.	Boratos	18
1.2.3.	Materias primas de los fundentes y estabilizantes	18
2.	Objetivos	21
2.1.	Objetivos específicos	21
3.	Materiales y método	22
4.	Depósitos de arena silícea	23
4.1.	Características generales	23
4.2.	Depósitos en la argentina	25
4.2.1.	Ubicación de los principales depósitos y características	25
5.	Proceso de explotación de depósitos de arena silícea	35
5.1.	Desarrollo de la explotación	35
6.	Procesamiento de arena para la fabricación de vidrio	37
6.1.	Generalidades	37
6.2.	Procesos de clasificación	37
6.2.1.	Separación de fracciones gruesas	37
6.2.2.	Separación de fracciones finas: eliminación de arcillas	38
6.3.	Procesos de purificación	39
6.3.1.	Procesos de concentración gravitacional	39
6.3.2.	Procesos de separación magnética	42
6.3.3.	Procesos de purificación por flotación espumante	44
6.3.4.	Procesos de purificación por lixiviación ácida	45
6.4.	Plantas productoras de arena para vidrio extraclaro: los procesos utilizados en el mundo	52
7.	La industria de las arenas silíceas y del vidrio en la argentina	55
7.1.	Proveedores de arenas para vidrios	55
7.2.	Fabricantes de vidrio	57
7.2.1.	Empresas sideriarias en argentina	57

7.2.2. Empresas que fabrican vidrio incoloro y extraclaro	61
8. Mercado de las arenas silíceas	62
8.1. Escala global	62
8.3. Intercambio comercial	66
8.3.2. Importación	67
8.3.3. Exportación	68
8.3.4. Balanza comercial	68
9. Aspectos legales	70
9.2. Aspectos ambientales de la legislación vigente	72
10. La producción y uso de arenas silíceas dentro de la economía circular	74
10.1. Generalidades	74
10.2. Reciclado de casco de vidrio	74
10.3. Impacto del vidrio reciclado en el cambio de composición del horno	77
11. Discusión y recomendaciones	79
11.1. Evaluación de cantidades anuales a producir y a consumir	79
11.2. Evaluación de los depósitos de arenas silíceas existentes en Argentina para la producción de vidrio extraclaro	80
11.3. Consideraciones sobre el procesamiento de arenas silíceas de los depósitos de entre ríos para la producción de vidrio extraclaro	81
11.3.1. Elección del depósito	81
11.3.2. Elección de procesamiento	81
11.3.3. Consideraciones económicas de la elección	82
12. Conclusiones	86
13. Agradecimientos	87
14. Anexos	88
14.1. Descripción del medio natural de la provincia de Entre Ríos	88
14.2. Implicancias ambientales de la explotación y tareas de restauración	94
14.3. Seguridad e higiene: desde la extracción al uso de las arenas silíceas	98
14. BIBLIOGRAFÍA	99
Referencias web	102

1. INTRODUCCIÓN

Las especificaciones para vidrio incoloro en Argentina han variado a lo largo de los años, exigiendo cada vez niveles más bajos de hierro. La actual demanda tiene una gran limitación asociada a la calidad de la materia disponible, ya que los yacimientos de arena silíceas que tradicionalmente han abastecido a esta industria tienen un mayor contenido de hierro que el especificado en los nuevos productos.

El presente trabajo consiste en un análisis que integra los cambios geológicos de las arenas silíceas de distintos depósitos del país, sus condiciones económicas para ser utilizadas a nivel industrial y su aplicación específica en la fabricación de vidrio extraclaro.

1.1. EL VIDRIO

La palabra vidrio, en inglés *glass* y en latín *glaesum*, hace referencia a materiales transparentes. El vidrio es, por excelencia, un material lujoso y muchas veces brillante, además de tener especial durabilidad. Muchos de los usos del vidrio en el mundo moderno están asociados a aprovechar estas propiedades (Varshneya 1994). Históricamente, se ha definido al vidrio como cualquier sustancia que pueda obtenerse como sólido amorfo por enfriamiento rápido desde el estado líquido (Mari 1982). Esta definición en la actualidad es de total aplicación ya que se han desarrollado métodos para fabricar vidrios que utilizan bajas temperaturas y se puede lograr el material amorfo a través de la gelificación y posterior secado de una mezcla de óxidos metálicos (Durán 1986).

Este trabajo se desarrolla teniendo en cuenta al vidrio que se obtiene tradicionalmente por enfriamiento a una velocidad determinada de una mezcla de componentes inorgánicos o por el enfriamiento de rocas fundidas. Desde el punto de vista estructural el vidrio está constituido por (Cortés 1987)

- ° Óxidos formadores de la red vitrea, principalmente SiO_2 , pero también los hay con B_2O_3 o P_2O_5 .

- Óxidos modificadores de la red vítrea, tales como Na_2O , K_2O , CaO , MgO .
- Óxidos estabilizantes, que tienen un carácter ácido o anfótero Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

Además, otros óxidos son incorporados cumpliendo funciones secundarias como afinantes, colorantes, decolorantes, opacificantes, fluidificantes, catalizadores o nucleantes de cristalización en caso de los vitrocerámicos.

Existe una amplia variedad de vidrios que se distinguen por los óxidos que forman su matriz. El mayor volumen de producción corresponde a los vidrios sódico cálcicos que se caracterizan por la gran durabilidad química, alta resistencia eléctrica, y el amplio espectro de transmisión dentro de la región del visible. Estos vidrios están compuestos mayoritariamente por sílice y cantidades variables de principalmente Na_2O , CaO , y MgO (Rincón 2005). Luego, otros óxidos de metales y metales de transición en cantidades significativamente menores, inclusive en ppm, están presentes como impurezas de las materias primas o bien se agregan intencionalmente para determinar la composición porcentual mezcla para la fabricación de vidrio, todas las materias primas son determinantes para su fundido y calidad. La adición de sílice a la composición vítrea siempre se hace por la adición de sílice a su formulación, siendo materia prima básica para la mayor parte de los vidrios (Rincón 2005).

Para la fabricación de vidrio plano incoloro, utilizado normalmente en arquitectura, así como también en la industria automotriz, se usa arena sílicea con un contenido de hierro promedio alrededor de 1300 ppm expresado como óxido férrico, es decir, 0,13% de Fe_2O_3 (Arrospide 1999). En los últimos años la industria del vidrio se ha desarrollado adaptándose a los avances tecnológicos, a las necesidades de la sociedad y especialmente su relación con el medio ambiente. Para lograr la máxima transparencia en el vidrio, en lugar de fabricarse vidrio incoloro, se fabrica lo que se denomina vidrio *extraclaro* donde se requiere la utilización de arena con una composición particular, en la que la cantidad de hierro sea extremadamente baja, hasta lograr que en el canto del vidrio el color sea lo más blanco posible, como se suele ver normalmente en artículos de cristalería.

Este vidrio *extraclaro* se usa en decoración, mobiliario, vitrinas o exteriores, pero también en aplicaciones tecnológicas que requieran una transmisión UV perfecta, fotocopiadoras o instrumental médico (de www.lumenhaus.es)

El vidrio *extraclaro* es especialmente utilizado por su mayor transmitancia logrando hasta un 5% más que un vidrio incoloro del mismo espesor y de esta forma, ganando más energía en el interior de los ambientes.

1.1.1. Clasificación de los vidrios

La diversidad de tipos y artículos de vidrio que se fabrican y utilizan a diario y los nuevos que van surgiendo, hacen necesaria una clasificación adecuada. Naturalmente, podría haber tantas clasificaciones como criterios se establecen. En este trabajo se tomarán en cuenta tres grandes criterios de clasificación según su tecnología de fabricación según su aplicación o su uso (Marín 1982)

Existe una clasificación según la composición de los vidrios desarrollada por la Comisión Internacional de Vidrio y rescrita (Marín 1982)

En el presente trabajo se desarrollará exclusivamente la clasificación considerando los vidrios *sódico-cálcicos*.

