



**Universidad  
de Valparaíso  
CHILE**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIOAMBIENTE  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

---

**REVISIÓN DE FUENTES DE CARBONO PARA LA  
FERMENTACIÓN ÁCIDO LÁCTICA COMO PRECURSORA  
PARA LA PRODUCCIÓN DE PLA SEGÚN ASPECTOS  
AMBIENTALES Y ECONÓMICOS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: ERIK ROBINSON GAMBOA PALOMINOS  
DOCENTE GUÍA: JOAO RICARDO CERQUEIRA PINTO

---

Valparaíso, 17 de diciembre del 2021

# RESUMEN

La industria del plástico es uno de los grandes responsables que está alterando al medio ambiente, debido a los gases que se emiten a la atmósfera al extraer la materia prima, la acumulación de residuos no biodegradables, etc. Grandes países del mundo están trabajando en diversas medidas que permitan seguir usando el plástico, pero que no afecté gravemente al medio ambiente. Una de estas medidas consiste en producir polímeros que sean biodegradables o que su fuente sea de materias orgánicas, a lo que se denomina bioplástico. En Chile se espera que la demanda de productos hechos con bioplásticos aumente debido a que actualmente están rigiendo leyes que prohíben el uso de plásticos para ciertos fines, con el propósito de disminuir el impacto negativo al momento de que termine su vida útil.

El ácido poliláctico es un bioplástico que se obtiene por la polimerización de monómeros de ácido láctico. Para obtener ácido láctico se utiliza la fermentación de fuentes de carbono que cumplan con características sustentables, además de producir una tasa razonable de ácido láctico por cantidad de carbono que aporte la fuente.

Este trabajo consiste en seleccionar una fuente de carbono la cual no solo se centre en los aspectos técnicos para producir ácido láctico a partir de la fermentación de fuentes de carbono, sino que se consideren los aspectos ambientales y económicos asociados a las fuentes de carbono presentes en Chile. Se evaluó la papa, el maíz y la remolacha azucarera como fuentes de carbono, las cuales primero se caracterizaron en base a la revisión bibliográfica, luego se seleccionaron las dos fuentes que estuvieron mejores evaluadas, para luego estimar su productividad y cantidad de fuentes de carbono que se requerirían si se reemplazara el consumo de plástico nacional por PLA. Se realizó un análisis ambiental sobre el consumo de agua y la ocupación de tierra que se requeriría para obtener la cantidad estimada de cada fuente de carbono y un análisis económico en base a los costos de la producción de cada fuente de carbono y la relación entre el precio de la fuente de carbono por unidad de ácido láctico. La papa resultó ser la fuente de carbono mejor evaluada, debido a que requiere menor superficie de producción y presenta menores costos de producción en comparación a la remolacha azucarera, ya que se estimó que la papa ocuparía entre 139.635 y 154.934 hectáreas de cultivo y su costo de producción es de \$192 por kilogramo de papa cultivado.

# ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Industria del bioplástico .....	1
1.1.1	Bioplástico a Nivel Mundial .....	1
1.1.2	Bioplástico en América Latina.....	2
1.1.3	Bioplástico en Chile .....	3
1.1.3.1	Ley 20920.....	3
1.1.3.2	Ley 21100.....	3
1.1.3.3	Ley 21368.....	3
1.2	Clasificación de los bioplástico .....	4
1.3	Ácido Poliláctico.....	6
2	PROBLEMA.....	8
3	OBJETIVOS .....	9
3.1	Objetivo general.....	9
3.2	Objetivos específicos .....	9
4	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	10
4.1	Consumo de plástico a nivel nacional .....	10
4.2	Ácido Láctico .....	10
4.3	Fuentes de Carbono .....	14
4.3.1	Papa.....	14
4.3.2	Remolacha azucarera.....	15
4.3.3	Maíz.....	16
4.4	Aspectos productivos, ambientales y económicos de las fuentes de carbono.....	17
5	MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
5.1	Caracterización de las fuentes de carbono .....	19
5.2	Evaluación de las fuentes de carbono .....	19
5.3	Identificación de los parámetros para la fermentación de ácido láctico .....	20
5.4	Estimación de la productividad del ácido láctico .....	20
5.5	Estimación de la producción de PLA como sustituto del plástico PE.....	20
5.6	Estimación de la producción de las fuentes de carbono.....	21
5.7	Análisis ambiental de las fuentes de carbono .....	22
5.8	Análisis económico de las fuentes de carbono.....	23
6	RESULTADOS .....	24
6.1	Caracterización de las fuentes de carbono .....	24

6.2	Evaluación de las fuentes de carbono .....	26
6.3	Identificación de los parámetros para la fermentación de ácido láctico .....	27
6.3.1	Parámetros para la fermentación de ácido láctico a partir de la remolacha azucarera .....	27
6.3.2	Parámetros para la fermentación de ácido láctico a partir de la papa .....	27
6.4	Estimación de la productividad de ácido láctico .....	28
6.4.1	Productividad de ácido láctico con la remolacha azucarera .....	28
6.4.2	Productividad de ácido láctico con la papa .....	30
6.4.3	Productividad de las fuentes de carbono .....	33
6.5	Estimación de la producción de las fuentes de carbono.....	34
6.6	Estimación de los aspectos ambientales de las fuentes de carbono .....	35
6.7	Estimación de los aspectos económicos de las fuentes de carbono .....	37
7	DISCUSIÓN.....	38
7.1	Factores productivos.....	38
7.2	Factores fermentativos .....	39
7.3	Productividad de Ácido Láctico .....	40
7.4	Fuentes de carbono.....	41
7.5	Aspectos ambientales.....	41
7.6	Análisis económico .....	42
7.7	Propuesta de fuente de carbono.....	43
8	CONCLUSIONES .....	44
9	BIBLIOGRAFÍA.....	45
10	ANEXO.....	53

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Estimación de la capacidad de bioplásticos a nivel mundial.....	2
<b>Figura 1.2:</b> Clasificación de bioplástico según su procedencia.....	4
<b>Figura 1.3:</b> Clasificación de los plásticos según biodegradabilidad y fuente de recurso. ....	5
<b>Figura 1.4:</b> Estimación de la capacidad de producción global para cada bioplástico en el año 2025. ....	6
<b>Figura 1.5:</b> Estructura del PLA basado en la quiralidad.....	6
<b>Figura 1.6:</b> Ciclo de vida del PLA.....	7
<b>Figura 4.1:</b> Consumo de plástico en Chile en el año 2020. ....	10
<b>Figura 4.2:</b> Vía de obtención petroquímica del ácido láctico.....	11
<b>Figura 4.3:</b> Reacciones químicas para obtener ácido láctico.....	11
<b>Figura 4.4:</b> Principales vías de fermentación de la glucosa en la fermentación homoláctica y en la fermentación heteroláctica. ....	13
<b>Figura 4.5:</b> Evolución de la superficie y producción de papa. ....	15
<b>Figura 4.6:</b> Evolución de la producción y superficie de la remolacha azucarera. ....	16
<b>Figura 4.7:</b> Evolución de la producción y superficie del maíz. ....	16
<b>Figura 4.8:</b> Anomalía porcentual de precipitación total anual en Chile. ....	17
<b>Figura 5.1:</b> Método utilizado para estimar la masa de ácido láctico requerido. ....	20
<b>Figura 5.2:</b> Procedimiento para la estimación de la masa de la fuente de carbono. ....	21
<b>Figura 6.1:</b> Producción de ácido láctico a partir de la fermentación del azúcar hidrolizado de la pulpa de remolacha. ....	28
<b>Figura 6.2:</b> Producción de ácido láctico a partir de la fermentación del azúcar presente en el jugo de la remolacha azucarera.....	29
<b>Figura 6.3:</b> Producción de ácido láctico por <i>L. paracasei</i> , <i>L. salivarius</i> y <i>L. rhamnosus</i> en presencia de MRS/sacarosa, MRS/melaza de remolacha y MRS/vinaza como sustrato. ....	29
<b>Figura 6.4:</b> Producción de ácido láctico a distintas concentraciones de peptona de soya y extracto de levadura. ....	30
<b>Figura 6.5:</b> Comparación del modelo experimental y predictivo de la producción de ácido láctico durante la sacarificación y fermentación simultánea ....	32
<b>Figura 6.6:</b> Productividad de los subproductos de la remolacha azucarera.....	33
<b>Figura 6.7:</b> Productividad del almidón de la papa.....	33
<b>Figura 6.8:</b> Superficie requerida para la producción de remolacha azucarera. ....	35
<b>Figura 6.9:</b> Superficie requerida para la producción de papa. ....	35
<b>Figura 6.10:</b> Consumo de agua requerida para la remolacha azucarera. ....	36
<b>Figura 6.11:</b> Consumo de agua requerida para la papa. ....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 5.1:</b> Escala de puntuación para la evaluación de fuentes de carbono.....	19
<b>Tabla 6.1:</b> Factores productivos de la papa.....	24
<b>Tabla 6.2:</b> Factores productivos de la remolacha azucarera.....	24
<b>Tabla 6.3:</b> Factores productivos del maíz.....	24
<b>Tabla 6.4:</b> Aspectos ambientales de la producción de la papa.....	24
<b>Tabla 6.5:</b> Aspectos ambientales de la producción de la remolacha azucarera.....	24
<b>Tabla 6.6:</b> Aspectos ambientales de la producción del maíz.....	25
<b>Tabla 6.7:</b> Consumo de agua para la producción de las fuentes de carbono.....	25
<b>Tabla 6.8:</b> Puntuación de las fuentes de carbono.....	26
<b>Tabla 6.9:</b> Parámetros para la fermentación de ácido láctico a partir de subproductos de la remolacha azucarera.....	27
<b>Tabla 6.10:</b> Parámetros para la fermentación de ácido láctico a partir de subproductos de la papa.....	28
<b>Tabla 6.11:</b> Sustrato inicial, ácido láctico y tiempo de fermentación para los subproductos de la remolacha azucarera.....	30
<b>Tabla 6.12:</b> Producción de ácido láctico a partir de distintos sustratos de almidón.....	31
<b>Tabla 6.13:</b> Sustrato inicial, ácido láctico y tiempo de fermentación para los subproductos de la papa.....	32
<b>Tabla 6.14:</b> Estimación de la producción de PLA y ácido láctico (AL).....	34
<b>Tabla 6.15:</b> Estimaciones de sustrato inicial, subproducto y producto de remolacha azucarera.....	34
<b>Tabla 6.16:</b> Estimaciones de almidón y papa.....	34
<b>Tabla 6.17:</b> Precio de la remolacha azucarera por unidad de ácido láctico.....	37
<b>Tabla 6.18:</b> Precio de la papa por unidad de ácido láctico.....	37
<b>Tabla 6.19:</b> Costo de la producción de la remolacha azucarera.....	37
<b>Tabla 6.20:</b> Costo de la producción de la papa.....	37

# 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo presenta diversos problemas ambientales como la deforestación, la escasez del agua, la contaminación atmosférica, marina y entre otros, causado por diversas acciones como la acumulación y generación de residuos doméstico e industrial y la extracción de recursos para los sectores productivos como el industrial, el agrícola, entre otros. (Marcano, 2020). La producción de plástico afecta al medio ambiente desde la extracción de los recursos necesarios para su producción, hasta cuando termina su vida útil, volviéndose un desecho que no se degrada de forma acelerada, por lo que se encuentra en el medio ambiente por un largo tiempo (Rojo-Nieto & Montoto, 2017). El ser humano está acostumbrado a llevar una vida consumista a corto plazo, lo cual incita a que se produzca una gran cantidad de productos de un solo uso, donde el plástico es uno de materiales más usado en esta categoría (Jordá, 2013). Por lo que a medida que siga aumentando la población, aumentará el consumismo, y esto conlleva a que se produzca una mayor cantidad de plástico (Góngora, 2014; Rojo-Nieto & Montoto, 2017).

El plástico es un material que ha logrado reemplazar a otros materiales en la elaboración de productos que antes eran hechos de metal, vidrio o madera, y esto se debe a sus distintas propiedades físicas, por lo cual no es una opción dejar de ocupar plástico en todo lo que nos rodea para enfrentar los problemas ambientales relacionados con su producción (Góngora, 2014; Rojo-Nieto & Montoto, 2017). No obstante, una de las opciones para disminuir los diversos problemas que conlleva la producción del plástico, consiste en utilizar otras fuentes, las cuales deben ser amigables con el medio ambiente y presentar una tasa de degradación alta, por lo que se ha trabajado en la producción de bioplástico (Jordá, 2013).

## 1.1 Industria del bioplástico

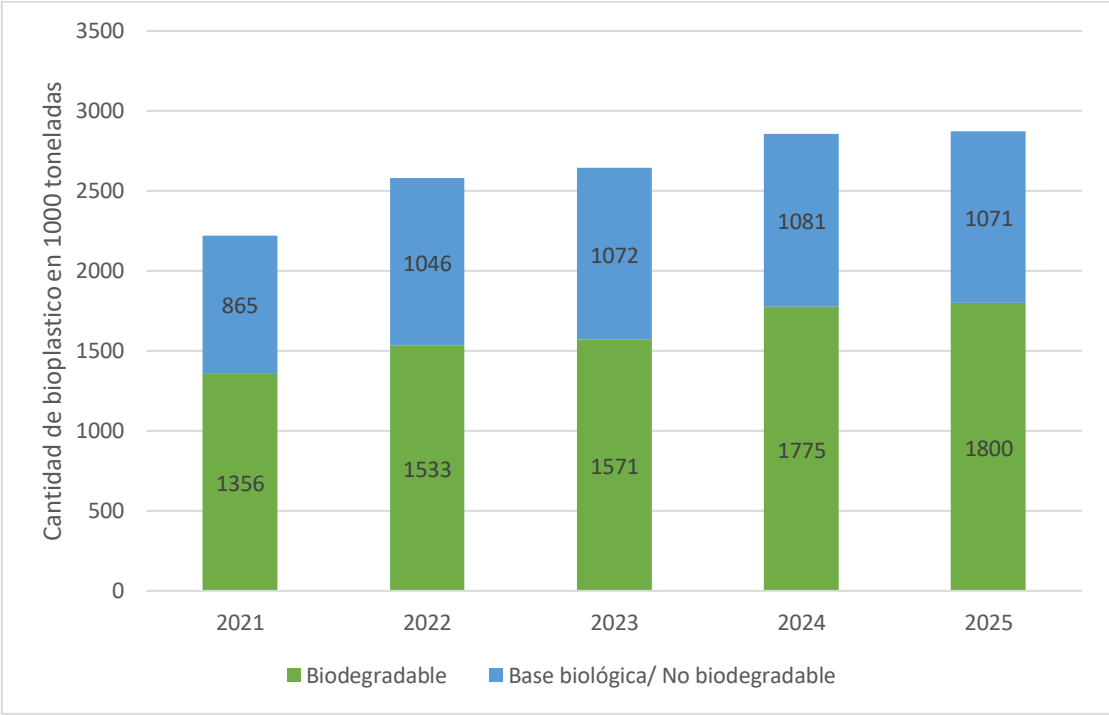
### 1.1.1 *Bioplástico a Nivel Mundial*

Cabe destacar que el bioplástico no es un material nuevo, su origen data del año 1926, pero que, gracias a los avances tecnológicos, se ha logrado extender su aplicación en diversas áreas (Díaz y Hurtatiz, 2012). Tanto los consumidores como los productores han mostrado un gran interés por los bioplásticos y sus aplicaciones, debido a que es un material que genera un bajo impacto al medio ambiente, al compararlo con los plásticos en base a petróleo, el cual se está agotando con el transcurso del tiempo y siendo más costoso (Díaz y Hurtatiz, 2012; Lopez, 2008).

Las principales empresas que tomaron iniciativa en el mercado del bioplástico provienen de Europa, Japón y Estados Unidos. Sin embargo, durante estos últimos años se han sumado otras empresas provenientes de Australia, Brasil, China, India, Canadá, Corea y Taiwán. En Francia y España, empresas azucareras y centros de investigación están desarrollando bioplástico a partir

del azúcar y cereales. Grandes cadenas comerciales de Francia, Gran Bretaña, Italia y Países Bajos usan el PLA, siendo éste el de mayor uso en la industria de envases y embalajes (Díaz y Hurtatiz, 2012).

A medida que transcurren los años, se observa un aumento en la capacidad para producir bioplástico a nivel mundial, lo cual se puede idealizar gracias a los avances tecnológicos, el uso de nuevas fuentes para producir bioplástico y la concientización sobre el medio ambiente. En la Figura 1.1 se observa una estimación de la capacidad de bioplástico a nivel mundial, la cual muestra un aumento, tanto para los bioplásticos biodegradables como los de base biológica.



**Figura 1.1:** Estimación de la capacidad de bioplásticos a nivel mundial (European bioplastics, 2020).

### 1.1.2 Bioplástico en América Latina

Brasil y México se destacan como los países que lideran el mercado de bioplástico en América Latina, tanto en el mercado de empaques para alimentos como también para el plástico que se usa en el sector agrícola. Brasil cuenta con una gran ventaja para producir bioplástico a un bajo precio, el cual se debe a que tienen diversas fuentes renovables baratas como el azúcar de caña, producto que tiene a Brasil como líder a nivel mundial. México se destaca por el uso del maíz como materia prima para la producción de bioplástico, lo cual ha permitido un crecimiento en la producción, con una tasa de expansión anual promedio mayor a 20% (Díaz y Hurtatiz, 2012).

### *1.1.3 Bioplástico en Chile*

Actualmente, Chile no es un país que se destaque en la producción de bioplástico a nivel continental, no obstante, hay empresas que están produciendo productos hecho de bioplástico en ciertas zonas de Chile y que, paulatinamente, estos productos están siendo exportados a países vecinos. (Cedeño & Naranjo, 2019; CIPA 2021; Zeaplast, 2021). La empresa Zeaplast produce bioplástico a partir maíz y otras fuentes de carbono, y han logrado exportar sus productos como bolsas para el sector de la agricultura y de empaque a Perú (Zeaplast, 2021). Cabe destacar que en Chile han surgido leyes que buscan regular y/o disminuir el impacto de los productos hecho de plástico convencional, donde el uso de bioplástico está siendo una las alternativas para ayudar con este fin, por lo que incentiva a un aumento en la demanda de los productos elaborados por bioplástico.