- *Clasificación según su método de fabricación*

Vidrio por fusión: método tradicional de fabricación de vidrio es a partir de materias primas minerales las cuales contienen los óxidos que formarán la matriz del vidrio. Este método requiere temperaturas de más de 1500°C y permite fabricar vidrios de distintas formas, para variadas aplicaciones y en primera instancia, las materias primas minerales son mezcladas y fundidas en el horno donde ocurren las reacciones de los componentes y la formación de la red. Luego se disuelve el excedente de sílice sin reaccionar, evitando futuras inclusiones. A continuación, la mezcla fundida atraviesa la zona de afinado y homogenización donde son eliminadas las burbujas remanentes de las reacciones químicas. Finalmente, el vidrio se enfría a velocidad controlada para acondicionarse térmicamente y a través del proceso de

recocido. Si bien la estructura del proceso puede sufrir ciertas modificaciones en relación con el tipo de producto que se quiera fabricar, el esquema general del proceso está representado en la figura



Figura1. Esquema general de horno de vidrio (Modificado de Catálogo de productos VASA 2006/2007 2007).

Vidrio por sol Con la intención de fabricar vidrios a temperaturas más bajas se desarrolló la técnica del sol. Este proceso de fabricación de vidrio utiliza como materias primas componentes orgánicos que contienen principalmente silicio y oxígeno. Normalmente los precursores del proceso son óxidos metálicos que se mezclan con agua para generar la hidrólisis que puede o no ser catalizada, de esa manera forman los enlaces de silicio-oxígeno, a través de un proceso de secado, serán los únicos formadores de la red vítrea. A través de esta técnica se pueden generar vidrios de diferentes formas, como ser recubrimientos, piezas pequeñas o fibras. Por su composición y su método de síntesis, se desarrolló exclusivamente para vidrios sin coloración.

- *Clasificación según su aplicación*

La fabricación de vidrios puede ser adaptada según lo que se le quiere dar al material final. Rincón (2005) resume las aplicaciones haciendo referencia a la composición utilizada para cada una (Cuadro 1). En esta clasificación se descartaron tecnologías de fabricación que ya no se utilizan. La figura 2 muestra distintos vidrios según su aplicación.

Cuadro1. Clasificación de vidrios según su aplicación y composición (Modificada de Ruffino de 2005)

Tipo de vidrio según tecnología (Aplicación)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	PbO (%)	SiO ₂ (%)	B ₂ O ₃ (%)
Hueco (Botellas)	12-16	0-2	8-12	1-4	1-5		65-73	
Plano (Arquitectura/Automotriz/Tecnología)	13-14	0-1	8-9,5	4-5	0,5-1,5		70-72	
Laboratorio (Vycor, Pyrex etc.)	0,55	0,41	0,30,8	0,1-0,8	0,43,1		80-97	
Termómetros	6,5-14		0,7-7		2,5-6,2		65-76	2-12
Ópticos	1-10	6-16	0-11			0-51	41-72	2-13
Fotocrómicos	2-10	1-3,5		2-15	7-23	0-29	1-63	16-55
Soldadura	0,4-23	0,48	0,7-10	0,22	1-14,5	30-64	5-75	1-25
Fibras de vidrio	0,3-20	0,2	6,5-18	3-15	4-25	2-450	55-65	5-7,3

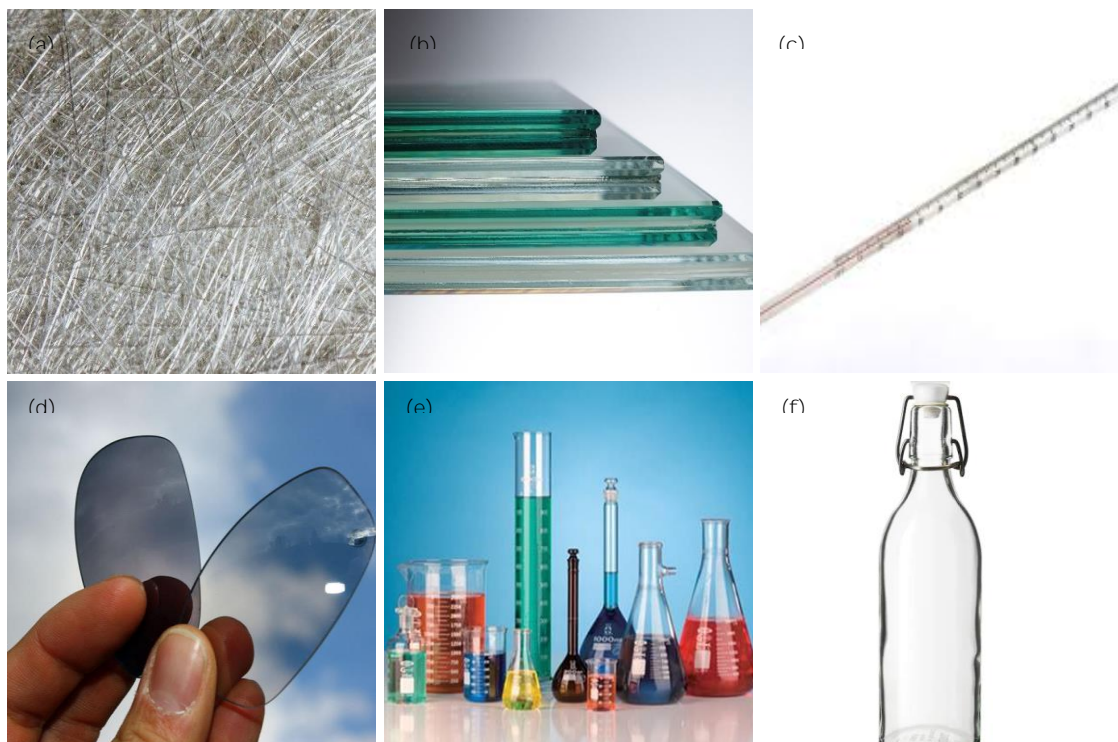


Figura 2 (a) Fibras de vidrio (Tomado de www.casositesh.com); (b) Vidrio plano (Tomado de www.vidrio.org); (c) termómetro de vidrio (Tomado de www.livew.com); (d) Vidrios fotocromáticos (Tomado de www.saludalavista.com); (e) Vidrio pyrex (Tomado de www.tripleenlace.com); (f) Botella de vidrio.

◦ *Clasificación según su color*

En la mayoría de los casos los metales y metales de transición presentes en el vidrio son los encargados de proveerle diferente tonalidad dependiendo su propiedad de translucido. La coloración se debe a la absorción de determinadas longitudes de onda en el espectro visible de estos y depende especialmente de su configuración electrónica (Varshneya 1994). El color del vidrio está estrictamente relacionado con el óxido metálico presente por el ion que está incorporado a su vez, la intensidad del color depende de su concentración. Los metales de transición más comunes que generan color en el vidrio son Cr^{2+} , Mn^{2+} , Mn^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Cu^0 o Cu^+ .

En el Cuadro 2 se clasifican los vidrios por color dependiendo del metal de transición que está incorporado en la matriz.