#### **1.1.3.1 Ley 20920**

La ley 20920, más conocida como la ley REP (Responsabilidad Extendida al Productor), establece que todos los productores o importadores de productos prioritarios deben hacerse cargo de los bienes cuando terminen su vida útil, a partir de metas de recolección y valorización diferenciadas para cada producto. Entre los productos prioritarios, se encuentran los envases y embalajes, hecho principalmente de plástico convencional (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

#### **1.1.3.2 Ley 21100**

La Ley 21100, o también conocida como Ley Chao Bolsas, lleva cerca de tres años en regir en todo Chile. Esta ley prohíbe la entrega de bolsas plásticas de un solo uso en los comercios en todo el país, con el fin de disminuir el impacto de las bolsas plásticas en el medio ambiente (Ministerio de Medio Ambiente, 2018).

#### **1.1.3.3 Ley 21368**

Esta ley prohíbe la entrega de productos hecho de plástico de un solo uso en los locales que comercialicen comida preparada. Por lo que la ley llama a usar productos a base de bioplástico compostable certificado con un plazo máximo de tres años desde que se promulgue la ley (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

## 1.2 Clasificación de los bioplástico

Según *European bioplastics* (2012), un bioplástico es un material plástico de base biológica y/o biodegradable. Uno de los criterios para clasificar a los bioplásticos es según su procedencia, la cual puede ser de fuentes fósiles (derivados del petróleo) o de fuentes naturales, denominándose biopolímero (REMAR, Red de Energía y Medio Ambiente, 2011). La industria del bioplástico está en continuo crecimiento, donde una gran cantidad de bioplástico se sintetiza químicamente y otra parte se produce mediante procesos naturales donde se involucran algunos organismos (Jordá, 2013). En la Figura 1.2 se muestra un esquema con la clasificación de los bioplásticos según su procedencia, destacándose en un círculo aquellos bioplásticos que tienen una gran relevancia a nivel comercial.

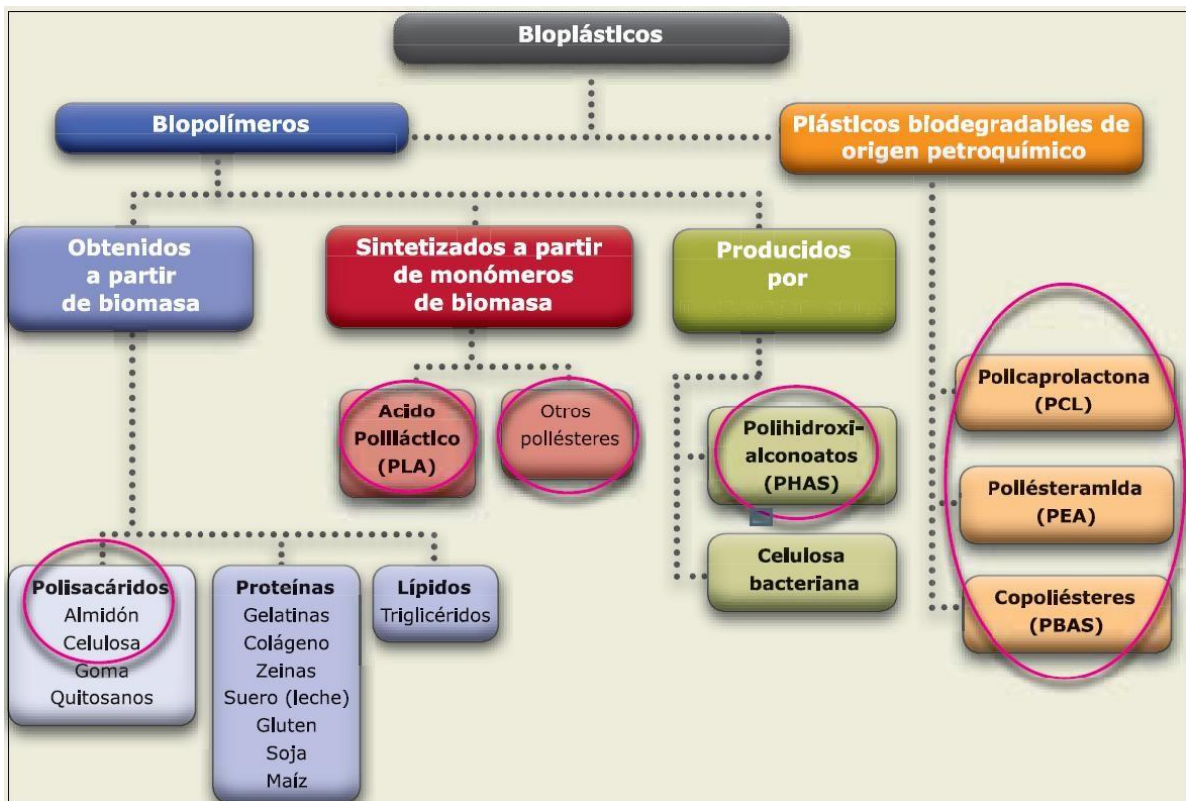
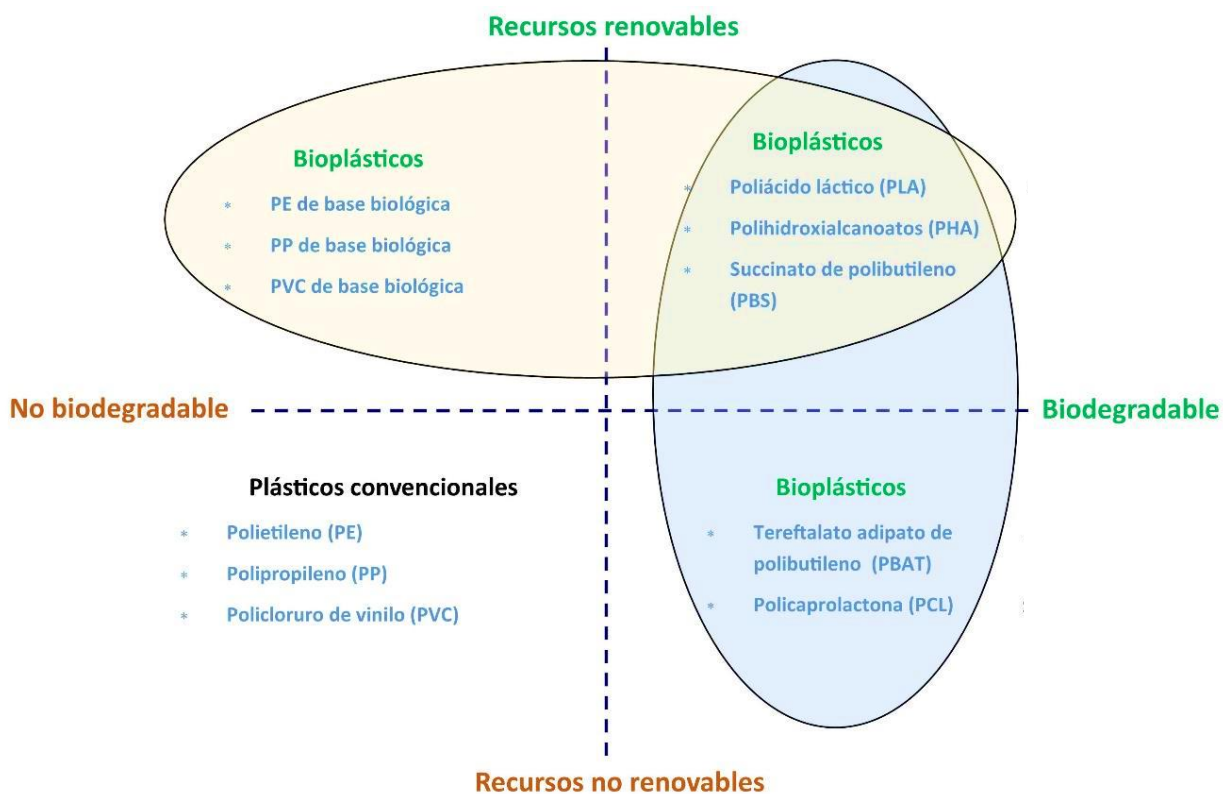


Figura 1.2: Clasificación de bioplástico según su procedencia (REMAR, 2011).

Mediante la definición dada por *European bioplastics*, en la Figura 1.3 se observa un diagrama en el cual se clasifican los plásticos según su biodegradabilidad y su fuente de materia prima.



**Figura 1.3:** Clasificación de los plásticos según biodegradabilidad y fuente de recurso (construido a partir de datos de *European bioplastics*, 2018).

Gracias a la gran diversificación de los bioplásticos, actualmente ellos son una alternativa para reemplazar casi la mayoría de los materiales plásticos convencionales (*European bioplastics*, 2020). El bioplástico tiene un gran potencial a futuro debido al aumento del precio de las resinas derivadas del petróleo y la creciente concientización de los consumidores hacia productos más amigables con el medio ambiente (Lopez, 2008). Actualmente, se está trabajando para abaratar los costos de la transformación del material y aumentar su vida útil para usos prácticos. En base a estos hechos, se estima que a nivel mundial la capacidad de producción de bioplástico se elevara (Jordá, 2013). En la Figura 1.4 se observa un gráfico donde se muestra una estimación sobre las capacidades de producción a nivel global para cada tipo de bioplástico en el año 2025, donde el bioplástico que se pronostica para una mayor capacidad de producción a nivel global es el ácido poliláctico (PLA).

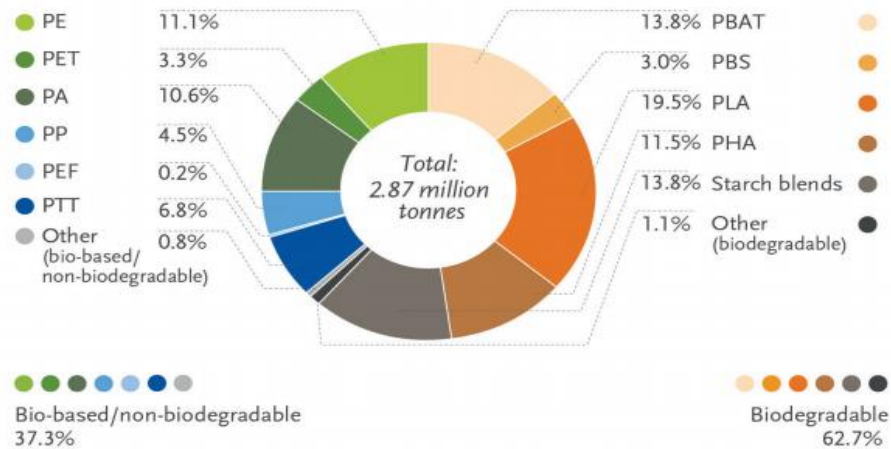


Figura 1.4: Estimación de la capacidad de producción global para cada bioplástico en el año 2025 (European bioplastics, 2020).

### 1.3 Ácido Poliláctico

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable cuya molécula precursora es el ácido láctico. El PLA pertenece a la familia de los poliésteres alifáticos conocidos como  $\alpha$ -hidroxiácidos. Debido a la naturaleza quiral del ácido láctico, existen polilacturos en formas diferentes, que son poli (L-láctico), poli (D-láctico), y poli (DL-láctico) como se muestra en la Figura 1.5 (Amado, 2015).

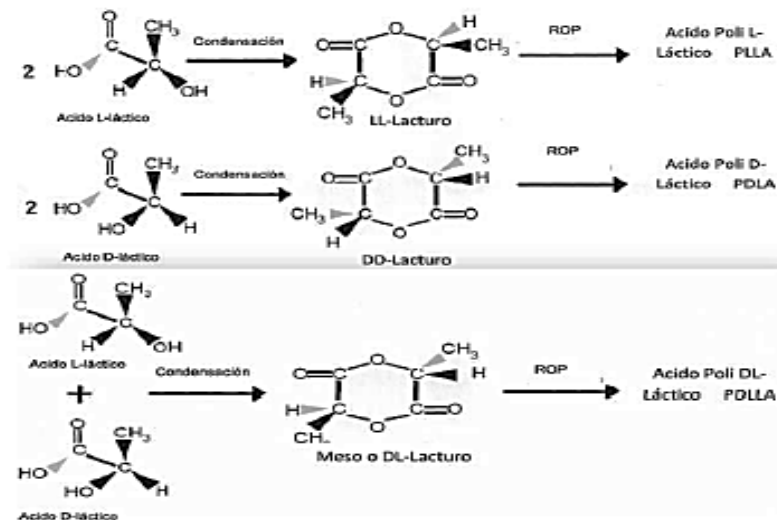
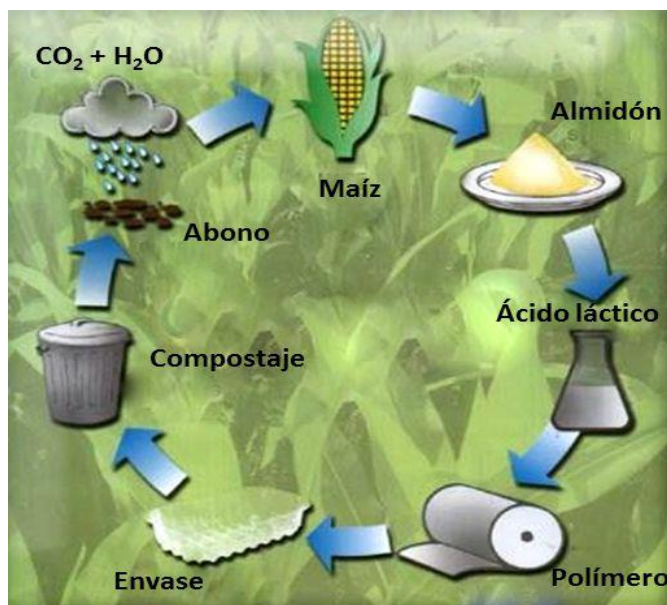


Figura 1.5: Estructura del PLA basado en la quiralidad (Amado, 2015).

El PLA es capaz de imitar las mismas propiedades de los polímeros convencionales (PE, PVC, PP, PET y PS), por lo que se considera como una buena alternativa para reemplazar ese tipo de plástico. (Segura, 2016). Además, no existen diferencias significativas en cuanto a la cantidad de material necesaria para fabricar productos a base de PLA, como también en el impacto que se genera en la etapa de producción, en comparación con productos hechos con polímero convencional (Lopez, 2008).

El PLA además de ser un polímero biodegradable, también es biocompatible (capaz de desempeñar una función deseada sin provocar ningún efecto indeseable en el tejido vivo), siendo un material idóneo para la fabricación de artículos quirúrgicos, fármacos de liberación controlada y envases de alimentos (Salvatierra, 2009; Segura, 2016). Los envases hechos con bioplástico de PLA permiten que se puedan tratar junto con los residuos orgánicos, por lo que se pueden degradar química o mecánicamente (Castillo, 2015), por incineración para recuperar energía (Segura, 2016) o por hidrólisis para recuperar ácido láctico (Siparsky, 1998). Por lo que el PLA permite un ciclo natural con un bajo impacto ambiental como se observa en la Figura 1.6



**Figura 1.6:** Ciclo de vida del PLA (Segura, 2016).

El PLA también se puede reciclar, lo cual permite tener una mayor cantidad de este bioplástico en el mercado. Sin embargo, se debe considerar que es un proceso el cual tiende a disminuir su resistencia y que este no puede ser reciclado junto con los plásticos convencionales (Arceo, 2021; Ramos 2019).

La producción de PLA requiere entre un 20 y 25% menos de energía en comparación con la producción de plástico convencional, y en base a la cantidad de recursos que se requieren para la producción, el PLA requiere entre un 20 y 50% menos de recursos que el plástico convencional. También se destaca que este tipo de bioplástico tiene el potencial de reducir los niveles de  $\text{CO}_2$  atmosféricos. Esto se debe a que el  $\text{CO}_2$  presente en el aire es absorbido por las fuentes de carbono que se utilizan para producir PLA, y cuando este bioplástico se haya degradado, el carbono regresaría a la tierra. (Segura, 2016).

## 2 PROBLEMA

Chile se encuentra en un proceso donde se busca reducir el consumo del plástico convencional e incentivar el consumo de materiales que sean más amigable con el medio ambiente, como el bioplástico. Sin embargo, Chile no es un país que se destaque en la producción de bioplástico, por lo que se debería aumentar la producción de este material.

La producción de bioplástico depende directamente de la materia prima que proviene de fuentes renovables. Estas fuentes se pueden importar de otros países, donde la materia prima es más rentable. Sin embargo, Chile posee una gran variedad de fuentes de carbono (hortalizas, frutas, etc.) que se podrían utilizar para producir bioplástico, en especial, fuentes de carbono provenientes del sector agrícola. Si se quiere producir este material, se debe realizar un evaluar si en Chile se encuentran fuentes de carbono que permitan llevar a cabo la elaboración de algún tipo de bioplástico. El PLA es un bioplástico que se podría fabricar a nivel nacional, pero se requiere producir monómeros de ácido láctico, y estos se pueden obtener a partir de la fermentación de una fuente de carbono. Por lo que se debe identificar que fuentes de carbono cultivadas en el país que cumplen con las características para producir este bioplástico. Estas características no solo deben considerar los aspectos para la producción del ácido láctico, sino que también los aspectos ambientales y económicos asociados a la fuente de carbono, con el fin de proponer una fuente de carbono económica y con un bajo impacto ambiental.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo general**

Evaluar fuentes de carbono para la fermentación hacia ácido láctico, según aspectos ambientales y económicos, como precursor para la producción de PLA.

### **3.2 Objetivos específicos**

Seleccionar fuentes de carbono que cumplan con las características adecuadas para producir ácido láctico.

Estimar la productividad del ácido láctico a partir de la fermentación de las fuentes de carbono seleccionadas.

Estimar la producción de ácido láctico a partir de las fuentes de carbono seleccionadas para sustituir el plástico convencional por PLA.

Analizar los aspectos ambientales y económicos de las fuentes de carbonos en base a la producción estimada de ácido láctico.

## 4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Consumo de plástico a nivel nacional

En base a lo informado por ASIPLA<sup>1</sup> la cantidad de plástico que se consumió en el año 2020 fue de 698.436 toneladas. Como se observa en la figura 4.1, el PE fue la resina de plástico que más se consumió en Chile, llegando a ser la mitad del plástico total consumido. El PE se clasifica en base a su densidad, el PE de baja densidad presenta una densidad entre 0,910 y 0,940 g/cm<sup>3</sup> y el PE de alta densidad presenta una densidad entre 0,941 y 0,965 g/cm<sup>3</sup> (Chañi, 2014).