Cuadro 2 Clasificación de vidrios según el metal de transición incorporado (Varshneya 1994)

Ion	Color	Ion	Color
V^{5+}	Amarillo pálido	Mn^{2+}	Violeta
Cr^{6+}	Amarillo pálido	Fe^{3+}	Amarillo pálido
Ti^{3+}	Violeta	Fe^{2+}	Azul-Verde
V^{4+}	Azul	Co^{3+}	Amarillo pálido
V^{3+}	Amarillo-Verde	Co^{2+}	Azul-Rosa
Cr^{3+}	Verde	Ni^{2+}	Marro-Violeta
Cr^{2+}	Azul pálido	Cu^{2+}	Azul-Verde

El hierro en el vidrio, que está presente en la mayoría de sus materias primas minerales y en muchas ocasiones es agregado intencionalmente, existe como un equilibrio de sus dos estados de oxidación Fe^{2+} y Fe^{3+} (Fig 3). Como indica el Cuadro 2, el vidrio da una coloración azulada apenas con una baja concentración del Fe^{2+} inferior al 3%, mientras que la coloración amarilla se logra con mayores cantidades de Fe^{3+} . La cuantificación de los elementos metálicos en general en el vidrio se expresa en función a su óxido. Para el caso del hierro, que tiene dos estados de oxidación siempre está presente el ion correspondiente. Cabe señalar que hay una combinación de Fe^{2+} y Fe^{3+} .

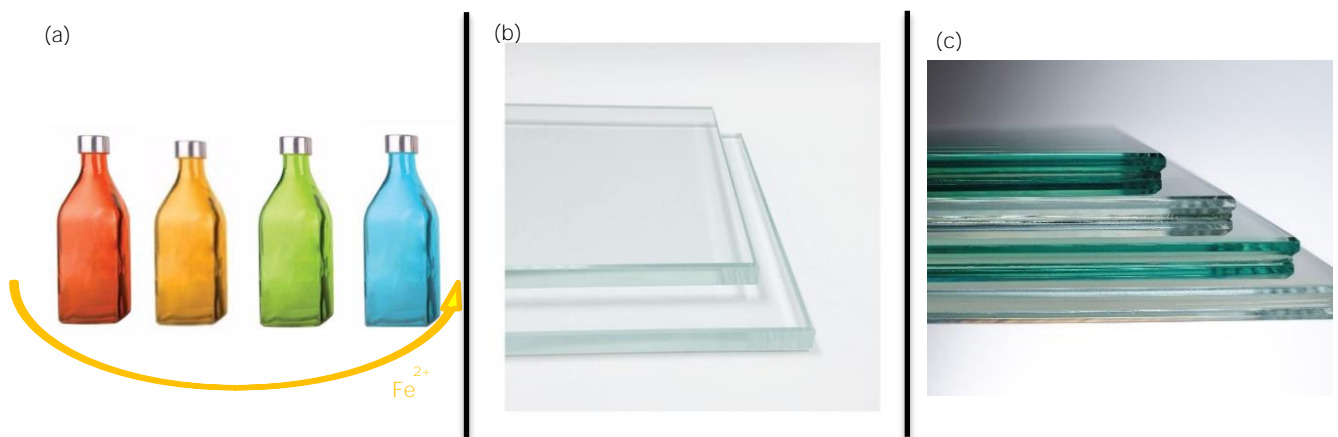


Figura3. Diferentes colores logrados con cantidades incrementales de Fe

Es por este motivo que, para mantener el estado deseado de equilibrio entre los dos estados de oxidación del hierro, es muy importante controlar la condición redox durante la formación del vidrio, de forma de obtener la transmitancia del vidrio deseada tanto en la región UV, visible como en el IR (Mirhadi y Mehdikhani 2011)

Dentro de los vidrios que se consideran sin coloración en el mercado, se realiza una clasificación en función a su contenido de hierro, expresado como Fe_2O_3 (Cuadro 3). Esta diferencia de contenido de hierro se visualiza a primera vista entre los dos tipos de vidrio por la diferencia de tonalidad, como se puede ver en la Fig. 4

Cuadro3. Clasificación de vidrio según su contenido de hierro (Valero et al 2011).

Tipo de vidrio	% Fe_2O_3
Vidrio incoloro	0,115
Vidrio extralargo	0,024

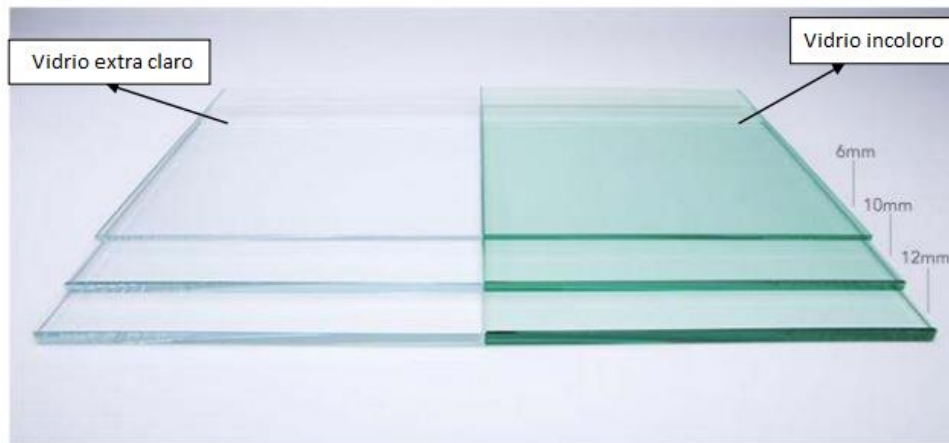


Figura 4. Vidrios planos extraclaro e incoloro de diferentes espesores (Tomado de www.varnagroup.com).

1.1.2. Vidrios extraclaros

En la industria vidriera mediana/ pequeña escala, en lugar de la arena con bajo contenido de hierro se ha utilizado cuarzo molido, que puede cumplir con las características que el mercado necesita en cuestión de cristalería. No ocurre lo mismo para la producción de vidrio extraclaro, ya que los hornos requieren un abastecimiento de gran volumen de materia prima, por lo tanto, mayor estabilidad. Con la expansión de esta industria hacia la producción de vidrio extraclaro el cuarzo molido no cubre la demanda del mercado. Por esta razón, en la última década, se ha investigado más profundamente la posibilidad de explotar yacimientos de arena silícea de bajo contenido de hierro. También se han desarrollado métodos de tratamiento, en arenas provenientes de yacimiento, para extraer la mayor cantidad de hierro posible de la arena silícea que se utiliza comúnmente para el vidrio (UPM 2018).

El vidrio extraclaro, con un cuarto del porcentaje de hierro del vidrio incoloro, provee a la lámina de vidrio plano una apariencia que lo asimila al vidrio utilizado en cristalería, es por este motivo que este tipo de vidrio se utiliza extensamente en decoración, aplicaciones arquitectónicas, mamparas de baño. Puede utilizarse también como separador de ambientes, si está disponible en forma de perfil U. Cuando se necesita potenciar el paisaje natural exterior se utilizan estos vidrios por su alta transmitancia. Stamp® , UltraWhite® o Clariton® son algunas de las marcas más conocidas con las que se comercializa el vidrio extraclaro.

A pesar de tener una composición distinta a la del vidrio incoloro, este material tiene mismas propiedades físicas y ópticas, por lo tanto, puede ser utilizado en distintos procesos como ser laminado o curvado para instalación de unidades aisladoras (Fig. 5 y 6).



Figura 5. Vidrio extraclaro doble vidriado utilizado en arquitectura (Tomado de www.lumenhaus.es).

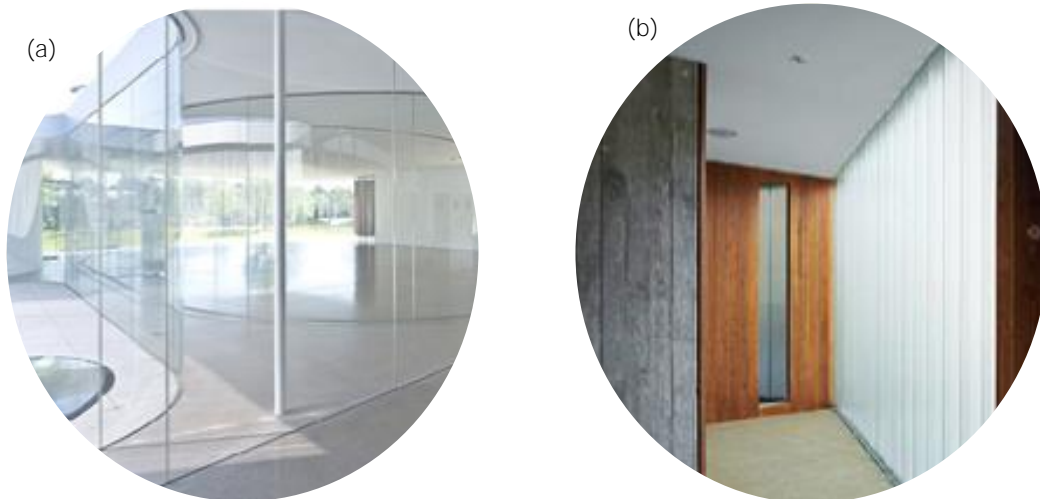


Figura 6. Vidrio extraclaro utilizado como separador de ambientes (a) Hojas de vidrio extra plano y curvado (Vidriería Argentina Sociedad Anónima, 2006/2007) (b) Vidrio extraclaro en forma de perfil (Tomado de www.gramho.com).

La reflexión de la luz del sol, en el vidrio extraclaro reduce en comparación a la de un vidrio incoloro y es debido a ello que permite el pase de luz de una forma única. Esto da lugar al uso particular de este vidrio que es para el almacenamiento de energía solar. La luz solar pasa a través del vidrio por lo cual su aprovechamiento es mucho mayor con cualquier otro material. Antireflectivo la pérdida de energía es muy baja (tomado de www.pilkington.com)

Además, a estos vidrios se les pueden hacer recubrimientos que les den propiedades fotónicas extras y de esta forma ampliar su aplicación. *Corrao et al. (2019)* han desarrollado vidrios con contenidos de partículas de elementos de tierras raras de hasta 18%, sin que el material pierda su transparencia. Estos vidrios pueden utilizarse como mejores amplificadores de la energía por las propiedades de las tierras raras.

1.2. LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE VIDRIO

La industria del vidrio exige tres requisitos fundamentales de las materias primas que utiliza (Marín 1982):

- Cantidad suficiente y suministro ininterrumpido.
- Calidad dentro de las especificaciones establecidas y de manera constante.
- Economicidad que permita mantener los costos de producción más bajos.

1.2.1. Materias primas para la incorporación de SiO_2

Tanto las arenas como el cuarzo cumplen con la función de introducir en el vidrio el componente principal, la sílice: SiO_2

La alternativa de utilizar arenas silíceas o cuarzo para la fabricación de vidrio se resuelve generalmente en favor de la primera por su facilidad de obtención y por no ser necesaria su molienda. Todo esto se traduce en menores costos. Desde el punto de vista estrictamente técnico bien se han señalado algunas aparentes diferencias entre cuarzo molido y arena referidas a su capacidad de fusión, en la que puede utilizarse una u otra indistintamente (Marín 1982)

◦ Cuarzo

En su forma más pura de mineral de cuarzo el contenido de SiO_2 puede ser de hasta 99,99%. Los vidrios producidos a partir de cuarzo se utilizan para electrónica y componentes ópticos. La característica principal del cuarzo para su utilización como materia prima de materiales es que es un material eléctrico, siendo que no conduce la corriente eléctrica pero permite la existencia del campo eléctrico.

El cuarzo es un componente primario de muchas rocas ígneas y formando grandes masas explotables en pegmatitas. En estas pegmatitas además de encontrarse grandes masas de cuarzo, principalmente en su núcleo, se encuentran también feldespatos y mica. En pegmatitas complejas, además puede encontrarse espodumeno, amblygonita, berilo, lepidolita, columbita, tantalita y topacio entre otros (UNSAM-SEGEMAR, 1999).

Si bien el cuarzo encontrado en las pegmatitas puede ser muy puro y con composiciones ideales para este vidrio, su procesamiento requiere una selección posterior a la explotación (Fig. 7). Esto implica la separación del resto de los minerales presentes y una molienda para lograr la granulometría requerida lo cual aumenta significativamente los costos.

Para producciones de cristal a pequeña escala es posible utilizarlo como materia prima para la industria del vidrio, obteniendo buenos resultados. Pero cuando la escala aumenta y se requiere más material homogéneo, pueden no ser convenientes.



Figura 7. Cuarzo blanco (Tomado de www.mineriaenlinea.com)

- Arenas

El término *arenas* es aplicado cuando las partículas tienen un tamaño entre 0,0625 y 2 mm. Estas partículas derivan de las masas rocosas preexistentes que sufren la meteorización y erosión por los agentes atmosféricos. El cuarzo es el mineral que tiene mayor resistencia a la meteorización tanto física como química, pero hay otros minerales que también pueden ser constituyentes de las arenas como los feldespatos, las micas, el granate, el circón, la ilmenita y la cromita. Los procesos naturales que sufren los sedimentos producidos durante la meteorización derivan en un proceso de clasificación natural que hay depósitos conformados casi exclusivamente de arenas de cuarzo. A estas arenas se las denomina *arenas silíceas* (UNSAM - SEGEMAR 1999)

Las arenas silíceas son la materia prima básica para la obtención de la mayor parte de los vidrios y su principal criterio para el uso es su pureza en SiO_2 (Fig. 8)

Las impurezas de las arenas introducidas durante los procesos geológicos mencionados deben ser identificadas y cuantificadas ya que pueden alterar la transparencia del vidrio fabricado, así como también provocar la generación de inclusiones por contener materiales que no se disuelven en la masa fundida. Las impurezas más críticas son la presencia de cromita y la presencia de TiO_2 o de Fe_2O_3 (Rincón 2005)

La impurificación con hierro es de primera importancia en este trabajo ya que para la realización de vidrio *extraclaro* se necesita un porcentaje de hierro muy bajo en las arenas silíceas a utilizar. Para estudiar esto se debe determinar cómo se encuentra el hierro en las arenas ya que puede estar presente en granos sueltos de otros minerales o adherido como óxido en la capa superficial alterada de los granos o también en el interior de estos (Celeda y Mari 1994)



Figura 8 Arenas silíceas (Tomado de www.elentrerios.com)

1.2.2. Boratos

Además de la sílice es posible encontrar vidrios con otras composiciones, en que el formador de red vítrea sea el óxido de boro (B_2O_3). Este óxido se encuentra en los boratos, particularmente en el bórax ($Na_2B_4O_5(OH)_4 \cdot 8H_2O$). En La Argentina se encuentran en la Puna asociados a los depósitos evaporíticos continentales. Cabe recordar que Argentina fue el cuarto productor mundial de boratos en 2018 (U.S. Geological Survey 2020) y abastece empresas locales y otros lugares del mundo.

1.2.3. Materias primas de los fundentes y estabilizantes

Además de los formadores de la red vítrea también se incorporan a la mezcla fundimnerales que contienen óxidos que cumplen la función de modificadores de red o fundentes. Los óxidos modificadores de red fueron listados por Mari (1982) y son Na_2O , K_2O , Li_2O , CaO , MgO (Cuadro 4).