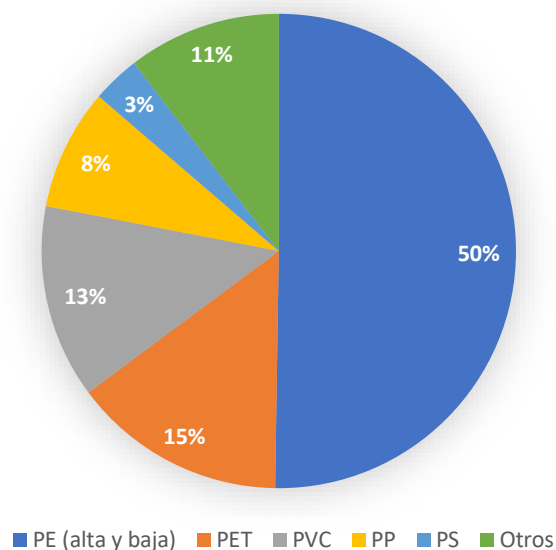


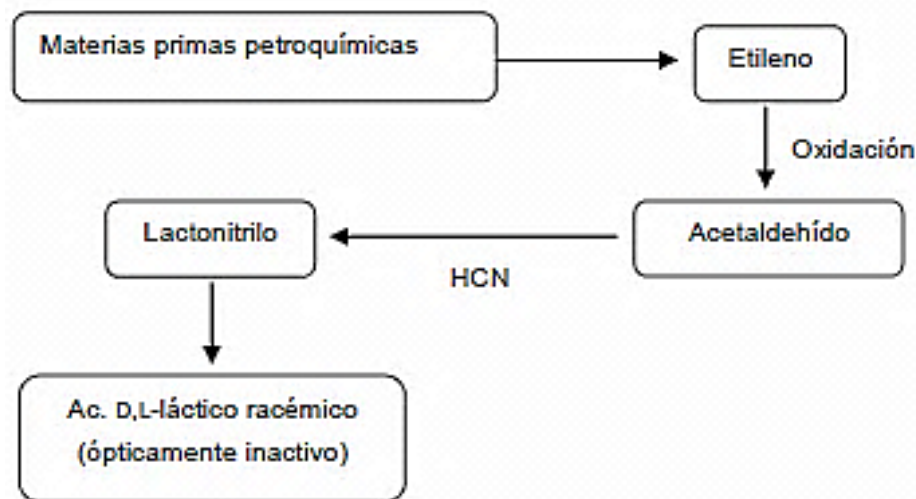
Figura 4.1: Consumo de plástico en Chile en el año 2020 (construido a partir de datos de ASIPLA 2021).

### 4.2 Ácido Láctico

El ácido láctico, o también denominado ácido 2-hidroxi-propanoico, es un ácido carboxílico, con un grupo hidroxilo en el carbono adyacente al grupo carboxilo, lo que lo convierte en un ácido  $\alpha$ -hidroxílico (AHA) de fórmula  $C_3H_6O_3$  (Gopal *et al.* 2008). El ácido láctico es sumamente soluble en agua y, además, se descompone fácilmente a la biosfera, liberando  $H_2O$  y  $CO_2$ , compuestos no nocivos para el medio ambiente (Amado, 2015).

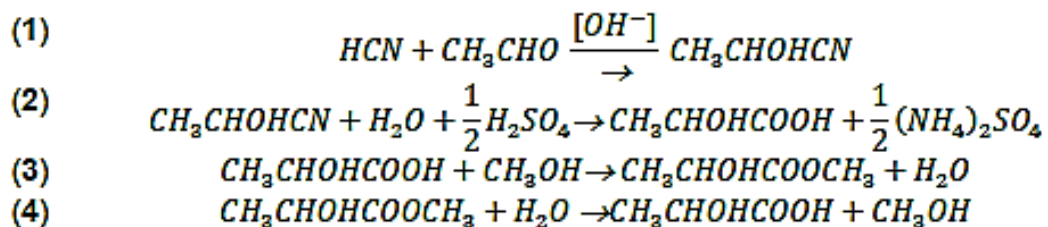
El ácido láctico se puede fabricar tanto por fermentación de carbohidratos como por síntesis química. La vía química o petroquímica de obtención del ácido láctico se observa en la Figura 4.2, donde el ácido láctico producido por esta vía es una mezcla racémica ópticamente activa de L (+)- y D (-)- enantiómeros (Amado, 2015).

<sup>1</sup> <https://www.asipla.cl/estudio/> [revisado el 5 de noviembre 2021]



**Figura 4.2:** Vía de obtención petroquímica del ácido láctico (Amado, 2015).

En la Figura 4.3 se describen las reacciones en cadena para obtener el ácido láctico. Al inicio del proceso, el ácido cianhídrico se añade al acetaldehído en presencia de una base para obtener lactonitrilo (1). Luego, el lactonitrilo se purifica por destilación y se hidroliza a ácido láctico con ácido sulfúrico, obteniendo sal de amonio y ácido láctico (2). Posteriormente, para su purificación, el ácido láctico se esterifica con metanol produciendo metil lactato (3), el cual se aísla y purifica por destilación y se hidroliza con agua bajo condiciones catalíticas, produciendo ácido láctico y metanol (4) (Amado, 2015).



**Figura 4.3:** Reacciones químicas para obtener ácido láctico (Amado, 2015).

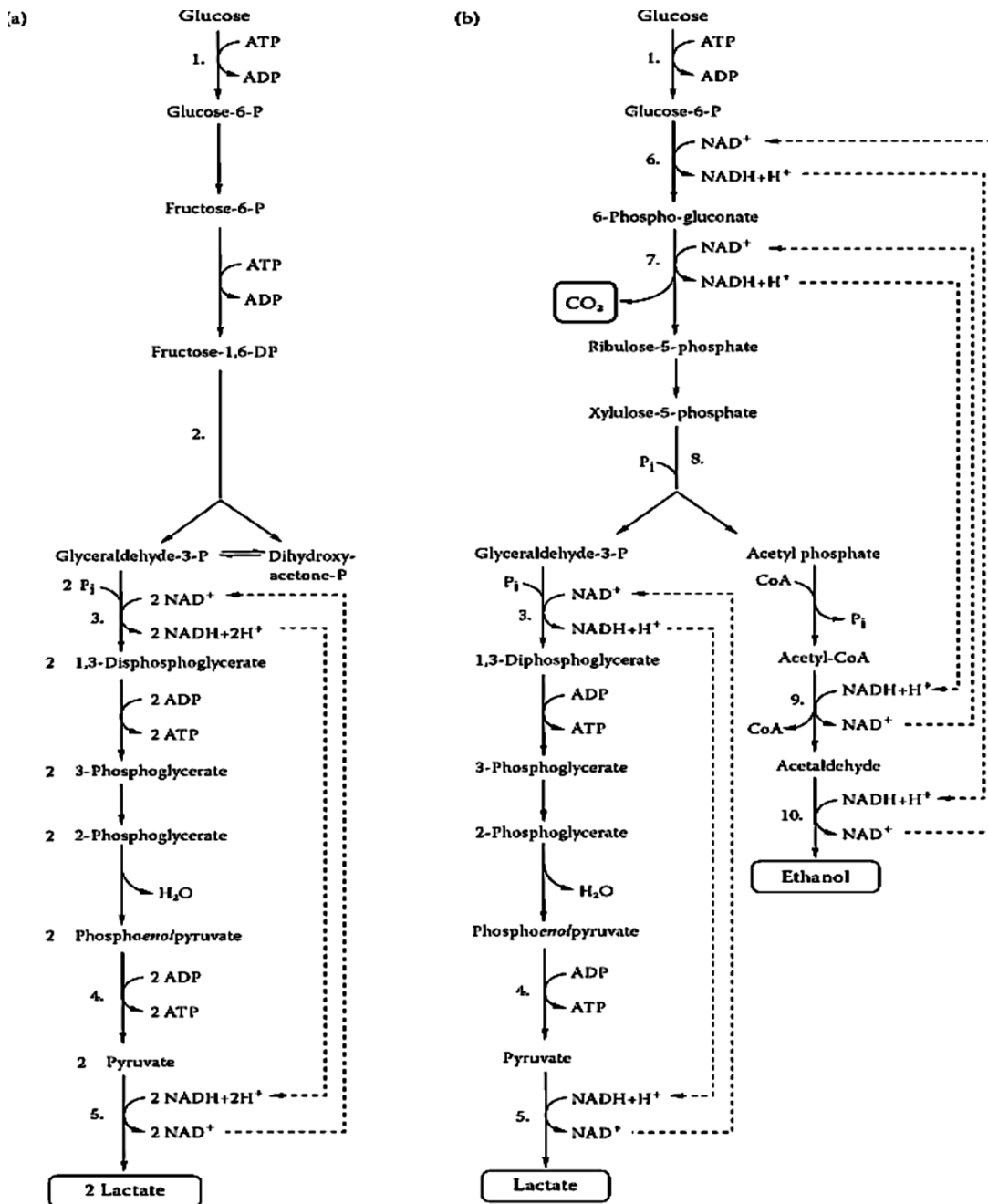
En cambio, la fermentación láctica es un proceso celular anaeróbico donde se utiliza glucosa como fuente de carbono y donde el producto de desecho es el ácido láctico. Este proceso lo realizan muchas bacterias, como las bacterias lácticas, así como lo hacen algunos hongos (Amado, 2015; Hofvendahl & Hagerdal, 2000).

El proceso de fermentación se puede clasificar según el rendimiento de ácido láctico:

- a) **Método hetero-fermentativo:** Este método produce menos de 1,8 moles de ácido láctico por un mol de hexosa, con otros subproductos en cantidades significativas, tales como ácido acético, etanol, glicerol, manitol y el dióxido de carbono. Las bacterias que realizan este tipo de metabolismo son: *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus bifidus*, además incluye las bacterias del género *Leuconostoc* (Amado, 2015; García et al., 2010).
- b) **Método homo-fermentativo:** Este método presenta mayores rendimientos de ácido láctico y niveles más bajos de subproductos. El rendimiento de conversión de la glucosa en ácido láctico es más del 90 %. Las bacterias que realizan este tipo de metabolismo son: *Lactobacillus delbrueckii*, *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus leichmanii*, *Lactobacillus casei* y *salivarius*, además incluyen los géneros *Pediococcus* y *Streptococcus* (Amado, 2015; García et al., 2010; Hofvendahl & Hagerdal, 2000).

Durante la fermentación ácida homoláctica, una molécula de glucosa se transformará, en condiciones óptimas, en dos moléculas de ácido láctico. En la fermentación ácida heteroláctica, los productos de fermentación son una molécula de dióxido de carbono, una de etanol y una de ácido láctico. En la Figura 4.4 se muestran de forma detallada las reacciones que ocurren y los productos obtenidos en cada una de este tipo de fermentaciones (Amado, 2015).

El ácido láctico sintético y por fermentación compitieron industrialmente, aunque desde la década de los 90 prácticamente todo el ácido láctico proviene de la fermentación. Esto se debe a que es más respetuosa con el medio ambiente y, además, la ruta sintética tiene bastantes condiciones importantes, como una capacidad limitada debido a la dependencia de un subproducto derivado del proceso productivo, inhabilidad para obtener sólo el isómero deseado L, y elevados costos de producción (Amado, 2015).



**Figura 4.4:** Principales vías de fermentación de la glucosa en la a) fermentación homoláctica y en la b) fermentación heteroláctica (Amado, 2015).

Para la fermentación de ácido láctico se deben considerar ciertos parámetros que permitan llevar este proceso de forma óptima. Kashket (1987) consideró que el pH durante la fermentación debe estar entre 5.0 y 7.0, con el fin de no afectar el proceso. Hardergal y Hofvendahl (2000) establecieron que una fuente de carbono rica en glucosa permite obtener una mayor concentración de ácido láctico, si se compara con otros monómeros a base de carbono. Para el medio de cultivo, se consideró que la concentración de las fuentes de nitrógeno debe estar entre los 10 y 25 g/L (Amrane y Prigent, 1997).

### 4.3 Fuentes de Carbono

Según García *et al.* (2010), las fuentes de carbono para producir ácido láctico deben tener las siguientes características: económicas, bajos niveles de contaminantes, rápida tasa de producción, alto rendimiento, capacidad para ser fermentada con poco o ningún pretratamiento y disponibilidad durante todo el año.

Los amiláceos son fuentes de polisacáridos (principalmente almidón) baratos, abundantes y renovables, donde está el sorgo, la paja de trigo, el maíz, la yuca, el ñame, la papa, el arroz y la cebada. Otra materia prima muy utilizada es la melaza que contiene sacarosa (31% p/v), glucosa (9,5% p/v), fructosa (10%) y nitrógeno (0,95%) y es un sustrato completo para la producción de ácido láctico (García *et al.*, 2010).

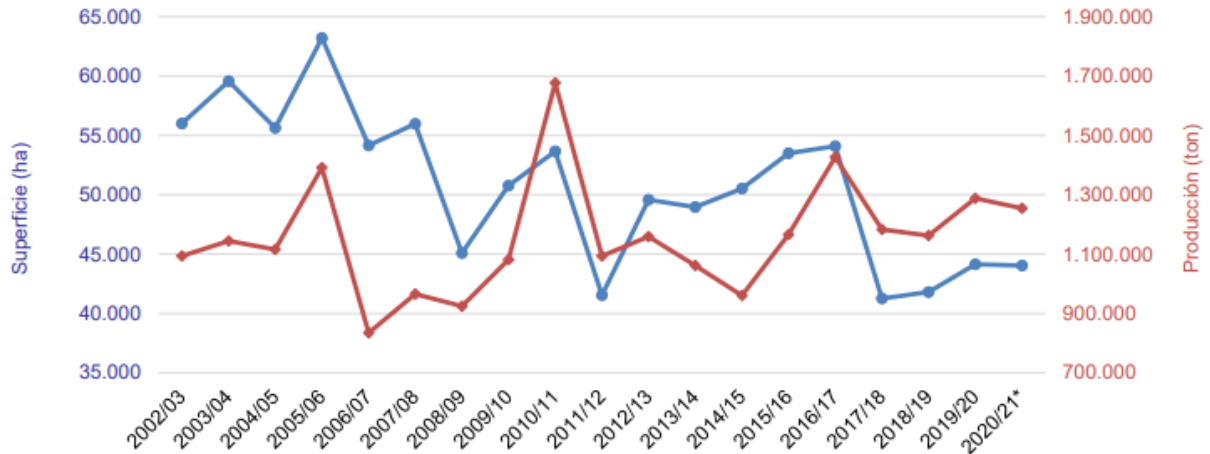
Para la producción de ácido láctico también han sido utilizados desechos orgánicos derivados del procesamiento de alimentos como los residuos del procesamiento de zanahoria, almidón y desechos de alimentos, mazorcas de maíz, desechos de manzana, desechos de piña, mucílago de café, melaza derivada de la producción de xilosa y fuentes de nitrógeno orgánico (García *et al.*, 2010).

En Chile se produce la papa, la cual se cultiva alrededor 50.000 hectáreas por año (ODEPA, 2021a). El maíz es otra fuente de carbono que se produce en Chile, principalmente en las regiones de O'Higgins y el Maule (ODEPA, 2021b). En Chile se utiliza la remolacha azucarera para obtener el azúcar, donde IANSA es la industria que se encarga de producir azúcar y otros productos en base a ésta (IANSA, 2021). Cabe destacar que de la remolacha azucarera se pueden obtener los mismos subproductos que se obtienen de la caña azúcar, y donde éstos se pueden fermentar para obtener ácido láctico. (Baquero, 1987).

#### 4.3.1 Papa

La papa (*Solanum tuberosum*) es una planta perteneciente a la familia de las solanáceas, originaria de Sudamérica y cultivada por todo el mundo por sus tubérculos comestibles (Inostroza, 2017). Se caracteriza por almacenar sus reservas de energía como almidón, siendo el segundo componente en mayor cantidad en una papa (Amado, 2015).

La producción de papa en Chile está destinada casi totalmente al mercado interno, debido a que es un alimento importante en la dieta de los chilenos (ODEPA, 2021a). En la Figura 4.5 se aprecia como varía la superficie y la producción de papa en Chile.



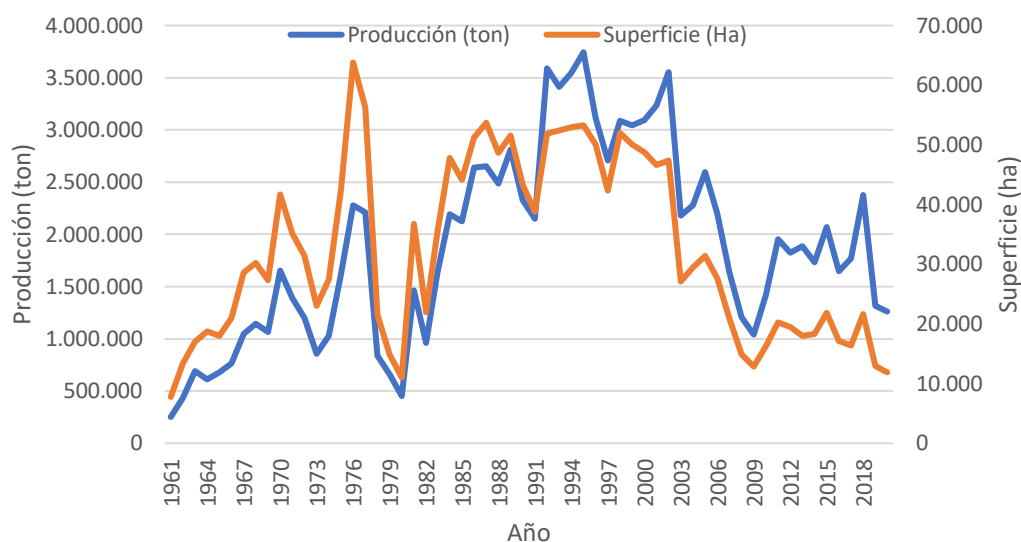
**Figura 4.5:** Evolución de la superficie y producción de papa (Tapia, 2021).

Por otro lado, se produce ácido láctico a partir del almidón de papas que han sido descartadas (magulladas, descoloradas, etc.) o desechos de aquel, como la cascara (Liu *et al*, 2005). Sin embargo, el almidón debe ser hidrolizado para obtener glucosa antes del proceso, porque este polímero está formado por enlaces de glucosa  $\alpha$  (1,4) y  $\alpha$  (1,6), aunque esta hidrólisis puede llevarse a cabo simultáneamente con la fermentación láctica (García *et al.*, 2010).

#### 4.3.2 Remolacha azucarera

La remolacha (*Beta vulgaris L.*) es un vegetal cultivado en casi todo el mundo para el consumo como ensalada, por su contenido de azúcares, minerales y carotina, sustancias de suma importancia para la vitalidad del organismo humano en general (Casierra & Pinto, 2011).