Cuadro 4. Óxidos componentes del vidrio y su función en la materia prima. Su punto de fusión (Marín 1982)

Componente	Función en el vidrio	Punto de fusión(°C)	Materia prima más común
SiO ₂	Formador de red	1720	Arena silícea o cuarzo
Al ₂ O ₃	Estabilizador de red	2015	Feldespatos
B ₂ O ₃	Formador de red	460	Bórax
Na ₂ O	Modificador de red	desc.	SodaSolvay
K ₂ O	Modificador de red	desc.	Potasa
Li ₂ O	Modificador de red	1700	Espodumeno
CaO	Modificador de red	2580	Calizas
MgO	Modificador de red	2800	Dolomita
PbO	Aumento del índice de refracción	888	Litargirio
ZnO	Aumento de resistencia química	1975	ZnO
As ₂ O ₃	Afinante y decolorante	315	Arsénico
Sb ₂ O ₃	Afinante y decolorante	656	
CaF ₂	Opalizante	1360	Fluorita
P ₂ O ₅	Opalizante	580	Cenizas de huesos
Se	Decolorante	685	Selenio

Los óxidos alcalinos se incorporan a partir de carbonatos sódicos o potásicos, ya que, en el comienzo del calentamiento de la mezcla, los carbonatos serán descompuestos y quedarán entonces los óxidos. También el óxido de sodio puede incorporarse en forma de sulfatos, dando algunos problemas de corrosión y coloración. Cuando se intenta ajustar las reacciones de la zona de refinado, se utiliza sulfato de sodio en bajas cantidades.

El óxido de litio se utiliza en bajas proporciones cuando es de interés mejorar ciertas propiedades ópticas y se incorpora en forma de espodumeno.

Los óxidos alcalinos térreos también se incorporan en forma de carbonatos. Para esto, se utilizan minerales como caliza, aportador de carbonato de calcio, o también dolomita que contiene tanto carbonato de calcio como de magnesio. El óxido de magnesio cumple un papel similar al del óxido de calcio y es por eso por lo que algunas veces se utiliza la dolomita. Pero dependiendo de las características del horno, puede

ayudara la estabilizad de la mezcla. En el caso de utilizar la dolomita, se utilizan granulometrías entre 0.1-0.5 mm para evitar agregaciones que luego serán inclusiones en el vidrio (Rincón 2005)

La baritina (BaSO_4) y la whiterita (BaCO_3) son utilizadas cuando se intenta incorporar óxido de bario para mejorar propiedades ópticas o modificar el índice de refracción. Con este objetivo también podría incorporarse óxido de plomo, pero actualmente su incorporación está prohibida o limitada en la mayoría de los países.

Puede ser de interés incorporar otros óxidos de cationes divalentes, como el óxido de cinc, que mejora la resistencia química y eleva el índice de refracción, aumentando también la dureza. Este se añade como smithsonita (ZnCO_3) o cincita (ZnO)

Además de los fundentes se incorporan también estabilizantes como la alúmina Al_2O_3 . Puede añadirse como hidróxido de aluminio, aunque en muchos casos está presente como impureza de los minerales ya incorporados.

Cuando es necesario incorporar aluminio y también óxido de hierro, se utilizan los feldspatos en los que el óxido de hierro se encuentra como impureza. Estos también pueden aportar óxidos alcalinos de sodio o potasio que deberán tenerse en cuenta para la formulación, también sílice, restando la cantidad de los carbonatos correspondientes y de la arena o cuarzo (Rincón 2005)

La fabricación de todo tipo de vidrio, además contiene como materia prima el cascote de vidrio, que es vidrio reciclado. Esto puede tener origen externo o interno. Sus condiciones serán desarrolladas más adelante en este trabajo.

2. OBJETIVOS

El objetivo es evaluar diferentes alternativas para el abastecimiento de arenas silíceas con bajo contenido de hierro para la fabricación de vidrio *traclaro*.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los depósitos potenciales para la explotación de arena con bajo contenido de hierro en Argentina
- Definir los métodos de explotación adecuados y las implicancias ambientales de dichos métodos
- Encuadrar en el marco legal vigente
- Estudiar los métodos para disminuir el hierro de la arena extraída de los yacimientos actualmente explotados para la fabricación de vidrio incoloro
- Hacer un estudio comparativo entre las alternativas para la materia prima la explotación de arena con bajo contenido de hierro, si la hay, y el procesamiento de arena *traclaro* que es actualmente explotada para vidrio incoloro
- Evaluar sobre las diferentes alternativas y la viabilidad de tener esta materia prima en Argentina.
- Incluir aspectos ambientales relacionados con los desechos de vidrio y el reciclado de casera en la producción de vidrio *traclaro*
- Incorporar dentro del análisis el concepto de economía circular
- Estudiar las especificaciones técnicas de las arenas silíceas para el vidrio incoloro y para el vidrio *traclaro*

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación bibliográfica y la recopilación de datos son las bases de este trabajo integrado. Se analizará bibliografía relacionada con la localización y características de los depósitos, fuente de la principal materia prima, métodos de explotación, los procesos industriales de purificación de arenas silíceas y de la producción de vidrio, sus especificaciones técnicas, propiedades ópticas hasta su mercado. Se recopilará información sobre las empresas multinacionales productoras, para contar con las fichas técnicas de las materias primas. Se consultarán páginas de información mundial sobre mercados para estudiar el consumo y la demanda de arenas silíceas en particular sobre vidrio extraclaro.

En función de los datos obtenidos se realizará un estudio de costos comparativo de explotación de la arena con bajo contenido de hierro, su disponibilidad, procesamiento de arena silícea que está siendo actualmente utilizada para vidrio insoloro considerando aspectos ambientales relacionados con los desechos de vidrio y el reciclado de casco, relacionando este análisis al concepto de economía circular. La información adquirida y analizada se reunirá y evaluará para desarrollar las recomendaciones y conclusiones.

4. DEPÓSITOS DE ARENÍCEA

4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

La sílice (SiO_2) existe en la tierra en formas diversas y se caracteriza por su polimorfismo (Fig. 9). La energía es la que determina que uno u otro polimorfo sea estable. Los polimorfos tienen una temperatura de formación elevada y mayor energía reticular tienen estructura más expandida, teniendo menor peso específico e índice de refracción.

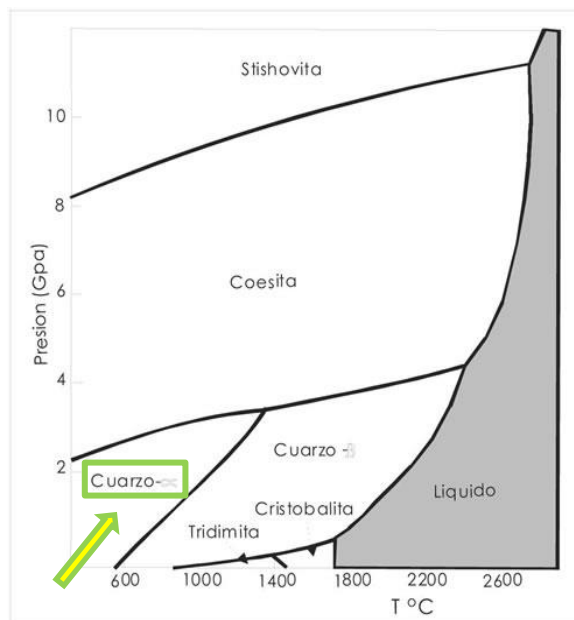


Figura 9. Diagrama de fases de la Sílice (modificado de www.insugeo.org.ar.)

El cuarzo es el polimorfo más común de la sílice y es estable hasta los 870 $^{\circ}\text{C}$ (de www.uniovi.es). El cuarzo alfa es romboédrico y es el más abundante, duro 7 de la escala de Mohs, falta de exfoliación y baja solubilidad en el agua. Este mineral está presente tanto en rocas ígneas como metamórficas y sedimentarias. Cuando se forma en ambientes o hidrotermales cristaliza con morfología y disposiciones distintas (texturas), que llevan implícitas características físicas y químicas diferentes, posibilitando una gran variedad de otros minerales de sílice como la cristobalita y tridimita que constituyen materias primas

por su baja proporción dentro de las rocas, siendo su comercialización muy puntual o limitada (Bustillo, 1989).