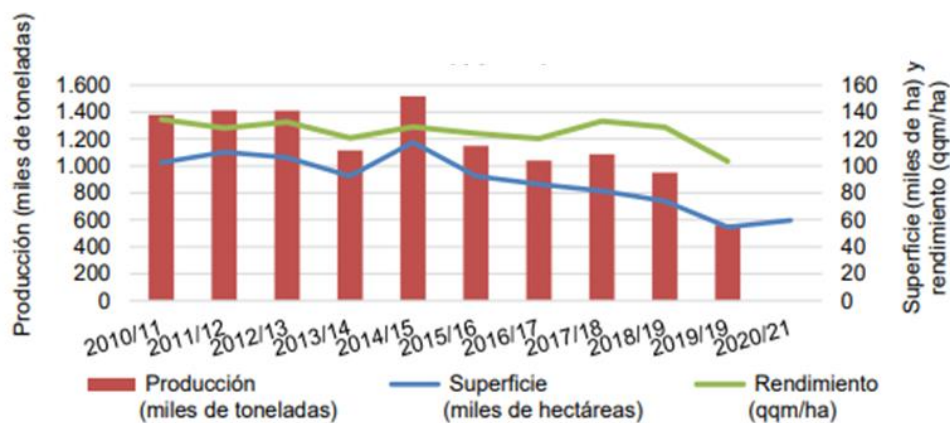
En Chile la remolacha es usado para la obtención de azúcar, donde la empresa IANSA se encarga de producirlo (IANSA, 2021). Actualmente IANSA ha cerrado empresas a lo largo del país debido a la diversificación del uso de otros productos para endulzar (Páez, 2020), por lo que se podría seguir produciendo azúcar de remolacha para la producción de ácido láctico. En la Figura 4.6 se observa la producción y la superficie de la remolacha azucarera desde el año 1961 en Chile.



**Figura 4.6:** Evolución de la producción y superficie de la remolacha azucarera (construido a partir de datos de Knoema 2021a; Knoema,2021b; ODEPA 2021c).

### 4.3.3 Maíz

El maíz (*Zea mays L.*) es una planta monocotiledónea la cual se ha vuelto un alimento importante en la dieta de muchas personas a nivel mundial (PALIWAL, 2001). El maíz está compuesto principalmente por almidón, el cual está presente entre el 72-73 % del peso del grano de maíz, pero también hay presencia de otros carbohidratos en forma de glucosa, sacarosa y fructosa, los cuales varían entre el 1-3% del grano (FAO, 1993). En la Figura 4.7 se aprecia la tendencia de producción del maíz durante los últimos 11 años en Chile.



**Figura 4.7:** Evolución de la producción y superficie del maíz (García y Laval, 2021).

A partir del almidón del maíz se ha logrado producir ácido láctico mediante hidrólisis (García *et al.*, 2010), así como a partir de los desechos que se generan después de su consumo, como la mazorca (Rivas *et al.*, 2004).

#### 4.4 Aspectos productivos, ambientales y económicos de las fuentes de carbono

La producción de las fuentes de carbono del sector agrícola tiende a limitarse a ciertos factores, tales como el precio del año anterior, la disponibilidad de agua, la disponibilidad de semillas, las enfermedades y la competencia por el uso del suelo (Rivas & Tapia, 2012). Como ejemplo, la sequía y las altas temperaturas entre diciembre del 2011 y febrero del 2012 causaron un estrés hídrico que afectó el rendimiento de cultivo de la remolacha azucarera (Olfos, 2012). Además, hay un estudio donde se indica que la superficie para el cultivo de papas en Chile presenta una tendencia a la disminución, el cual ya se refleja en todas las zonas productoras, en especial en la zona centro norte por los escasos hídrica que se enfrenta la zona en estos últimos años (Kramm, 2017).

La agricultura es una actividad que utiliza los recursos naturales y los servicios ecosistémicos, con el fin de producir ciertos productos cuyo uso principal es para el consumo alimenticio. No obstante, ciertos recursos naturales están generando incertidumbres en la producción de los productos agrícolas, donde uno de esos es el recurso hídrico, el cual se está volviendo más escaso, debido a las bajas precipitaciones y el aumento del consumo de agua en las actividades. (ODEPA, 2017). En la Figura 4.8 se observa cómo la precipitación total anual en Chile está disminuyendo en un 3% por década durante los últimos 60 años y, además, se observa que desde el año 2006 hay un déficit de precipitación en cada año.

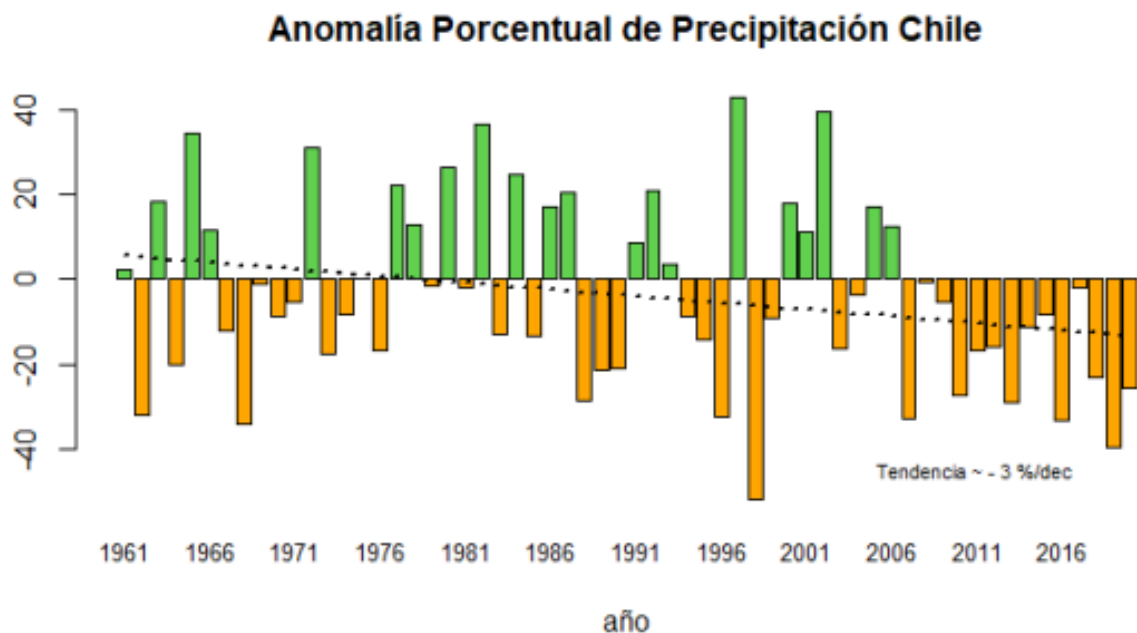


Figura 4.8: Anomalia porcentual de precipitación total anual en Chile (Dirección Meteorológica de Chile, 2021).

Otro aspecto ambiental que se debe considerar en la agricultura tiene relación con la ocupación de suelo para la producción de las fuentes de carbono. El suelo es un recurso que es altamente vulnerable a las acciones antrópicas y climatológicas, lo cual favorece a la erosión de este (Cartes, 2013). La agricultura es un claro ejemplo de acción antrópica, debido a que se usan grandes superficies de suelo para el cultivo, causando una disminución de nutrientes y materia orgánica (Comunidades europea, 2009).

Para los costos de producción de una fuente de carbono se consideran tres factores: la mano de obra, las maquinarias y los insumos, aunque pueden asociarse otros costos que sean indirectos o por imprevistos. La base de cálculo que se usa para analizar los costos consiste en una hectárea de cultivo, con el fin de poder obtener el costo total de la producción de la fuente de carbono a partir de las superficies cultivadas (Tapia, 2021).

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Caracterización de las fuentes de carbono

Mediante revisión bibliográfica se caracterizaron las fuentes de carbono mencionadas en el capítulo 4.3 a partir de los factores productivos relacionados a las fuentes de carbono, tales como:

- Tasa de producción del año agrícola 2020
- Disponibilidad durante el año

En paralelo, mediante revisión bibliográfica, se caracterizaron las mismas fuentes de carbono en relación con los aspectos ambientales que se involucran en la producción de éstas. Estas fuentes de carbono son productos del sector agrícola, por lo que se consideró pertinente los siguientes aspectos ambientales:

- Consumo de agua
- Ocupación de tierra en el año 2020

Se consideraron estos aspectos ambientales debido a que las fuentes de carbonos que se evaluaron eran productos agrícolas donde tienen en común los dos aspectos ambientales nombrados.

### 5.2 Evaluación de las fuentes de carbono

En base a la caracterización de cada fuente, se consideró la misma importancia a los criterios evaluados, por lo que se aplicó una escala de puntuación para evaluar cada fuente de carbono, como se observa en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Escala de puntuación para la evaluación de fuentes de carbono.

<b>Criterio</b>	<b>Puntuación</b>
Tasa de producción	Escala de puntuación de 1 al 3, donde 3 es para la mayor tasa de producción y 1 es para menor tasa de producción.
Disponibilidad	Escala de puntuación de 1 al 3, donde 3 es para la fuente de carbono disponible para todo el año y 1 es para la fuente con baja disponibilidad en el año
Ocupación de tierra	Escala de puntuación de 1 al 3, donde 3 es para la fuente que requiere menos superficie y 1 es para la que requiere más superficie.
Consumo de agua	Escala de puntuación de 1 al 3, donde 3 es para la fuente que requiere menos agua y 1 es para la que requiere más agua.

A partir de los valores obtenidos, se escogerán para la siguiente actividad las dos fuentes que tuvieron los mayores puntajes.

### 5.3 Identificación de los parámetros para la fermentación de ácido láctico

Mediante revisión bibliográfica se identificaron los parámetros para la fermentación de cada fuente de carbono seleccionada, las cuales se deben tener presente en la producción de ácido láctico, tales como el microorganismo utilizado, la temperatura y el pH de operación y la concentración del sustrato de la fuente de carbono.

### 5.4 Estimación de la productividad del ácido láctico

Mediante la identificación por la revisión bibliográfica de los parámetros que se deben tener presente en la producción del ácido láctico, se estimó la productividad considerando los valores publicados de la cantidad de ácido láctico producido, la cantidad de masa consumida de la fuente de carbono y el tiempo de fermentación, usando la Ecuación 5.1.

$$P = \frac{m_{AC}}{m_S \cdot t}$$

**Ecuación 5.1:** Productividad específica del ácido láctico.

Donde:

P: Productividad específica por masa de sustrato.

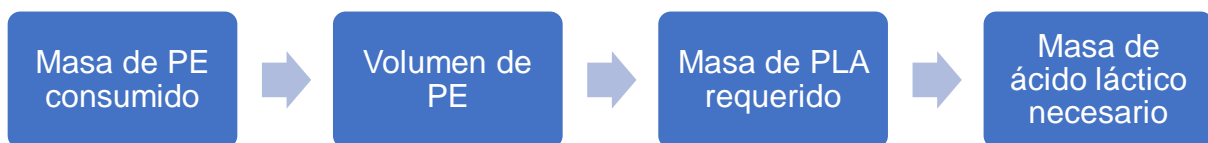
$m_{AC}$ : Masa o concentración de ácido láctico producido.

$m_S$ : Masa o concentración de sustrato inicial de la fuente de carbono

t: Tiempo de fermentación.

### 5.5 Estimación de la producción de PLA como sustituto del plástico PE

En la Figura 5.1, se esquematizó el método por el cual se estimó la producción de ácido láctico requerido para reemplazar la cantidad plástico PE por PLA.

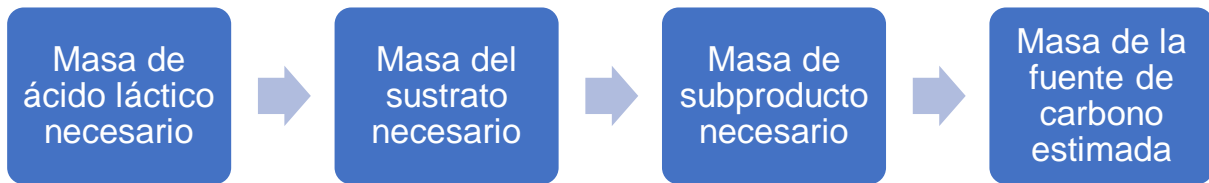


**Figura 5.1:** Método utilizado para estimar la masa de ácido láctico requerido.

Mediante la revisión bibliográfica, se utilizó la densidad de  $0,94 \text{ g/cm}^3$  de PE para determinar el volumen de PE. Se asume que el volumen estimado de PE equivale al mismo volumen de PLA, debido a que es necesario que los productos hechos de PE sean sustituidos por los de PLA, manteniendo las mismas dimensiones. Por lo que se utilizó la densidad de PLA de  $1,252 \text{ g/cm}^3$  (Nuñez, 2019) para obtener la masa de PLA. Por último, se estimó la masa de ácido láctico requerido para producir la masa de PLA estimada mediante el rendimiento obtenido por revisión bibliográfica, el cual fue de 0,64 (Anexo 1).

## 5.6 Estimación de la producción de las fuentes de carbono

Se estableció para cada fuente de carbono un caso optimista y pesimista en base a la productividad estimada, donde el caso optimista consistió en la estimación de la productividad más alta y el caso pesimista consistió en la estimación de la productividad más baja. A partir de la estimación de la masa de ácido láctico necesario, en la Figura 5.2 se esquematizó el procedimiento de forma general por el cual se estimó la masa de las fuentes de carbono que se requieren para obtener la masa de ácido láctico para el caso optimista y pesimista de cada fuente de carbono..



**Figura 5.2:** Procedimiento para la estimación de la masa de la fuente de carbono.

Antes de estimar la masa del sustrato, se estimó el rendimiento de la producción de ácido láctico a partir de los resultados de la identificación de los parámetros para la producción del ácido láctico (Ecuación 5.2). Al obtener el rendimiento del caso optimista y pesimista para cada fuente de carbono, se estimó la masa del sustrato a partir de la masa de ácido láctico necesario usando la Ecuación 5.3. Para estimar la masa de subproducto requerido (Ecuación 5.4), se utilizó la masa estimada de sustrato requerido y la cantidad de sustrato presente en el subproducto, el cual se obtuvo de los trabajos de cada fuente de carbono. Para obtener la masa de la fuente de carbono requerida (Ecuación 5.5), se utilizó la masa estimada de subproducto requerido y la cantidad de subproducto obtenido de la fuente de carbono, el cual se obtuvo de los trabajos de cada fuente de carbono.

$$R = \frac{m_{AC}}{m_S}$$

**Ecuación 5.2:** Rendimiento del ácido láctico.

Donde:

R: rendimiento de ácido láctico.

$m_{AC}$ : Masa o concentración de ácido láctico producido.

$m_S$ : Masa o concentración de sustrato inicial de la fuente de carbono.

$$m_{SN} = \frac{m_{ACN}}{R}$$

**Ecuación 5.3:** Masa de sustrato requerido.

Donde:

$m_{SN}$ : Masa sustrato necesario.

$m_{ACN}$ : Masa del ácido láctico necesario.

R: rendimiento de ácido láctico.

$$m_{SPN} = \frac{m_{SN}}{R_{SS}}$$

**Ecuación 5.4:** Masa de subproducto requerido.

Donde:

$m_{SPN}$ : Masa de subproducto necesario.

$m_{SN}$ : Masa sustrato necesario.

$R_{SS}$ : Relación entre la masa de sustrato y de subproducto de la fuente de carbono.

$$m_f = \frac{m_{SPN}}{R_{SF}}$$

**Ecuación 5.5:** Masa de la fuente de carbono estimada.

Donde:

$m_f$ : Masa de la fuente de carbono estimada.

$m_{SPN}$ : Masa de subproducto necesario.

$R_{SS}$ : Relación entre la masa de subproducto y de la fuente de carbono.

## 5.7 Análisis ambiental de las fuentes de carbono

Mediante la caracterización de las fuentes de carbono en relación con los aspectos ambientales, se estimó la ocupación de terreno (Ecuación 5.6) y el consumo de agua (Ecuación 5.7) requerida en base la estimación de la producción de las fuentes de carbono estimada para producir la cantidad de ácido láctico necesaria.

$$S_r = \frac{S \cdot m_f}{T_{anual}}$$

**Ecuación 5.6:** Ocupación de terreno requerido.

Donde:

$S_r$ : Superficie requerida

S: Superficie anual

$m_f$ : Masa de la fuente de carbono estimada.

$T_{anual}$ : Tasa de producción anual

$$Q_r = Q * S_r$$

**Ecuación 5.7:** Consumo de agua requerida.

Donde:

$Q_r$ : Consumo de agua requerida

Q: Consumo de agua

$S_r$ : Superficie requerida

## 5.8 Análisis económico de las fuentes de carbono

Mediante revisión bibliográfica, se determinó la relación entre el valor de compra asociado a la fuente de carbono por una masa de ácido láctico, usando la Ecuación 5.8.

$$R = \frac{P_f * m_f}{m_{AC}}$$

**Ecuación 5.8:** Costo de consumidor de la fuente de carbono por masa de ácido láctico.

Donde:

R: Precio de la fuente de carbono por unidad de ácido láctico.

P<sub>f</sub>: Precio de la fuente de carbono por unidad de fuente de carbono.

m<sub>f</sub>: Masa estimada de la fuente de carbono.

m<sub>s</sub>: Masa estimada de la producción de ácido láctico

Por último, se estimó el costo en base a la ocupación de suelo de la fuente de carbono a partir de la estimación de las fuentes de carbono del capítulo 5.6, utilizando la Ecuación 5.9

$$C = \frac{C_h * S_r}{m_f}$$

**Ecuación 5.9:** Costo total de la fuente de carbono.

Donde:

C: Costo total de la fuente de carbono.

C<sub>h</sub>: Costo de la fuente de carbono por superficie.

S<sub>r</sub>: Superficie requerida.

m<sub>f</sub>: Masa estimada de la fuente de carbono

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Caracterización de las fuentes de carbono

En las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3 se registró la información de los factores productivos que se requieren para obtener ácido láctico a partir de las fuentes mencionadas en el capítulo 4.2.