Las arenas hacen referencia a partículas o clastos cuya granulometría varía entre los 0,0625 y los 0,2 milímetros. El tamaño del clasto es el parámetro para clasificar los sedimentos y las rocas sedimentarias detríticas (Cuadro 5) y es indicativo de la energía del medio que las transportó. En muchas oportunidades, es posible que encuentren en un mismo depósito, diferentes tamaños de grano y, de ser así, se denomina a la roca con el nombre que le corresponde al tamaño más abundante.

Dentro de las arenas es posible encontrar una gran variedad de minerales y fragmentos de roca producto de la meteorización, transportados por agente erosivo y posterior deposición constituyendo un depósito sedimentario clásico (Tarbuck et al 2005).

Cuadro 5. Clasificación de las rocas detríticas según el tamaño (Tarbuck et al 2005)

Intervalos de tamaño (mm)	Nombre del clasto	Nombre del sedimento	Roca detrítica
>256	Bloque	Grava	Conglomerado o brecha
64-256			
4-64			
2-4	Canto		
1/16-2	Grano	Arena	Arenisca
1/256-1/16	Granulo	Limo	Limolita
<1/256	Partícula	Arcilla	Lutita

Las areniscas son rocas sedimentarias que se han formado por procesos de compactación y cementación, están compuestas principalmente por clastos de tamaño arena, inmersos en una matriz arcillosa y parcialmente cementados por material carbonático, silíceo o ferruginoso.

En particular las areniscas silíceas se encuentran formadas por un porcentaje de granos de cuarzo generalmente superior al 90%, aunque algunos autores proponen porcentajes mayores al 95%. En estos depósitos, presentan una homogeneidad mineral, es decir una alta madurez composicional y textural debido a la distancia de

transporte de estos sedimentos cuyos procesos de selección pueden haber ocurrido en más de un ciclo sedimentario (González et al/2004). La madurez se expresa como la relación entre el total de granos de cuarzo y el total de granos de feldespatos + fragmentos de rocas porfiríticas de distintos tipos de arenitas. La madurez mineralógica de estas arenas está en función de las distancias recorridas: a mayor transporte de los sedimentos, aumenta su madurez.

Los agentes de transporte, como el oleaje, favorecen la eliminación de fragmentos líticos y, en consecuencia, presentan un mayor contenido de cuarzo. La acción eólica en ambientes fluviales ejerce influencia y permite los cambios de textura de la arena, gracias a la meteorización. Los procesos eólicos son, muchas veces, los responsables de la madurez y el redondeamiento de las arenas (Alonso Arza 2010).

4.2 DEPÓSITOS EN LA ARGENTINA

4.2.1. Ubicación de los principales depósitos y características

Los ambientes en los que típicamente se depositan estos tipos de arenas son marinos someros con gran extensión, en superficies inclinadas, relacionados con eventos transgresivos. También se asocian a ambientes fluviales de trabajo eólico que permite la redistribución de partículas. Estos tipos de ambientes suelen presentarse dentro de un contexto geotectónico de margen pasivo y en áreas cratónicas. En nuestro país, es posible encontrar estas condiciones en sistemas litorales de margen pasivo del Mioceno-Holoceno y en ambientes fluviales adiacentes (González et al/2004).

En Argentina, los depósitos de arenas silíceas se encuentran en Entre Ríos, San Luis, Chubut y Jujuy. Históricamente, los principales productores de arenas silíceas, generalmente para consumo en la industria del vidrio, han sido las provincias de Entre Ríos y San Luis, siendo la primera de ellas la más importante en cuanto a volúmenes de producción. También la provincia de Buenos Aires ha hecho sus aportes de arenas de la zona del Delta, en menor cantidad, del sector occidental (Panorama Minero 2008). Los depósitos ubicados en la provincia de Chubut, actualmente revalorizados a partir del auge de los procesos de fracturación en la industria petrolera, también cumplen con las

especificaciones técnicas para la fabricación de vidrio. Algunos autores mencionan también depósitos en las provincias de Jujuy y Río Negro, aunque se trata de yacimientos pequeños y cuya explotación se realiza de forma ocasional.

A continuación, se describen las características de los principales depósitos arenas silíceas de la Argentina.

- *Yacimientos de la provincia de Entre Ríos*

Los depósitos localizados en la provincia de Entre Ríos tienen su origen en los eventos transgresivos del Atlántico, ocurridos durante el Mioceno medio (mar Paranaense) y Plioceno superior-Holoceno. Estas intrusiones marinas accedieron al continente a través del Río de la Plata y Paraná, permitiendo así el depósito de arenas en las márgenes de los actuales ríos afluentes del Paraná: Uruguay y Paraná Ibicuy (Gozalvez *et al* 2004).

Existen dos yacimientos destacados, los depósitos de Diamante e Ibicuy, ambos con importantes reservas de arenas silíceas cuya explotación incide fuertemente en la economía de la región (Fig. 10).



Figura 10 Ubicación de la provincia de Entre Ríos dentro de Argentina y, dentro de ella, la ubicación de los yacimientos en la provincia de Entre Ríos: a.1 Yacimiento de arena silíceas de Diamante. a.2. Yacimiento de arena silíceas de Ibicuy.

° Yacimiento de Diamante

Este sector de la provincia de Entre Ríos es, geomorfológicamente, una peneplanicie, cubierta por una acumulación de depósitos eólicos que permiten solamente ver la sucesión estratigráfica en las barrancas sobre el Río Paraná o los cañadones provocados por la erosión de arroyos que surcan la región (Alonso, 1999)

Este yacimiento representa una serie de acumulaciones de sedimentos fluvio eólicos continentales litorales, ubicados en ambos márgenes del arroyo El Salto, a aproximadamente 3 km de la localidad de Aldea Brasileña y 30 km sur de la ciudad de Paraná (Panorama Minero 2008)

Constituyen bancos subhorizontales de arenas de gran extensión areal, la cual alcanza los 20 km², y espesores variables que ocasionalmente superan los 25 m en promedio, resultan de 15 m y se caracterizan por un color blanco interrumpido en determinados sectores por la presencia de óxido de hierro. Según (González et al, 2004) los bancos suelen presentar una estratificación entrecruzada posiblemente de origen eólica, y lentes arcillosos, generalmente ubicados hacia la base

La ventaja de estos depósitos radica en su extracción, ya que casi no presentan cubierta y puede realizarse en forma directa mediante el uso de cargadores frontales o por dragado. Según datos presentados por Panorama Minero, para el año 2008, la producción alcanzaba las 10.000 toneladas mensuales de arenas silíceas.

Los depósitos de arena se encuentran en las proximidades del arroyo El Salto a unos 3 km de Aldea Brasileña, departamento Diamante. Su extensión, según datos de perforaciones, ocupa un área de 20 km². Si bien su amplitud sugiere la presencia de grandes reservas, no toda la arena alcanza las especificaciones necesarias, por lo tanto las empresas deben llevar a cabo planes de cateo mediante perforaciones para obtener reservas probadas. La constitución geológica del área está integrada por una secuencia sedimentaria cenozoica sin aparente distribución tectónica. Podrían ser sedimentos fluvioeólicos continentales litorales, pudiendo tratarse de antiguos médanos sujetos a retrabajamiento eólico. El material posee un destape de 25 m de potencia de niveles

arenosos, limosos y loésicos entre otros. Presenta una muy buena selección, con una granulometría dominada por partículas de tamaño arena

Arrospide (1999) así como también Gozálvez *et al* (2004) han estudiado la granulometría y composición química de estas arenas (Cuadro 6). Se puede concluir que la moda de las arenas silíceas de Barro Colorado son 0.250mm y 0.355mm que es su componente principal es sílice en un 98.5%

Cuadro 6. Composición granulométrica y química de arena silícea de Barro Colorado (Arrospide 1999)

Retenido acumulado en tamiz		%
U.S. Standard N°		
Granulometría	#16	-
	#30	2,3
	#40	13,6
	#70	76,9
	#100	98,4
	#140	99,7
	Pasante #140	0,3
Composición química	Analito	%
	SiO ₂	98,5
	Fe ₂ O ₃	0,06
	Al ₂ O ₃	0,7
	Na ₂ O	0,1
	K ₂ O	0,3
	Pérdida por calcinación	0,3

En lo que respecta a la mineralogía, estudiada por Arrospide (1999) alrededor del 80% de los granos son de cuarzo limpio, sin inclusiones y con formas redondeadas a subangulosas, mientras que sólo un 10% son de cuarzo con inclusiones de rutilo, además de pátinas de óxidos e hidróxido de hierro. Existen además porcentajes subordinados de otros minerales como feldespato y calcedonia. El uso de estas arenas ha sido históricamente, en la industria del vidrio para fabricaciones de vidrios especiales como la de la variedad *float* y *containe*

° Yacimiento de Ibicuy

El yacimiento de Ibicuy ha sido explotado desde principios de los años 1950 y es uno de los más importantes del país la fuente de abastecimiento de materia prima más antigua de la industria vidriera argentina (Fernández et al. 2017). Estos depósitos se encuentran ubicados entre las poblaciones de Mazzarón e Ibicuy en el departamento de Gualagayán. Han sido estudiados por la misma industria vidriera (Frattino 1984) por el Servicio Geológico Minero Argentino (Celeda y Mari 1994) por geólogos vinculados a la fabricación del vidrio (Arrospide 1999). Todos ellos con resultados coincidentes en lo que respecta a granulometría y composición química.

El depósito contiene arenas arcillosas dispuestas en cordones litorales con forma de media luna y que se desarrollan principalmente sobre el margen oriental del Río Paraná en Ibicuy. Los bancos se presentan con una escasa cubierta vegetal que facilita su explotación mediante método minado directo. El yacimiento presenta una extensión de 6 km, 12 m de ancho por sectores de hasta 10 m y potencias de los mantos arenosos de aproximadamente 4 metros (Gozalvez et al 2004). Estos mismos autores indican la presencia de estructuras de cruzadas con lentes arenarcillosos verdosos. También mencionan que los mantos de arenas se encuentran apoyados sobre arcillas y lentes arenosos con limos y arcillas.

Arrospide (1999) y posteriores trabajos caracterizaron las arenas de Ibicuy por su coloración blanquecina amarillentas, la redondez de sus granos, su granulometría que varía entre los 10, mm y los 25 mm, y finalmente, su buena selección. Composicionalmente, el 79% del depósito está constituido por minerales livianos, de los cuales el 86% está representado por el cuarzo. Alrededor del 83% del cuarzo no presenta impurezas, mientras que el porcentaje restante las contiene en forma de pátinas, inclusiones, en los contornos de los granos o como relleno de cavidades y marcas. Los restantes minerales de la fracción liviana se encuentran representados por feldespatos (12%), y apenas un 2% lo constituyen fragmentos de los minerales pesados la mitad de los cuales corresponden a ilmenita y magnetita, con estauroлита, leucoxeno, turmalina, circón, hematita, rutilo, hornblenda,

biotita y topacio subordinados (Gozalvez et al 2004) El Cuadro 7 muestra la composición granulométrica y química de arena silícea (Arrospeide 1999)

Cuadro 7. Composición granulométrica y química de arena silícea de Ibicuy (tomado de Arrospeide 1999)

Retenido acumulado en %		
tamiz		
	U.S. Standard N°	
Granulometría	#30	0,2
	#40	2,6
	#70	31,9
	#100	35
	#140	99,7
	Pasant#140	0,3
	Analito	%
Composición química	SiO ₂	98,9
	Fe ₂ O ₃	0,13
	Al ₂ O ₃	0,47
	Na ₂ O	-
	K ₂ O	0,2
	Pérdida por calcinación	0,3

Celeda y Marín (1994) han determinado el contenido de minerales pesados separados de los minerales livianos y han analizado el contenido de hierro (expresado como óxido férrico) en función de la granulometría, según se detalla en el Cuadro 8

Cuadro 8 Composición granulométrica y distribución de Fe₂O₃ en arena silícea de Ibi (Celeda y Mari, 1994).

Malla U.S. Standard N	% en peso Retenido	%Fe ₂ O ₃	%Pesados en la fracción	Distribución %	
				Fe ₂ O ₃	Pesados
>30	0,25	0,656	0	1,1	0
30/40	1,49	0,078	0	0,8	0
40/100	68,49	0,075	0,04	37,5	14
100/140	30,97	0,123	0,21	26,5	31
<140	0,2	26,63	69,7	37,1	55

Si bien los principales usos de las arenas silíceas de Entre Ríos es el del vidrio, en la actualidad existen otras aplicaciones que apuntan a industrias de diversa índole, como, por ejemplo, la arena para fracking

- ° Yacimientos en la provincia de San Luis

Arenas silíceas de Río Jarilla

Se trata de depósitos cuaternarios de origen fluvial y eólicos modernos, los cuales serían producto de la meteorización de areniscas de edad (González et al 2004) Los mismos han sido generalmente clasificados por el SEGEMAR como depósitos de arenas silíceas de tipo sedimentarias y (Beltrame 1999)

El yacimiento de Río Jarilla se encuentra ubicado a orillas del río, aproximadamente a 75 al oeste de la ciudad de San Luis. Se trata principalmente de mantos arenosos de la planicie aluvial dentro de una superficie de 12km de longitud por 150m de ancho y una potencia promedio de 1,50m (González et al 2004) Se considera como recurso renovable y se explotan en canchales a cielo abierto desde el año 1972, mediante el uso de palas cargadoras.

Según información publicada por el SEGEMAR (González et al 2004) contaba con reservas estimadas de al menos 5 millones de toneladas, únicamente considerando los mantos de arena silícea ubicadas sobre el cauce del río. A estas reservas debería sumarse los montículos eólicos ubicados sobre las lomas y en los campos

adyacentes (Fernández et al. 2017) aunque no fue posible encontrar información relacionada a los volúmenes que ellos representaban. El Panorama minero (2008) mencionaba la extracción de un total de 200.000 toneladas de arenas silíceas por un período de 30 años

Se trata de arenas con un contenido de cuarzo variable entre el 60% y 70%, entre un 25% y 30% de fspatos, además de escasas cantidades de minerales accesorios, tales como muscovita, turmalina, magnetita, granate y fragmentos (Sotillos et al. 2004). Estas arenas se caracterizan, además, por una tonalidad amarillenta a pardo claro, como consecuencia de la presencia de hidróxidos de hierro (Panorama Minero 2008) los cuales suelen representar entre el 1% de su composición (Coad (19)).

Cuadro 9. Análisis granulométrico de las arenas silíceas del yacimiento de la Provincia de San Luis (Gonzalez et al. 2004)

Retenido en tamiz U.S. Standard N°	%
20	4,54
40	21,66
80	52,48
100	11,66
200	8,38
Total	98,72

Tanto la coloración como su composición y contenido de impurezas, hacen que las arenas silíceas de la jarilla resulten de una calidad un tanto menor a las descritas anteriormente para la Provincia de Entre Ríos, acotando su aplicación a la industria del vidrio coloreado.

En general las arenas de este depósito se caracterizan también por ser subredondeadas, con granulometrías medias a finas en los mantos de origen aluvial, mientras que los sedimentos eólicos presentan una mayor finura (Gonzalez et al. 2004)

° Yacimientos en provincia de Chubut

Yacimientos en Dolavon

Los yacimientos áquelos explotados se ubican sobre la ruta provincial 40, aproximadamente a 80 dda ciudad de Dolavon. Comprende una serie de canteras ubicadas entre las localidades de 28 de Julio y Dolavon. Canteras: Cantera Yatén, Pitu, Betina, Apacheta, El Gauchito, Picada y La Porfía, entre (Fig. 1).