**Tabla 6.1:** Factores productivos de la papa.

<b>Criterio</b>	<b>Dato</b>	<b>Referencia</b>
Tasa de producción	994.508 ton/año	ODEPA, 2021c
Disponibilidad	Durante el año	Kramm, 2017

**Tabla 6.2:** Factores productivos de la remolacha azucarera.

<b>Criterio</b>	<b>Dato</b>	<b>Referencia</b>
Tasa de producción	746.272 ton/año	ODEPA, 2021c
Disponibilidad	Entre abril y septiembre	Olfos, 2012; Parada 2006

**Tabla 6.3:** Factores productivos del maíz.

<b>Criterio</b>	<b>Dato</b>	<b>Referencia</b>
Tasa de producción	793.822 ton/año	ODEPA, 2021c
Disponibilidad	Entre diciembre y mayo	Fundación Chile, 2011

En las Tablas 6.4, 6.5 y 6.6 se registró la información de los aspectos ambientales que involucra la producción de las fuentes de carbono mencionadas en el capítulo 4.2.

**Tabla 6.4:** Aspectos ambientales de la producción de la papa.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia</b>
Consumo de agua	450-550	mm	Kramm, 2017
Ocupación de tierra	36.329	ha	ODEPA, 2021c

**Tabla 6.5:** Aspectos ambientales de la producción de la remolacha azucarera.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia</b>
Consumo de agua	4-6	L/m <sup>2</sup>	Infoagro, 2021
Ocupación de tierra	7.197	ha	ODEPA, 2021c

**Tabla 6.6:** Aspectos ambientales de la producción del maíz.

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia</b>
Consumo de agua	5.000-7.000	m <sup>3</sup> /ha	Córdova, 1973
Ocupación de tierra	67.211	ha	ODEPA, 2021c

Para comparar los datos registrados sobre el consumo de agua para cada fuente de carbono, se requiere que los datos estén con la misma unidad de medida, por lo que se realizó la conversión hacia la unidad de litros por metro cuadrado a los datos que estuvieron en otra unidad. Para convertir el consumo de agua en el caso de la producción de papa, se utilizó la definición de un milímetro de agua equivale a un litro de agua en un metro cuadrado, por lo que los valores no cambian. Para convertir el consumo de agua en el caso de la producción de maíz, se utilizó la definición de un metro cúbico por hectárea equivale a 0,1 litros por metro cuadrado, por lo que los valores serán de 500-700 L/m<sup>2</sup>. Luego, se usó un valor promedio del consumo de agua de cada fuente de carbono, debido a que los datos registrados están escritos en rango, por lo que el promedio se obtuvo a partir de los límites de los rangos. En la Tabla 6.7 se observa el promedio del consumo de agua de la producción de cada fuente de carbono.

**Tabla 6.7:** Consumo de agua para la producción de las fuentes de carbono.

<b>Fuente de Carbono</b>	<b>Consumo de agua</b>
Papa	500 L/m <sup>2</sup>
Remolacha azucarera	5 L/m <sup>2</sup>
Maíz	600 L/m <sup>2</sup>

## 6.2 Evaluación de las fuentes de carbono

Al hacer las modificaciones pertinentes de los datos registrados, se procedió a evaluar las fuentes de carbono. Al comparar la tasa de producción del año 2020 de cada fuente de carbono, la papa obtuvo una mayor producción, por lo que se le asignó el puntaje más alto de la escala. En cambio, la remolacha azucarera y el maíz tuvieron una producción baja, pero con una diferencia insignificante para este caso, por lo que se les asigna a ambas fuentes un puntaje inferior al que obtuvo la papa.

En el caso de la disponibilidad, la papa se presenta durante todo el año en Chile, por lo que se le asignó el puntaje más alto de la escala. Por otro lado, la remolacha azucarera y el maíz están presentes durante 6 meses en el año, por lo que se les asignó a ambas fuentes un puntaje inferior al que obtuvo la papa.

Sobre la ocupación de tierra, la superficie del cultivo de la remolacha azucarera en el 2020 fue inferior que las otras fuentes, por lo que se le asignó el puntaje más alto de la escala. En cambio, la superficie para cultivar el maíz fue superior que las otras fuentes, por lo que obtuvo el puntaje más bajo.

Por último, sobre el consumo de agua, la remolacha azucarera requiere menor cantidad de agua en comparación a las otras fuentes, por lo que se le asignó el puntaje más alto de la escala. Por otro lado, la papa y el maíz requieren mayor cantidad de agua, pero con una diferencia muy baja entre estas fuentes de carbono, por lo que se les asigna a ambas fuentes un puntaje inferior al que obtuvo la remolacha azucarera.

En la Tabla 6.8 se observa la puntuación asignada para cada fuente de carbono en cada criterio y el puntaje total para cada fuente. La papa y la remolacha obtuvieron puntajes similares y más alto en comparación al maíz, por lo que se siguió analizando estas dos fuentes.

**Tabla 6.8:** Puntuación de las fuentes de carbono.

<b>Criterio</b>	<b>Papa</b>	<b>Remolacha azucarera</b>	<b>Maíz</b>
Tasa de producción	3	2	2
Disponibilidad	3	2	2
Consumo de agua	2	3	2
Ocupación de tierra	2	3	1
<b>TOTAL</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>7</b>

## 6.3 Identificación de los parámetros para la fermentación de ácido láctico

### 6.3.1 Parámetros para la fermentación de ácido láctico a partir de la remolacha azucarera

Para el caso de la remolacha azucarera, se encontraron tres trabajos, en los cuales utilizaron subproductos de esta fuente de carbono para la fermentación de ácido láctico. En el trabajo de Alves de Oliveira *et al.* (2020) utilizaron azúcar hidrolizado proveniente de la pulpa de la remolacha para producir ácido láctico. En el trabajo de Calabia y Tokiwa (2007) se comparó la producción de ácido láctico entre tres fuentes de carbono distintas, melaza de caña de azúcar, jugo de caña de azúcar y jugo de remolacha azucarera. Finalmente, en el trabajo de Mladenović *et al.* (2016) se trabajó la vinaza de destilería y la melaza de remolacha azucarera por separado y juntos, con el fin de analizar la producción de ácido láctico para cada caso. En la Tabla 6.9 se registró la información sobre los parámetros que se usaron en los trabajos para la fermentación de ácido láctico utilizando el azúcar proveniente de los subproductos de la remolacha azucarera

**Tabla 6.9:** Parámetros para la fermentación de ácido láctico a partir de subproductos de la remolacha azucarera.

Subproducto	Microorganismo	pH	Temperatura	Referencia
Pulpa de remolacha	<i>B. coagulans</i>	6	52 °C	Alves de Oliveira <i>et al.</i> , 2020
Jugo de remolacha	<i>L. delbrueckii</i>	6	40 °C	Calabia & Tokiwa, 2007
Melaza de remolacha	<i>L. paracasei</i>	-	37 °C	Mladenović <i>et al.</i> , 2016

### 6.3.2 Parámetros para la fermentación de ácido láctico a partir de la papa

Para el caso de papa, se encontraron tres trabajos, en los cuales utilizaron el almidón hidrolizado para la fermentación de ácido láctico. En el trabajo de Smerilli *et al.* (2015) se comparó la producción de ácido láctico a partir del almidón proveniente de papa cruda y de residuos de papa usando una cepa microbiana termófila. En el trabajo de Vishnu *et al.* (2002) se comparó la producción de ácido láctico a partir de una variedad de almidones, tales como el almidón de papa, maíz o de harina trigo. Por último, en el trabajo de Anuradha *et al.* (1999) se fermentó el almidón de papa considerando el proceso de sacarificación y fermentación por separado y combinados para determinar que procedimiento permite una óptima producción de ácido láctico. En la Tabla 6.10 se registró la información sobre los parámetros que se usaron en los trabajos para la fermentación de ácido láctico utilizando el almidón hidrolizado de la papa.

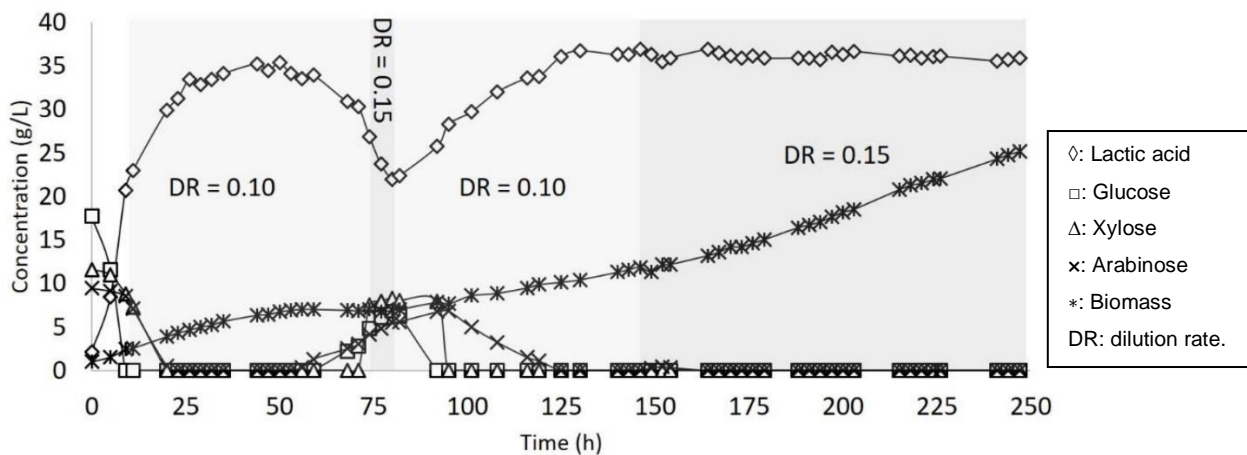
**Tabla 6.10:** Parámetros para la fermentación de ácido láctico a partir de subproductos de la papa.

Subproducto	Microorganismo	pH	Temperatura	Referencia
Almidón de papa cruda	<i>Geobacillus stearothermophilus</i> DSM 494	7	60 °C	Smerilli <i>et al.</i> , 2015
Almidón de papa cruda	<i>L. amylophilus</i> GV6	-	-	Vishnu <i>et al.</i> , 2002
Almidón de papa desechada	<i>L. delbrueckii</i> NCIM 2365	5,5	45 °C	Anuradha <i>et al.</i> , 1999

## 6.4 Estimación de la productividad de ácido láctico

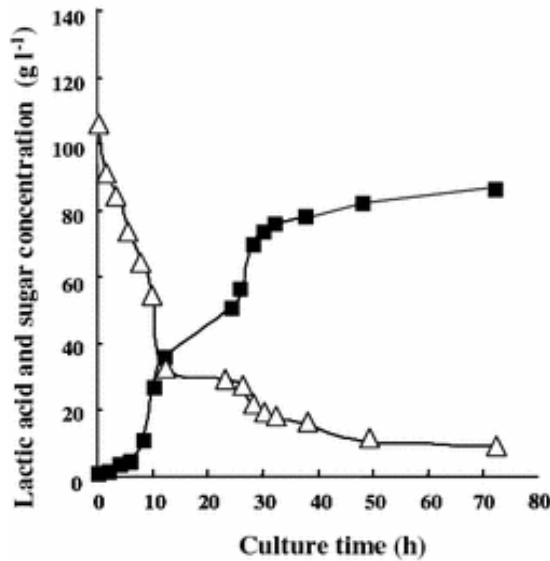
### 6.4.1 Productividad de ácido láctico con la remolacha azucarera

En el trabajo de Alves de Oliveira *et al.* (2020) se hidrolizó la pulpa de remolacha azucarera, con el fin de fermentar por 250 horas el azúcar obtenido. Como resultado se obtuvo que no quedó ningún residuo de azúcar hidrolizado. En la Figura 6.1 se observa la concentración de ácido láctico producido el tiempo en que se realizó la fermentación.



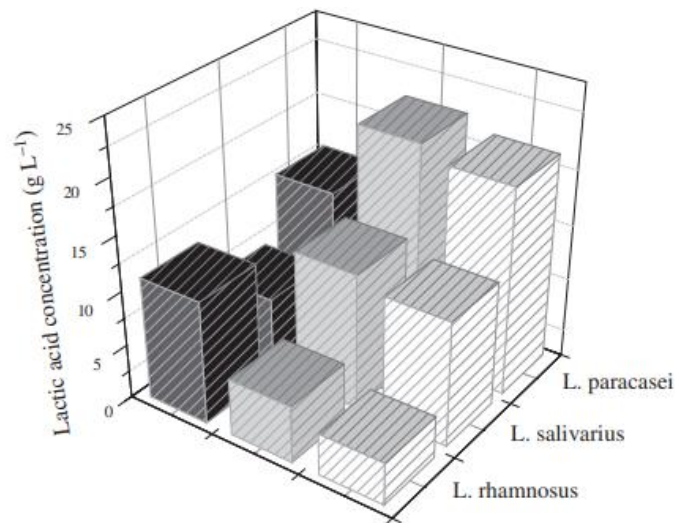
**Figura 6.1:** Producción de ácido láctico a partir de la fermentación del azúcar hidrolizado de la pulpa de remolacha (Adaptado de Alves de Oliveira *et al.*, 2020).

En el trabajo de Calabia y Tokiwa (2007) no se pretrataron los subproductos para obtener azúcar hidrolizada, por lo que la fermentación se realizó con la concentración de azúcar presente en cada subproducto. En la Figura 6.2 se observa la concentración de ácido láctico producido y el azúcar consumido durante el tiempo de la fermentación.



**Figura 6.2:** Producción de ácido láctico (■) a partir de la fermentación del azúcar presente (Δ) en el jugo de la remolacha azucarera (Calabia & Tokiwa, 2007).

En el trabajo de Mladenović *et al.* (2016) se seleccionó la cepa bacteriana que obtuvo una mayor producción de ácido láctico a partir de tres cepas distintas, donde cada cepa se cultivó en distintos medios (sacarosa, melaza de remolacha azucarera y vinaza). En la Figura 6.3 se observa la concentración de ácido láctico obtenido por las tres cepas bacterianas y en los distintos medios de cultivo.



**Figura 6.3:** Producción de ácido láctico por *L. paracasei*, *L. salivarius* y *L. rhamnosus* en presencia de MRS/sacarosa (barra blanca), MRS/melaza de remolacha (barra gris) y MRS/vinaza (barra negra) como sustrato (Mladenović *et al.*, 2016).

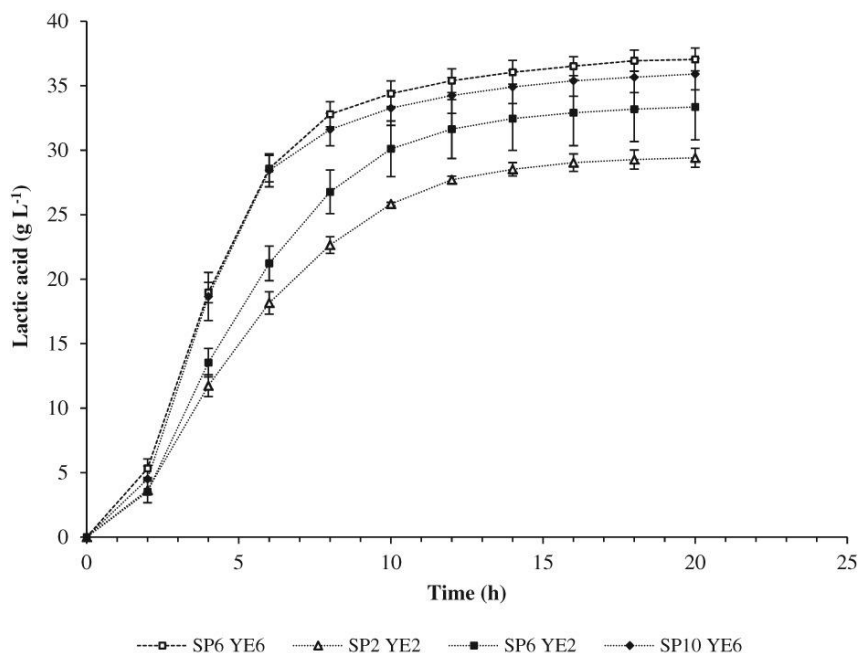
En la Tabla 6.11 se registró la información de la cantidad o concentración del sustrato inicial, la cantidad o concentración de ácido láctico producido y el tiempo final de la fermentación para cada subproducto de la remolacha azucarera.

**Tabla 6.11:** Sustrato inicial, ácido láctico y tiempo de fermentación para los subproductos de la remolacha azucarera.

Subproducto	Sustrato inicial	Ácido Láctico	Tiempo	Referencia
Pulpa de remolacha	3916,91 g	2781,01 g	250 h	Alves de Oliveira <i>et al.</i> , 2020
Jugo de remolacha	105 g/L	1,16 g/L h	72 h	Calabia & Tokiwa, 2007
Melaza de remolacha	25 g/L	20 g/L	48 h	Mladenović <i>et al.</i> , 2016

#### 6.4.2 Productividad de ácido láctico con la papa

En el trabajo de Smerilli *et al.* (2015) el almidón hidrolizado de la papa cruda se fermentó en diferentes concentraciones de peptona de soya y extracto de levadura, con el fin de optimizar la producción de ácido láctico. En la Figura 6.4 se observa la producción de ácido láctico a distintas concentraciones de peptona de soya (SP) y extracto de levadura (YE), donde la concentración SP6 YE6 (6 g/L de peptona de soya y 6 g/L de extracto de levadura) obtuvo la mayor concentración de ácido láctico.



**Figura 6.4:** Producción de ácido láctico a distintas concentraciones de peptona de soya y extracto de levadura (Smerilli *et al.* 2015).

En el trabajo de Vishnu *et al.* (2002) se comparó la producción de ácido láctico a partir de una variedad de almidones y en distintas concentraciones. En la Tabla 6.12 se observa tres tipos de almidón y en distintas concentraciones, donde se obtuvo que durante menos tiempo se fermentó el almidón hidrolizado y menor fue la concentración de sustrato, mayor fue el rendimiento de ácido láctico

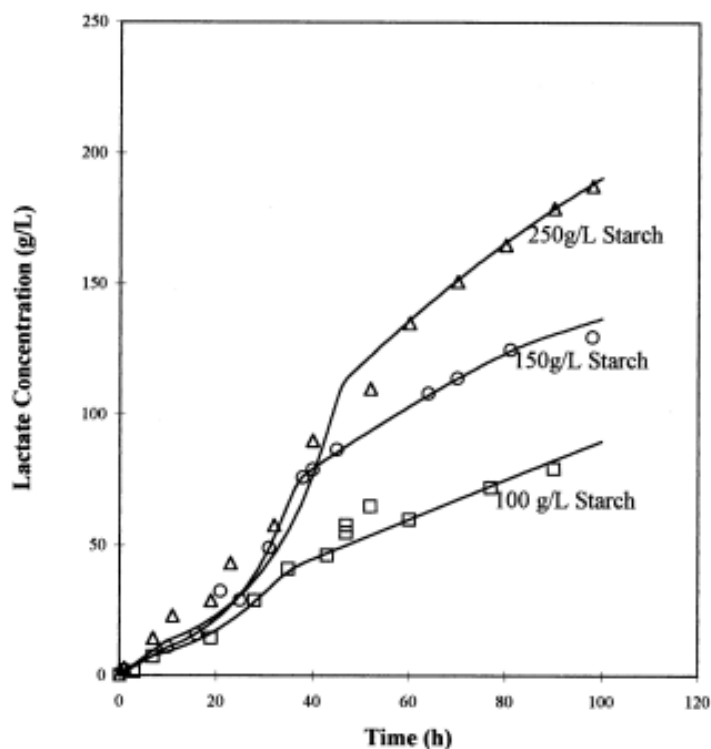
**Tabla 6.12:** Producción de ácido láctico a partir de distintos sustratos de almidón (Vishnu *et al.* 2002).

Substrate conc (g/l)	Fermentation time (days)	Substrate degraded (g/l)	Lactic acid produced (g/l)	Lactic acid yield (g/g) <sup>a</sup>
<b>Soluble starch</b>				
10	2	10.0	9.6	0.96
40	3	38.5	35.6	0.93
70	3	67.5	61.0	0.90
100	4	83.3	75.7	0.89
CD at 5%	–	3.3	4.6	0.03
<b>Corn starch</b>				
10	2	9.4	8.8	0.94
40	3	37.6	32.6	0.89
70	4	58.1	49.1	0.85
100	5	50.1	39.2	0.78
CD at 5%	–	2.0	6.6	0.02
<b>Potato starch</b>				
10	2	9.5	8.7	0.92
40	3	35.9	32.0	0.89
70	4	46.5	40.0	0.85
100	6	47.0	38.1	0.81
CD at 5%	–	1.6	4.9	0.02

CD at 5% – confidence difference was arrived at 5% level of significance for comparison of any combination of two mean values.

<sup>a</sup> g/g – gram lactic acid per gram substrate utilized.

En el trabajo de Anuradha *et al.* (1999) se fermentó el almidón de papa a distintas concentraciones aplicando la sacarificación y fermentación simultáneamente. En la Figura 6.5 se observa la concentración de ácido láctico en concentraciones iniciales distintas del almidón según el modelo experimental y predictivo.



**Figura 6.5:** Comparación del modelo experimental y predictivo de la producción de ácido láctico durante la sacarificación y fermentación simultánea (Anuradha *et al.*, 1999)

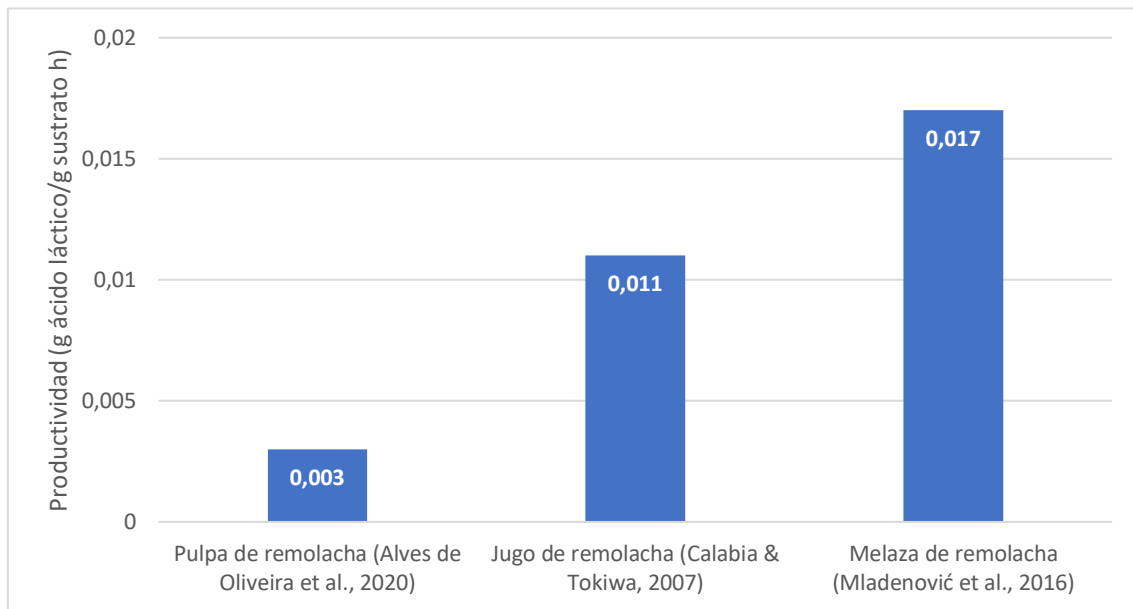
En la Tabla 6.13 se registró la información de la cantidad o concentración del sustrato inicial, la cantidad o concentración de ácido láctico producido y el tiempo final de la fermentación en base al almidón de la papa

**Tabla 6.13:** Sustrato inicial, ácido láctico y tiempo de fermentación para los subproductos de la papa.

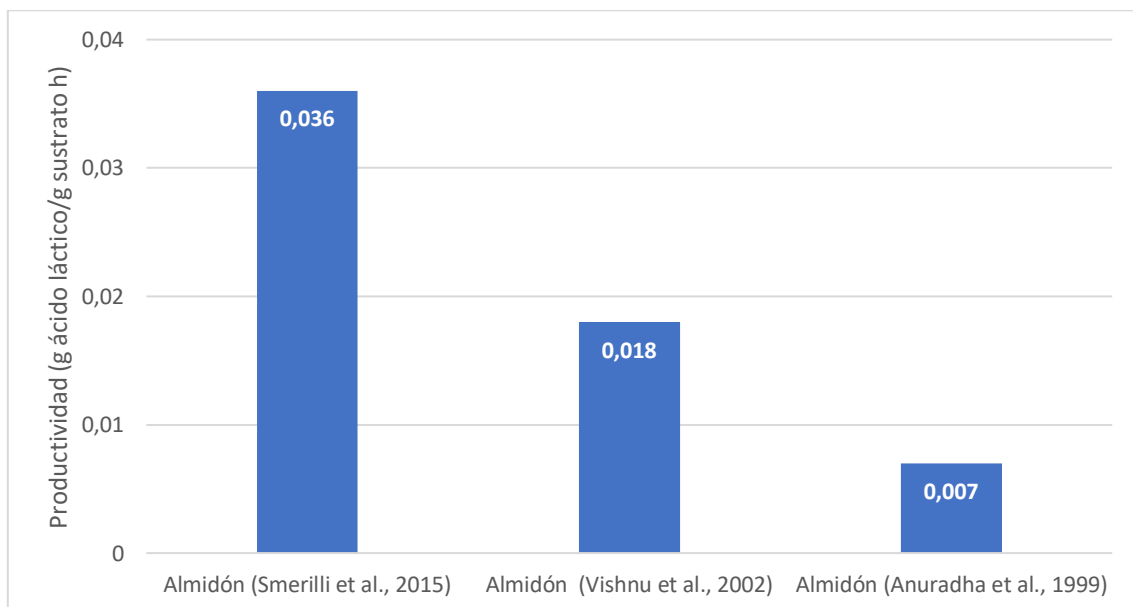
Subproducto	Sustrato inicial	Ácido Láctico	Tiempo	Referencia
Almidón de papa cruda	50 g/L	1,8 g/L h	20 h	Smerilli <i>et al.</i> , 2015
Almidón de papa cruda	10 g/L	8,7 g/L	2 días	Vishnu <i>et al.</i> , 2002
Almidón de papa	250 g/L	1,87 g/L h	100 h	Anuradha <i>et al.</i> , 1999

### 6.4.3 Productividad de las fuentes de carbono

Para obtener la productividad, se dividió la masa o la concentración del ácido láctico por el producto entre la masa o la concentración del sustrato inicial por el tiempo de fermentación. Para obtener la productividad cuando la concentración de ácido láctico está en función del tiempo, solo se dividió aquel valor por la unidad de sustrato inicial. En las Figuras 6.6 y 6.7 se observa la productividad en base a los subproductos de las fuentes de carbono.



**Figura 6.6:** Productividad de los subproductos de la remolacha azucarera.



**Figura 6.7:** Productividad del almidón de la papa.

## 6.5 Estimación de la producción de las fuentes de carbono

Se estimó la cantidad de ácido láctico requerido para abastecer la demanda de plástico a partir de PLA. En la Tabla 6.14 se observan los datos relevantes que se requirieron para obtener la estimación correspondiente de ácido láctico.

**Tabla 6.14:** Estimación de la producción de PLA y ácido láctico (AL)

Volumen PLA (m <sup>3</sup> )	Masa de PLA (ton)	Masa de AL (ton)
373.330	467.409	725.419

Para estimar la cantidad de fuentes de carbono requerida a partir de la masa de ácido láctico que se observó en la Tabla 6.15, se consideró la productividad más baja y alta para cada fuente de carbono, como se observaron en las Figuras 6.6 y 6.7, con el fin de considerar un caso optimista y uno pesimista en la productividad. En la Tabla 6.15 se observa la cantidad estimada de sustrato inicial proveniente del subproducto de la remolacha azucarera, la cantidad estimada de subproducto de remolacha azucarera y la cantidad estimada de remolacha azucarera, los cuales permitirían obtener la masa estimada de ácido láctico. En el Anexo 2 se aprecian los datos utilizados para estimar la cantidad de remolacha azucarera y los cálculos realizados para los resultados de la Tabla 6.15.

**Tabla 6.15:** Estimaciones de sustrato inicial, subproducto y producto de remolacha azucarera.

Productividad	Rendimiento	Sustrato Inicial (ton)	Subproducto de la remolacha azucarera (10 <sup>6</sup> ton)	Masa de remolacha azucarera (10 <sup>6</sup> ton)
Optimista	80%	906.773	1,62	35,90
Pesimista	71%	1.021.715	283,18	5.720,82

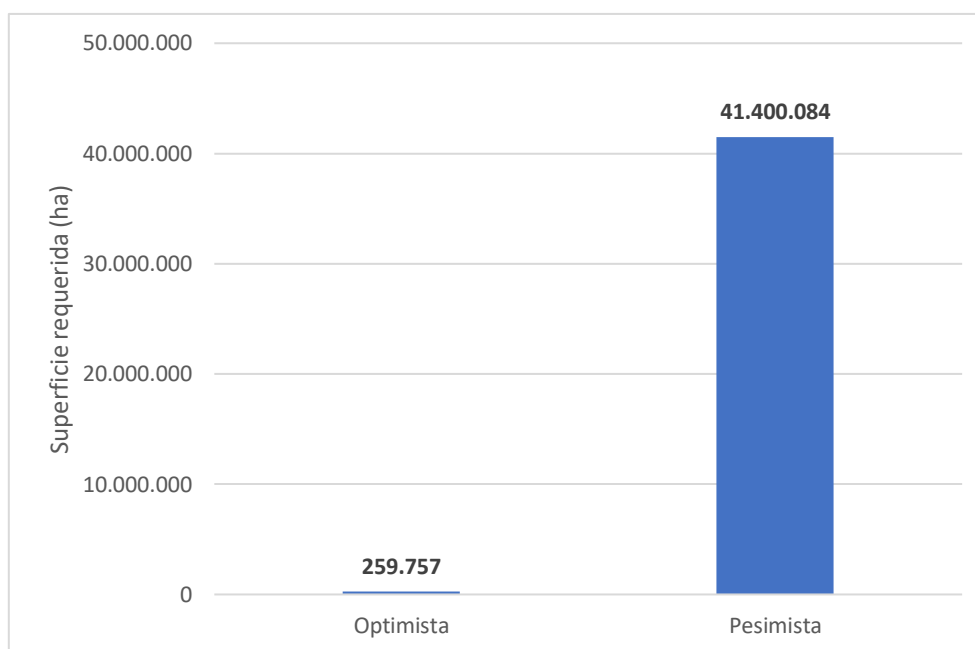
En la Tabla 6.16 se observan la cantidad estimada de sustrato almidón y la cantidad estimada de papa, los cuales permitirían obtener la masa estimada de ácido láctico. En el Anexo 2 se aprecian los datos utilizados para estimar la cantidad de papa y los cálculos realizados para los resultados de la Tabla 6.16

**Tabla 6.16:** Estimaciones de almidón y papa.

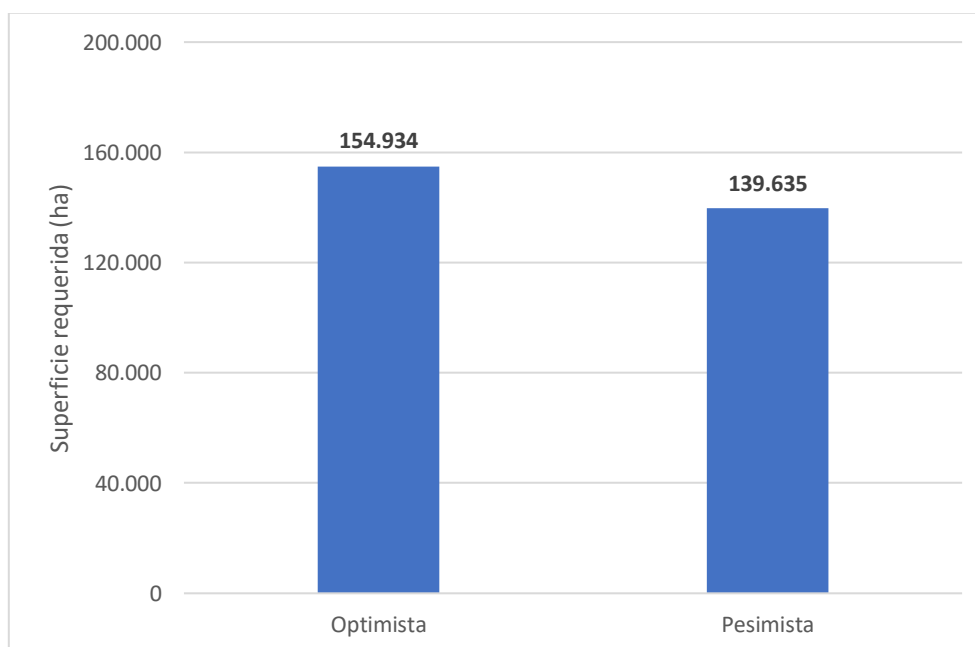
Productividad	Rendimiento	Almidón (ton x 10 <sup>6</sup> )	Producto (ton x 10 <sup>6</sup> )
Optimista	72%	1,008	4,241
Pesimista	75%	0,908	3,823

## 6.6 Estimación de los aspectos ambientales de las fuentes de carbono

Se estimó la ocupación de terreno que se debería utilizar para satisfacer la producción estimada de cada fuente de carbono seleccionada. En las Figuras 6.8 y 6.9 se presentan los valores obtenidos para la remolacha azucarera y la papa, respectivamente.

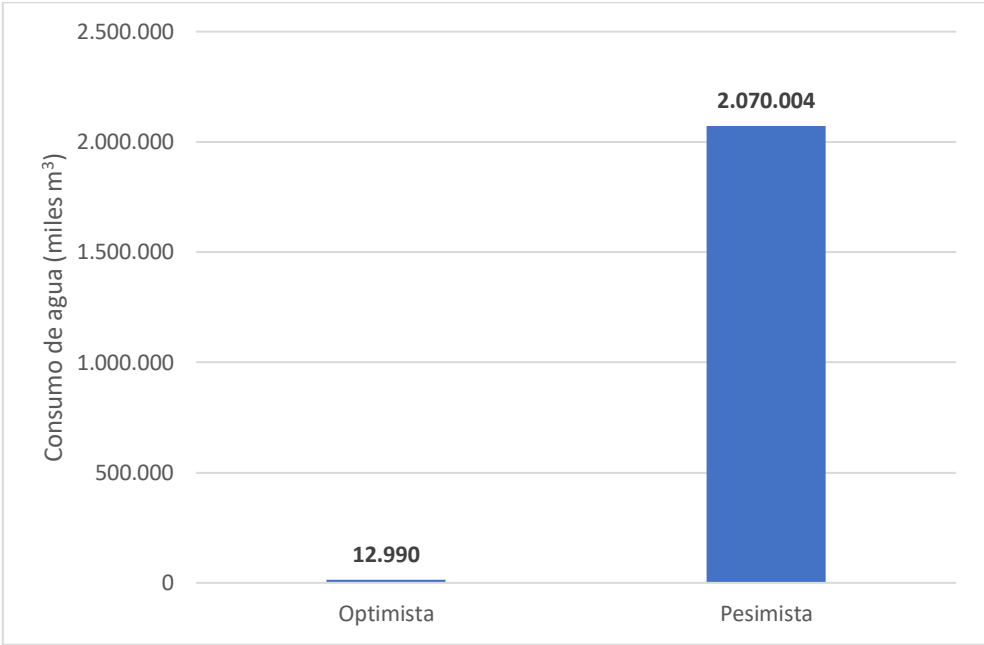


**Figura 6.8:** Superficie requerida para la producción de remolacha azucarera.

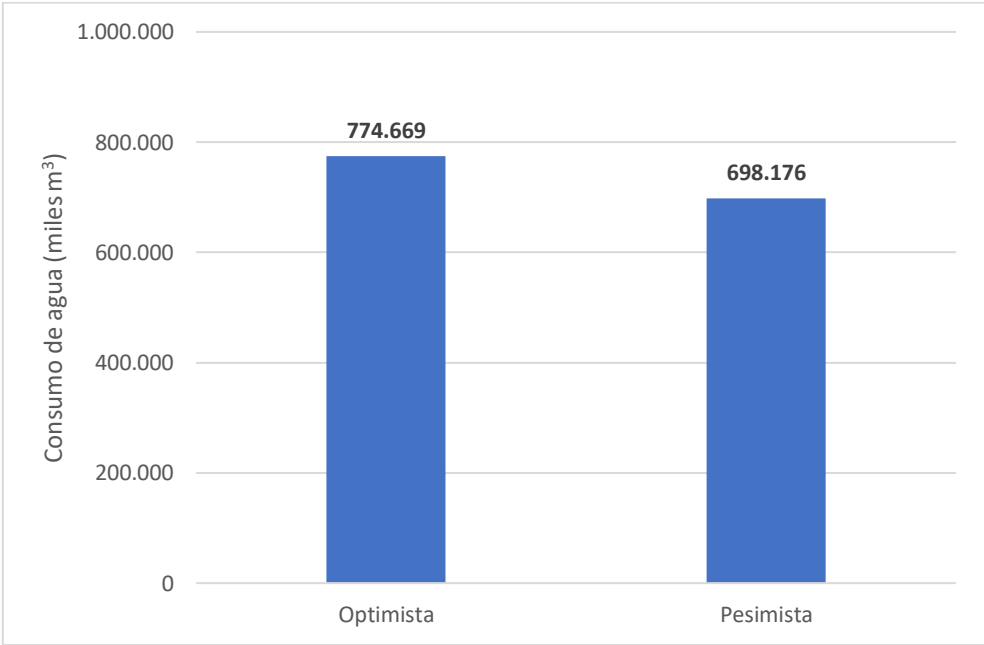


**Figura 6.9:** Superficie requerida para la producción de papa.

Se estimó el consumo de agua que se debería utilizar para satisfacer la producción de cada fuente de carbono seleccionada. En las Figuras 6.10 y 6.11 se presentan los valores obtenidos para la remolacha azucarera y la papa, respectivamente.