Fernández et al (2017) los describe como afloramiento de la Formación Salamanca compuestos por bancos de arenas cuarzosas con alto porcentaje de cuarzo de su composición, el cual suele superar el 98.90%. Arenas Patagónicas empresa minera actualmente encargada de su explotación, describe a las mismas como arenas con un índice de pureza del 97.80% en sus diferentes granulometrías, sin proceso de previo de lavado de sedimentos friables o consolidados de color translúcido, de granos subredondeados a redondeados, con escaso cemento, buena selección. Esta pureza, su redondez y aptitud de resistencia a la compresión, permite que puedan ser empleadas tanto en la industria del vidrio como en la de yacimientos petrolíferos no convencionales, específicamente en el proceso de fracturación secundaria (Fernández et al 2017). Este último mercado es al que actualmente apunta la empresa encargada de la concesión de dichas canteras, tornándose su principal aplicación.

Por su composición, estas arenas silíceas son consideradas para la fabricación de vidrio coloreado, ya que tienen una cantidad de hierro 1% (Transporte Rada Tilli S.A. 2014)



Figura 11. Cantera de arena silíceas de Dolavon en Chubut.

- Yacimientos de la provincia de Jujuy

En la provincia de Jujuy se presentan algunos depósitos menores cuya explotación se realiza en forma esporádica. El depósito de Huancar Chico, ubicado en el distrito norteño de Cochinoca provincia de Jujuy localiza a 7 km al sur de la localidad de Abra Pampa, en el cerro Huancar Chico. Comprende pequeñas acumulaciones en forma de anticlinales de arenas silíceas de origen eólico y edad cuaternaria (Cayre et al. 2008).

Herrmann (2008) describe otros depósitos cuaternarios de arenas silíceas ubicados entre las localidades de Humahuaca y Estancia. Estos se caracterizan por ser grandes acumulaciones de arenas finas silíceas, blancas a rosadas y bien seleccionadas con alrededor del 87% de partículas de tamaños entre los 0,06 y 0,5 mm, que presentan altos contenidos de alúmina, hierro y calcio.

5. PROCESOS DE EXPLOTACIÓN DE DEPÓSITOS DE ARENAS SILÍCEAS

5.1. DESARROLLO DE LA EXPLOTACIÓN

En lo que a explotación respecta, al tratarse de sedimentos y, en general de material consolidado, el tipo de explotación más común es el minado hidráulico a cielo abierto, donde suele extraerse el material con equipos como dragas y bombas, ya que el nivel freático suele ser (Ramos 2007)

En este tipo de extracción no son requeridos procesos de molienda, pero si suelen llevarse a cabo métodos de eliminación de minerales o impurezas como arcillas. Otro método de minado en los yacimientos de arenas es en seco y sin explosivos, donde son empleados directamente equipos de excavación para la extracción de los sedimentos, acarreo y almacenamiento. En este caso en particular, suele realizarse un primer paso de liberación de los granos, como puede ser una molienda, para lograr separar los minerales de interés de aquellos que son contaminantes.

En el caso de los métodos de equipos de excavación, la determinación del yacimiento en líneas perpendiculares es la que pasa a través de los campos una forma de orientación de extracción. Una vez determinadas las líneas, la excavación realiza a través de palas y se excava hasta aproximadamente 2 metros de profundidad, dependiendo la zona. El material que se extrae antes de sacar la arena silícea de interés se utiliza luego para rellenar parte de la excavación que se ha dejado.

Las pilas que se extraen se llevan normalmente en camiones batea, hasta la planta de lavado o procesado, donde se cuyo material es muestreado y analizado, para poder armar ciclos de procesado de manera organizada. La figura 12 muestra un esquema general de esta logística.

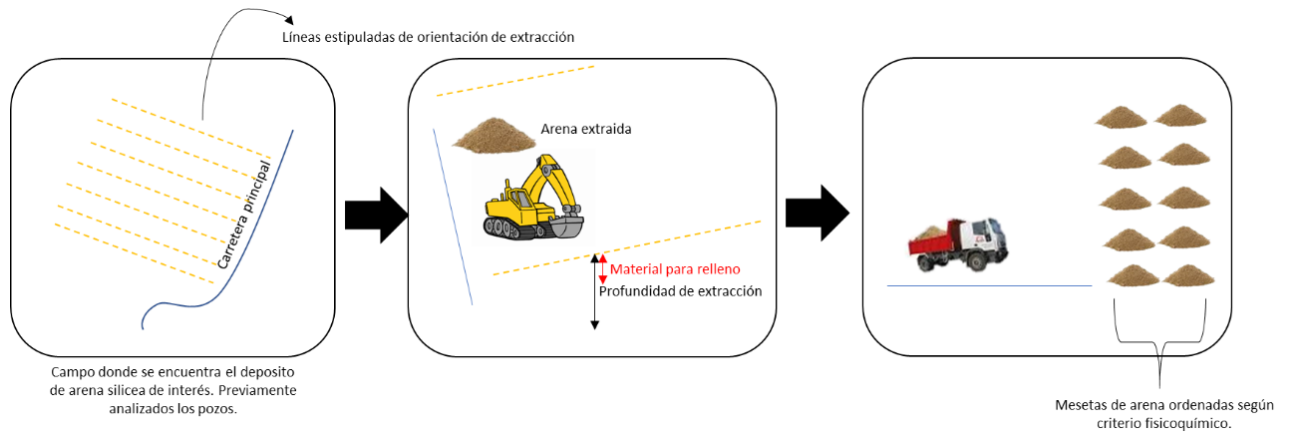


Figura12 Esquema de explotación de arena silícea mediante sistema de excavación

Si bien los métodos de explotación de estas arenas pueden ser relativamente sencillos, a veces se requiere de procesos posteriores de beneficio del mineral, para lograr la pureza acorde a la aplicación que se le vaya a dar (Figura 13a y b).

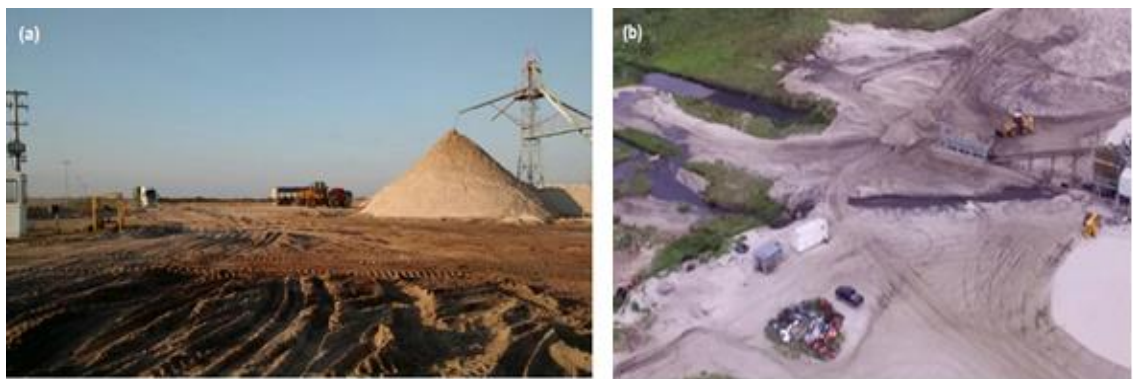


Figura13. (a) Pilas de arena lavada húmeda en reposo hasta se secadas. (b) Zona donde se encuentra la planta de procesado y por donde llegan las bateas con arena silícea del yacimiento (extraído de www.aresil.com).