**Figura 6.10:** Consumo de agua requerida para la remolacha azucarera.



**Figura 6.11:** Consumo de agua requerida para la papa.

## 6.7 Estimación de los aspectos económicos de las fuentes de carbono

Se determinó la relación entre el costo de compra de la fuente de carbono por una unidad de masa de ácido láctico estimada. En las tablas 6.17 y 6.18 se observan la relación para la remolacha azucarera y la papa, respectivamente.

**Tabla 6.17:** Precio de la remolacha azucarera por unidad de ácido láctico.

Productividad	Precio de la remolacha azucarera (\$/kg)	Costo de compra de la remolacha azucarera por masa de ácido láctico (\$/kg)
Optimista	32	1.584
Pesimista		252.359

**Tabla 6.18:** Precio de la papa por unidad de ácido láctico.

Productividad	Precio de la papa (\$/kg)	Costo de compra de la papa por masa de ácido láctico (\$/kg)
Optimista	378	2.208
Pesimista		1.990

Se estimó el costo asociado por unidad de tierra ocupada para cada fuente de carbono, a partir de la ocupación de tierra estimada en el capítulo 6.6. En las Tablas 6.19 y 6.20 se observan el costo por terreno en el año 2021 para cada fuente de carbono.

**Tabla 6.19:** Costo de la producción de la remolacha azucarera.

Productividad	Costo de superficie (\$/ha)	Costo total por masa de remolacha azucarera (\$/kg)
Optimista	2.712.375	777
Pesimista		109.905

**Tabla 6.20:** Costo de la producción de la papa.

Productividad	Costo de superficie (\$/ha)	Costo total por masa de papa (\$/kg)
Optimista	5.254.930	192
Pesimista		

## 7 DISCUSIÓN

### 7.1 Factores productivos

La tasa de producción anual y la superficie de ocupación de tierra que se utilizó para caracterizar a cada fuente de carbono, correspondió a la producción y superficie de las fuentes de carbono en el año 2020. Esta decisión se tomó debido a que estos factores no se mantienen constante cada año y, además, no hay una relación constante anual entre la producción y la superficie para cada fuente de carbono. En las figuras 4.4 y 4.5 se observa como la producción y la superficie de papa y remolacha azucarera varía cada año y no se puede establecer una relación anual constante, en cambio, en la figura 4.6 se aprecia una relación cercana entre la producción y la superficie del maíz durante cada año.

La disponibilidad de las fuentes de carbono es un factor que actualmente es más estable en el transcurso de los años ya que las fechas de sembrado y cosecha se establecen por las temporadas. Sin embargo, se debe evitar cosechar cuando llueve o cuando el suelo está muy húmedo (en el caso de los tubérculos), lo cual modifica el período de la cosecha (Kramm, 2017). En el año 2011 se presentó una primavera lluviosa, por lo que se aplazó la siembra de remolacha azucarera en 15 días, lo cual aplazó también la cosecha de ésta (Olfos, 2012). Debido a que el cambio climático está causando períodos más largos de altas temperaturas y sequías, se ha sugerido cambiar las fechas de siembra y cosecha de los cultivos, con el fin de que aquellos factores no perjudiquen a las fuentes de carbono (Schafleitner *et al.*, 2011).

El consumo de agua es un factor importante para la producción de las fuentes de carbono, debido a que el agua permite el traslado de los nutrientes presentes en el suelo hacia las raíces de las fuentes de carbono (Kramm, 2017). La forma más natural para que el suelo mantenga su humedad es gracias a las precipitaciones, fenómeno que influye directamente en el sector agrícola (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2017). En la figura 4.7 se observó que Chile se está enfrentando a un déficit de precipitaciones, lo cual afecta directamente la producción de las fuentes de carbono e incentiva al aumento del caudal para riego, con el fin de mantener la humedad del suelo. En base a esto, se estaría aumentando la huella hídrica azul en la agricultura del país, debido a que se usaría mayor cantidad de agua de riego, la cual proviene principalmente de aguas superficiales y/o subterráneas, para mantener las condiciones de humedad del suelo, factor elemental en la producción de las fuentes de carbono (Hoekstra *et al.*, 2011; Kramm, 2017).

En base a la evaluación que se aplicó a cada fuente de carbono según los factores productivos y aspectos ambientales, se destacó que la superficie y la producción de las fuentes de carbono son factores que están en constante cambio, como se observó en las figuras 4.4, 4.5 y 4.6. Por ende,

si se realiza una evaluación similar a las fuentes de carbono en distintos años, se obtendrían resultados distintos. En este caso, se descartó el maíz para las actividades que se realizaron después de la evaluación de las fuentes de carbono, no obstante, esta fuente de carbono podría no descartarse en un futuro, si aumenta su producción y/o disminuye la ocupación de suelo en comparación a las otras fuentes de carbono.

## 7.2 Factores fermentativos

En las tablas 6.9 y 6.10 se presentaron los microorganismos encargados de la producción de ácido láctico, de las cuales tres trabajos utilizaron a bacterias del género *Lactobacillus* para obtener ácido láctico. En cambio, Alves de Oliveira (2020) utilizó *B. coagulans*, la cual realiza el método homofermentativo para obtener ácido láctico, y Smerilli *et al.* (2015) utilizó la *G. stearothermophilus DSM 494*, una bacteria de gram positiva que tiene como característica la actividad amilasa, por la cual sintetiza carbohidratos en monómero de pentosa o hexosa, para luego obtener ácido láctico. En el caso de Liang *et al.* (2014) se utilizó un cultivo mixto con el fin de minimizar los factores fermentativos que se tendrían que utilizar para solo una cepa microbiana.

En base al pH que se registró en las tablas 6.9 y 6.10, se observó que en los trabajos donde se controló el pH para la fermentación, presentaron de un rango de 6 y 7, el cual está dentro de las observaciones que hizo Kashket (1987), donde se muestra que el rango de pH adecuado para la fermentación están entre 5 y 7. En los trabajos de Mladenović *et al.* (2016) y Vishnu *et al.* (2002) no hay registros del pH durante la fermentación, debido a que no se controló el pH durante el proceso. Al no controlar el pH en la fermentación, la actividad bacteriana se va alterando, por ejemplo, cuando el pH del medio es bajo, causa que la gradiente de pH este en contra a lo establecido por las células entre el medio extracelular e intracelular, para mantener la homeostasis de pH (Hartley & Shama, 1987; San Martín *et al.*, 1993).

La temperatura de fermentación registradas en las tablas 6.9 y 6.10, estuvieron entre los valores de 37°C y 60°C, excepto en el trabajo de Vishnu *et al.*, (2002), donde no se controló aquel parámetro. En el trabajo de Liang *et al.* (2014) se fermentó azúcar hidrolizado de la cáscara de papa a 20°C, 35°C y 50°C, con el fin de encontrar una temperatura óptima para obtención el mayor rendimiento de ácido láctico. En este caso, la temperatura que favoreció y desfavoreció el rendimiento de ácido láctico fue de 35°C y 50°C, respectivamente. En cambio, en el trabajo de Smerilli *et al.* (2015) la temperatura de fermentación fue de 60°C, debido a que las bacterias del género *Geobacillus* son termófilas. Por lo que se debe considerar un rango óptimo de temperatura para cada especie bacteriana durante la fermentación, con el fin de mejorar el rendimiento del proceso.

### **7.3 Productividad de Ácido Láctico**

En base a la productividad calculada, se aprecia que la productividad más alta, tanto para la remolacha azucarera como para la papa, se debe a que el tiempo de fermentación fue menor que los otros casos. En el trabajo de Alves de Oliveira *et al.* (2020), se fermentó el azúcar hidrolizado de la pulpa de la remolacha durante 150 horas para obtener un mayor rendimiento, donde su productividad máxima y media de ácido láctico fue de 18,06 g/(L h) y 0,21 g/(L h), por lo que se apreció que no se detuvo la fermentación cuando se alcanzó la productividad máxima, lo cual implica un mayor gasto de recursos. Para el caso de la producción de ácido láctico como precursora de PLA, se debe considerar la productividad máxima de ácido láctico antes que el máximo rendimiento de la fermentación, debido a que, si se extiende el tiempo de fermentación, lo cual aumenta el uso de recursos que se requieren para mantener el proceso por más tiempo.

Al obtener la productividad de ácido láctico para este trabajo, no se consideró tomar un promedio entre los tres trabajos para representar la productividad de cada fuente de carbono, debido a que, para cada fuente de carbono, los valores obtenidos de los tres trabajos no eran muy cercanos entre sí. Además, en el caso de la remolacha azucarera, los tres trabajos utilizaron distintos subproductos de esta fuente de carbono (melaza, jugo y pulpa) para la fermentación hacia ácido láctico, por lo que no se consideró correcto promediar valores donde los subproductos fueron distintos.

## **7.4 Fuentes de carbono**

Como se mencionó al inicio del trabajo, el PLA tiene gran potencial para sustituir ciertos tipos de plásticos convencionales, pero en este trabajo se consideró que el PLA fuera un sustituto del plástico PE por dos razones. Una de esas razones tiene relación con lo que se observó en la figura 4.1, donde el PE fue el tipo de plástico que más se consumió a nivel nacional en el año 2020, por lo que se debe considerar como el primer plástico que se debe disminuir su consumo al utilizar el PLA como sustituto de los productos que están hechos por PE. La otra razón se debe a las leyes que están publicadas en el Diario Oficial, las cuales restringen o prohíben el uso de productos hechos por PE (Ministerio de Medio Ambiente, 2018; Ministerio de Medio Ambiente, 2021), porque se debe considerar productos que respeten estas leyes, por ejemplo, productos hechos de PLA. No obstante, los productos PE siguen siendo más accesibles económicamente que los productos biodegradables, incluso se espera que a futuro los productos biodegradables suban más de precio (Magazine plástico, 2020), por lo que no es viable sustituir los productos hechos de PE por PLA de forma drástica.

En las tablas 6.16 y 6.17, la cantidad de remolacha azucarera y de papa requerida para producir ácido láctico, en base a la estimación de PLA requerido, sobrepasan la producción del año agrícola 2020. La cantidad que se estimó de la remolacha azucarera para el caso optimista y pesimista corresponde a 36 y 5760 veces de la producción nacional de la remolacha azucarera del año 2020, respectivamente. Esta gran diferencia se debe a que la relación entre sustrato y subproducto utilizado en el caso de la productividad pesimista es muy baja al compararlo con la relación al caso de la productividad optimista (Anexo 2). La cantidad que se estimó de papa para el caso optimista y pesimista corresponde a 4,3 y 4,1 veces de la producción nacional de papa del año 2020, respectivamente.

## **7.5 Aspectos ambientales**

En la figura 6.3 y 6.4 se apreció la superficie que se requeriría para producir la cantidad estimada para producir ácido láctico a partir de la remolacha azucarera y la papa, respectivamente, en donde se observó una gran diferencia de la superficie requerida entre la productividad optimista y pesimista usando subproductos de la remolacha azucarera. En el caso de la papa, se apreció que la diferencia de la superficie requerida entre la productividad optimista y pesimista es mínima, en comparación a la diferencia de superficie requerida entre los subproductos de la remolacha azucarera.

La superficie de Chile continental e insular está estimada en 756.626 km<sup>2</sup> (UCEN, 2021), lo que equivale a 75.662.600 ha. Al comparar la superficie de Chile continental e insular con las superficies estimadas, se apreció que la superficie estimada de la productividad pesimista de la remolacha azucarera equivale a un 54,7% de la superficie de Chile. En el caso de la papa, ambos casos de productividad dieron un resultado de 0,2% sobre la superficie de Chile continental e insular. Sin embargo, no toda la superficie de Chile es apta para el cultivo de fuentes de carbono, según ODEPA (2019) se estimó que la tierra potencial para actividades silvoagropecuaria es de 31.635.041 ha, lo que equivale a 41,8 % de la superficie de Chile. Al comparar la superficie potencial con las superficies estimadas, se observó que la superficie estimada en el caso de la productividad pesimista de la remolacha azucarera equivale a un 130,9% de la superficie potencial, lo cual supera la capacidad disponible. No obstante, la superficie estimada de la papa, en ambos casos de productividad, corresponde a 0,5% de la superficie potencial para cultivo.

Al comparar el consumo de agua de las fuentes de carbono, se observó que el consumo de agua en el caso de la productividad optimista de la remolacha azucarera fue menor que el resto de los otros casos. No obstante, la productividad pesimista de la remolacha azucarera dio un valor superior que al resto de los casos. Entre los años 2016 y 2020 se ha presentado un aumento en el número de decretos de escasez hídrica en Chile, llegando a 33 decretos en el año 2020, lo cual indica que cada vez hay más zonas en el país donde el uso de agua ha sido mal gestionado, lo cual afecta a ciertas actividades como la agricultura, sector que consume mayor cantidad de agua a nivel nacional (Morales, 2021). Por lo que se debe considerar fuentes de carbono donde su consumo de agua sea bajo, con el fin de no aumentar la demanda de agua.

## **7.6 Análisis económico**

Al comparar la relación entre el costo del producto y la cantidad de ácido láctico en los casos de productividad entre la remolacha azucarera y la papa, se observa que el caso optimista de la remolacha azucarera presenta un menor costo para producir la misma unidad de ácido láctico. No obstante, el caso pesimista de la remolacha azucarera presenta el mayor costo para producir una unidad de ácido láctico. En Indiamart el kilogramo de ácido láctico está a \$1454 <sup>2</sup>, cuyo valor es inferior al compararlo con el precio de venta de la remolacha azucarera por kilogramo de ácido láctico del caso optimista. Aunque el valor obtenido es cercano al precio de venta, el precio de la remolacha azucarera forma parte de los costos que se asocian al precio de venta del ácido láctico, por lo que no sería competitivo usar esta fuente de carbono para producir ácido láctico en base a la productividad optimista de la remolacha azucarera. En base a los costos relacionados con la

---

<sup>2</sup> <https://www.indiamart.com/proddetail/lactic-acid-18807628855.html> [revisado: 14 de noviembre 2021]

producción de las fuentes de carbono, se observó que la producción de papa, para ambos casos de la productividad, se obtuvo un costo inferior en comparación con la remolacha azucarera.

## **7.7 Propuesta de fuente de carbono**

En base los análisis realizados, se ha considerado que la papa sería la fuente de carbono más adecuada para la producción de ácido láctico. Si se compara con la remolacha azucarera, la papa requiere menor superficie de cultivo para producir ácido láctico y los costos de producción son bajos. No obstante, en el caso de la productividad optimista de la remolacha azucarera requirió menos consumo de agua y presentó un menor valor entre la relación entre costo de compra por unidad de ácido láctico. Sin embargo, para tomar la decisión, se dio menos importancia al análisis económico entre el costo de compra por unidad de ácido láctico, debido a que los precios varían debido a factores del mercado (Rivas & Tapia, 2012), y no de la producción de ácido láctico.

## 8 CONCLUSIONES

Fue posible seleccionar dos fuentes de carbonos con características adecuadas para producir ácido láctico, identificándose a la papa y a la remolacha azucarera como los más adecuados, debido a que obtuvieron un mayor puntaje en la evaluación de las fuentes de carbono. Se descartó el maíz debido a que sus aspectos productivos y ambientales no eran adecuados para considerarlo como una fuente de carbono para la producción de ácido láctico.

Para cada fuente de carbono seleccionada, se estimó la productividad del ácido láctico a partir de la identificación de los parámetros de la fermentación. Se obtuvieron tres estimaciones de productividad por cada fuente de carbono, por lo que se consideró utilizar la productividad más alta y baja de cada fuente de carbono para las siguientes actividades.

Se estimó la producción de ácido láctico requerido para producir PLA, al considerar este material como sustituto del consumo de PE a nivel nacional en el año 2020.

A partir de la estimación de producción de ácido láctico, se determinó el consumo de agua, la superficie de cultivo, el costo de producción y el costo de compra para cada fuente de carbono seleccionada. Al final, se despreció el análisis de costo de compra de la fuente carbono para proponer una fuente de carbono ideal para la producción de ácido láctico.

En base al análisis ambiental y económico realizado para las fuentes de carbono seleccionada, se propuso a la papa como una fuente de carbono ideal para la fermentación hacia ácido láctico, debido a que requiere menor superficie para su producción y presenta menores costos en la producción.

Este trabajo tiene como fin mostrar la importancia de estudiar las materias primas que se utilicen en la producción de bioplásticos, como el PLA. Si se llegará a producir una gran cantidad de productos hechos por PLA, con el fin de equipararlo con el consumo de plástico convencional en Chile, se verán afectados ciertos aspectos como el consumo de agua, siendo un recurso que cada vez se encuentre escaso en el país.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

Alves de Oliveira R, Schneider R, Hoss Lunelli B, Vaz Rossell CE, Maciel Filho R, Venus J. A Simple Biorefinery Concept to Produce 2G-Lactic Acid from Sugar Beet Pulp (SBP): A High-Value Target Approach to Valorize a Waste Stream. *Molecules*. 25(9):2113, 2020.

Amado, A. SÍNTESIS, PROPIEDADES y APLICACIÓN DEL ÁCIDO POLILÁCTICO APARTIR DEL ALMIDÓN DE LA PAPA. Trabajo de investigación para obtener el título de profesional de ingeniería en materiales. Arequipa, Perú. Universidad Nacional de San Agustín, 2014. pp. 40-81.

Anuradha, R., Suresh, A., & Venkatesh, K. Simultaneous saccharification and fermentation of starch to lactic acid. *Process Biochemistry*, 35(3–4), 367–375, 1999.

Arceo, F. Is PLA Recyclable or even biodegradable? [en línea]. 3D Solved. <<https://3dsolved.com/is-pla-recyclable/#disadvantages-of-recycling-pla>> [consulta: 21 agosto 2021]

ASIPLA. ESTADÍSTICAS DE LA INDUSTRIA [en línea]. ASIPLA, Las Condes, Santiago, Chile. <<https://www.asipla.cl/estudio/>> [consulta: 21 agosto 2021]

Baquero, J. La Industria del azúcar de remolacha. Hojas Divulgadoras del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. 1987, 1-20 pp.

Calabia, B.P., Tokiwa, Y. Production of D-lactic acid from sugarcane molasses, sugarcane juice and sugar beet juice by *Lactobacillus delbrueckii*. *Biotechnol Lett* 29: 1329–1332, 2007.

Case, K. E. Introducción a la economía. En R. C. Fair & S. M. Oster (Eds.), *Principios de Microeconomía*. 10.a ed. México, Pearson, 2012. pp. 98–111

Castillo Y. Degradación del ácido poliláctico (PLA) a diferentes dosis de radiación gamma. Trabajo de Título Profesional de Licenciado en Ingeniería Industrial. Lerma, México. 2015, 1-8 pp.

Cedeño Almeida K. & Naranjo Campoverde A. Plan de exportación de fundas plásticas biodegradables elaboradas con cáscara de banano para la empresa Plasca S.A. hacia el mercado de Chile. Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, 2019 <<https://www.eumed.net/rev/oel/2019/05/exportacion-fundas-plasticas.html>> [Consultado: 20 abril 2021]

Centro de Investigación de Polímeros Avanzados (CIPA). FLEXbio, el bioplástico que reduce el impacto medioambiental en la agricultura [en línea]. Centro de Investigación de Polímeros Avanzados, Concepción, Chile <<https://cipachile.cl/flexbio-el-bioplastico-que-reduce-el-impacto-medioambiental-en-la-agricultura/>> [Consultado: 15 diciembre 2021]

Chañi Castro, L. L. (2014). CONTROL DE CALIDAD EN LOS PROCESOS DE EXTRUSIÓN-SOPLADO DE ENVASES E INYECCIÓN DE PRODUCTOS PLÁSTICOS DE PE Y PP. Informe técnico para optar al Título de Profesional de Ingeniero en Materiales. Arequipa, Perú, 2014. 4p.

Coagro. Desafíos del cultivo de maíz de Chile [en línea]. Coagro, Rancagua, Chile. <<https://coagra.cl/desafios-del-maiz/>> [consulta: 5 julio 2021]

Cordova P, Francisco. Riego del maíz [en línea]. Santiago: Investigación y Progreso Agrícola, 1973 <<https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/33470>> [consulta: 5 julio 2021]

Díaz, S. & Hurtatiz, Á. Plan de negocio diseño, fabricación y comercialización de bolsas biodegradables. Informe final de investigación para optar el título de gerente de proyectos. Bogotá, Colombia. Universidad EAN, 2012. pp.43- 48

Diez, L. Producción de ácido láctico a partir de biomasa de origen vegetal. Trabajo de Grado en Ingeniería Química. Valladolid, Chile, Universidad de Valladolid Escuela De Ingenierías Industriales, 2014. pp 29-51

European Bioplastics. What are bioplastics?. Berlín, Alemania, European Bioplastics <[https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP\\_FS\\_What\\_are\\_bioplastics.pdf](https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf)> [consultado: 20 abril 2021]

European Bioplastics. BIOPLASTICS MARKET DEVELOPMENT UPDATE 2020. Berlín, Alemania, European Bioplastics. <[https://docs.european-bioplastics.org/conference/Report\\_Bioplastics\\_Market\\_Data\\_2020\\_short\\_version.pdf](https://docs.european-bioplastics.org/conference/Report_Bioplastics_Market_Data_2020_short_version.pdf)> [consultado: 20 abril 2021]

FAO. El maíz en la nutrición humana. Colección FAO: Alimentación y Nutrición 25. Roma, Italia. <<http://www.fao.org/3/t0395s/t0395s00.htm>> [Consultado: 5 julio 2021]

Fundación Chile. MANUAL DE RECOMENDACIONES CULTIVO DE MAÍZ GRANO. Santiago, Chile. 2011, pp 8 -27.

García, A. & Laval, Ema. Cereales: producción, precios y comercio exterior de trigo, maíz y arroz. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile, Santiago, Chile. 2021, pp. 28-43.

García, C., Arrázola Paternina, G., & Durango Villadiego, A. Producción de ácido láctico por vía biotecnológica. Temas Agrarios, 15(2): 9-26, 2010.

Góngora, J. P. La industria del plástico en México y el mundo. Comercio Exterior, 64(5), 6-9, 2014

Gopal, R., Altaf, Md., Naveena, B., Venkateshwar, M. y Vijay Kumar E. Amylolytic bacterial lactic acid fermentation -A review. Biotechnology Advances 26 (1): 22-24, 2008.

HAGERDAL B, HOFVENDAHL K. (2000) Factors affecting the fermentative lactic acid production from renewable resources. Enzyme and Microbial Technology. 26: 87–107, 2000.

Hartley BS and Shama G, Novel ethanol fermentations from sugarcane and straw. Philos Trans R Soc A 321:555–568,1987.

IANSA. Azúcar blanca, rubia, flor y especialidades. [en línea] Santiago, Chile. Azúcar Iansa. <<https://empresasiansa.cl/azucar-iansa/>> [25 mayo 2021]

InfoAgro. El cultivo de la remolacha azucarera (Parte I). InfoAgro, Madrid, España. <[https://www.infoagro.com/documentos/el\\_cultivo\\_remolacha\\_azucarera\\_\\_parte\\_i\\_.asp](https://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_remolacha_azucarera__parte_i_.asp)> [Consultado: 5 julio 2021]

Jordá Vilaplana, A. Optimización de las propiedades de uniones adhesivas de polímeros biodegradables de ácido poliláctico (PLA) con adhesivos de carácter natural mediante el empleo de tecnologías de plasma atmosférico. Tesis doctoral. Editorial Universitat Politècnica de València, 2013. pp 19-22.

Kashket E. Bioenergetics of lactic acid bacteria: cytoplasmic pH and osmotolerance. FEMS Microbiol Rev. 46: 233– 244. 1987.

Knoema. Chile - Remolacha Azucarera [en línea]. Knoema, Nueva York, E.E.U.U. <<https://knoema.es/atlas/Chile/topics/Agricultura/Produccion-de-Cultivos-Cantidad-toneladas/Remolacha-Azucarera>> [consultado: 5 julio 2021]

Knoema. Chile - Remolacha Azucarera [en línea]. Knoema, Nueva York, E.E.U.U. <<https://knoema.es/atlas/Chile/topics/Agricultura/Produccion-de-Cultivos-Superficie-Cultivada/Remolacha-Azucarera>> [consultado: 5 julio 2021]

Kotzamanidis, C., Roukas, T. & Skaracis, G. Optimization of lactic acid production from beet molasses by *Lactobacillus delbrueckii* NCIMB 8130. World Journal of Microbiology and Biotechnology 18: 441–448, 2002.

Krumm, V. Manual del Cultivo de la papa en Chile. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 2017. pp. 9- 74.

López, J. Bioplásticos: efectos e impactos sobre la gestión de los envases. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid-Cátedra Ecoembes, 2008. pp 3-7.

Liu, Y., Wen, Z., Liao, W., Liu, C. & Chen, S. Optimization of the process for the production of l(+)-lactic acid from cull potato by *Rhizopus oryzae*. Engineering in Life Sciences 5(4): 343–349, 2005.

Liang, S., McDonald, A. G., & Coats, E. R. Lactic acid production with undefined mixed culture fermentation of potato peel waste. Waste Management, 34(11), 2022–2027, 2014

Magazine plástico. Los bioplásticos y el precio del petróleo [en línea] Magazine plástico, Ciudad de México, México. 2020

Ministerio del Medio Ambiente. Ley 20920 ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE [en línea]. Biblioteca del Congreso Nacional, Santiago, Chile. <<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>> [Consultado: 5 junio 2021].

Ministerio del Medio Ambiente. Ley 21100 PROHÍBE LA ENTREGA DE BOLSAS PLÁSTICAS DE COMERCIO EN TODO EL TERRITORIO NACIONAL [en línea]. Biblioteca del Congreso Nacional, Santiago, Chile. <<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1121380&buscar=21100>> [Consultado: 5 junio 2021].

Ministerio del Medio Ambiente. Ley 21368 REGULA LA ENTREGA DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO Y LAS BOTELLAS PLÁSTICAS, Y MODIFICA LOS CUERPOS LEGALES QUE INDICA [en línea]. Biblioteca del Congreso Nacional, Santiago, Chile. <<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163603>> [Consultado: 19 agosto 2021].

Mladenović, D.D., Djukić-Vuković, A.P., Kocić-Tanackov, S.D., Pejin, J.D. and Mojović, L.V. Lactic acid production on a combined distillery stillage and sugar beet molasses substrate. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 91: 2474-2479, 2016.

Morales Estay, P. Escases hídrica en Chile y las proyecciones del recurso. Biblioteca del Congreso Nacional, Valparaíso. 2021, pp. 1-2.

Núñez Salinas, M. Planta de producción de ácido poliláctico (PLA) a partir de ácido láctico. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Química. Sevilla, España. 2019, p7.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Consideraciones ambientales para una agricultura competitiva y sustentable al 2030. En *AGRICULTURA CHILENA Reflexiones y Desafíos al 2030*, 1.a ed. 2017, pp. 117–121.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Panorama de la agricultura chilena. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Santiago, Chile. 2019, 26-37 pp.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Papas [en línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Santiago, Chile. <<https://www.odepa.gob.cl/rubros/papas-y-tuberculos>> [Consultado: 25 octubre 2021].

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Cereales línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Santiago, Chile. <<https://www.odepa.gob.cl/rubros/cereales>> [Consultado: 25 octubre 2021].

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Estadísticas productivas [en línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Santiago, Chile. <<https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>> [Consultado: 2 noviembre 2021].

Olfos, M. J. Situación actual y perspectivas de la remolacha. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Santiago, Chile. 2012, pp 1-4.

Paliwal, R. L. Introducción al Maíz y su importancia. En: Paliwal, R. L.; Granados, G.; Lafitte, H. R.; Violic, A.,D. y Marathée, J. P. (Eds.). El maíz en los trópicos. Mejoramiento y producción. Colección FAO: Producción y Protección Vegetal 28. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 2001a, pp. 1-3.

Parada, A. Mercado de la remolacha y del azúcar [en línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Santiago, Chile. < <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/mercado-de-la-remolacha-y-del-azucar-2>> [Consultado: 5 junio 2021].

Remar. (2011). Introducción a los bioplásticos. Bioplásticos 2.a ed. Remar, Red de Energía y Medio Ambiente. 2011. 6p.

Rivas, B., Moldes, A. y Domínguez, J. Lactic acid production from corn cobs by simultaneous saccharification and fermentation: a mathematical interpretation. *Enzyme and Microbial Technology*, 34(7): 627-634, 2004

Rivas, T., & Tapia, B. (2012). Estructura de mercado y determinantes del precio de la papa para consumo fresco. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Santiago, Chile. 2012, pp. 4-9,

Royo-Nieto, E., & Montoto, T. Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global. [en línea] Las Palmas, España. Universidad de las Palmas de Canarias. 2017, pp. 4-32.

Salvatierra, N. A., Oldani, C. R., Reyna, L., Taborda, R. A. M. ¿Qué es la biocompatibilidad?; Sociedad Argentina de Bioingeniería; *Revista Argentina de Bioingeniería*; 15; 1; 6-2009; 28-32

San Martin R, Bushell D, Leak DJ and Hartley BS, Pathways of ethanol production from sucrose by a mutant thermophilic *Bacillus* in continuous culture. *J Gen Microbiol* 139:1033–1040,1993.

Schafleitner, R., Ramirez, J., Jarvis, A., Evers, D., Gutierrez, R., and Scurrah, M. Adaptation of the potato crop to changing climates. *Crop Adaptation to Climate Change*. [Yadav, S., Redden, B. Hattfield, JL, and Lotze-Campen, H.(ed.)]. Wiley-Blackwell, Oxford, UK. 2011, 287-297.

Segura, E. Diseño, caracterización y comportamiento en servicio de materiales basados en ácido poliláctico (PLA) con potencial utilidad en el empaquetado de alimentos. Tesis doctoral. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, España. 2016, pp. 12-29.

Smerilli, M., Neureiter, M., Wurz, S., Haas, C., Frühauf, S. and Fuchs, W. Direct fermentation of potato starch and potato residues to lactic acid by *Geobacillus stearothermophilus* under non-sterile conditions. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 90: 648-657, 2015.

Siparsky, G.L., Voorhees, K.J. & Miao, F. Hydrolysis of Polylactic Acid (PLA) and Polycaprolactone (PCL) in Aqueous Acetonitrile Solutions: Autocatalysis. *Journal of Polymers and the Environment* 6, 31–41,1998.

Tapia, B. (2021) Papá, temporada 2020/2021. Departamento de Política Sectorial y Análisis de Mercado. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 2021, pp.5-14

Universidad Central (UCEN). Datos generales sobre Chile [en línea]. Universidad Central, Coquimbo Chile. <[https://www.ucentral.cl/datos-generales-sobre-chile/prontus\\_ucentral2012/2012-07-12/151845.html](https://www.ucentral.cl/datos-generales-sobre-chile/prontus_ucentral2012/2012-07-12/151845.html)> [Consultado: 5 noviembre 2021]

Vishnu, C., Seenayya, G. & Reddy, G. Direct fermentation of various pure and crude starchy substrates to L(+) lactic acid using *Lactobacillus amylophilus* GV6. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 18: 429–433, 2002.

Wee, Y., Reddy, L. y Ryu, H. Fermentative production of L(+)-lactic acid from starch hydrolyzate and corn steep liquor as inexpensive nutrients by batch culture of *Enterococcus faecalis* RKY1. *Journal of Chemical Technology y Biotechnology* 83 (10): 1387 – 1393, 2005.

Zeoplast. Listados de nuestros productos [en línea]. Coronel, Chile. <  
<http://www.zeoplast.cl/plasticos-biodegradables/listado-productos+-5000>> [Consultado: 15  
diciembre 2021]



Del trabajo de Nuñez (2019) se requirió los datos sobre la cantidad de ácido láctico que se usó como materia prima y la cantidad de PLA producido. En las tablas A.1 y A.2 se aprecia los datos que se utilizaron.

**A.1:** Balance de las materias primas necesarias.

Componente	Materia prima necesaria (kg/h)
<b>Ácido láctico 85%</b>	3 880
<b>Octoato de estaño</b>	3,086

**A.2:** Balance de materia de la etapa de procesado de PLA.

Componente	Corriente (kg/h)				
	19	20	21	22	23
<b>PLA</b>	2 500	2 500	2 500	25	2 475
<b>Agua</b>	–	12,5	–	–	–
<b>Total (kg/h)</b>	2 500	2 512	2 500	26	2 475
<b>Total (kmol/h)</b>	0,018	0,71	0,018	$1,88 \cdot 10^{-4}$	0,017

En base a lo anterior, se determinó el rendimiento del proceso a partir de la cantidad de PLA producido por la cantidad de ácido láctico suministrado. Como se aprecia en la ecuación A.1, se utilizó la cantidad de PLA en la corriente C21 y la cantidad de ácido láctico en la corriente C1, dando un rendimiento alrededor del 64%.

$$Rendimiento = \frac{PLA_{C21}}{AC_{C1}} = \frac{2500 \text{ kg/h}}{3880 \text{ kg/h}} = 0,64$$

**A.1:** Rendimiento de la producción de PLA.

## Anexo 2: Procedimiento para la estimación de las fuentes de carbono

Primero se determinó el rendimiento de la producción de ácido láctico para el caso optimista y pesimista de las fuentes de carbono. A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo del rendimiento para obtener el rendimiento del caso pesimista de la remolacha azucarera.

$$\text{rendimiento del ácido láctico} = \frac{\text{masa o concentración del ácido láctico}}{\text{masa o concentración del sustrato}} = \frac{3916,91}{2781,01} = 0,71$$

En base al rendimiento del ácido láctico para cada caso se determinó la cantidad de sustrato inicial a partir de la cantidad de ácido láctico necesario para producir PLA (tabla 6.14). A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo para obtener la cantidad de sustrato inicial requerido para el caso pesimista de la remolacha azucarera.

$$\text{masa del sustrato requerida} = \frac{\text{masa del ácido láctico necesario}}{\text{rendimiento del ácido láctico}} = \frac{725.419}{0,71} = 1.021.715\text{ton}$$

Para obtener la cantidad de subproducto de remolacha azucarera requerido para obtener la masa de sustrato inicial, se requirió registrar la cantidad de sustrato inicial obtenido por cierta cantidad de subproducto utilizado. Estos datos se registraron de cada trabajo que se usó para determinar la productividad. A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo para obtener la cantidad de subproducto requerido para el caso pesimista de la remolacha azucarera.

$$\text{masa de subproducto requerida} = \text{masa del sustrato requerida} * \frac{\text{masa del subproducto}}{\text{masa del sustrato}} = \frac{1.021.715}{0,003} = 283.180.407\text{ton}$$

Para obtener la cantidad de remolacha azucarera requerido para obtener la masa de subproducto de remolacha azucarera, se requirió registrar la cantidad de subproducto obtenido por cierta cantidad de remolacha azucarera utilizado. Estos datos se registraron de cada trabajo que se usó para determinar la productividad. A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo para obtener la cantidad de la remolacha azucarera requerido para el caso pesimista de la remolacha azucarera.

$$\text{masa de remolacha azucarera requerida} = \text{masa del subproducto requerida} * \frac{\text{masa del producto}}{\text{masa del subproducto}} = \frac{283.180.407}{0,495} = 5.720.816.308\text{ton}$$

En la tabla A.3 se presentan los datos cálculos y registrados, con el fin de obtener la cantidad de remolacha azucarera que se requeriría para producir PLA como sustituto del PE consumido en el año 2020 en Chile.

**A.3:** Estimación de la cantidad de sustrato, subproducto y remolacha azucarera requerida.

Productividad	Rendimiento	Sustrato (ton)	Relación entre sustrato y subproducto	Subproducto (ton)	Subproducto/Producto	Producto (ton)
Optimista	80%	906.773	0,56	1.615.488	0,45	35.899.727
Pesimista	71%	1.021.715	0,003	283.180.407	0,495	5.720.816.308

Para obtener la cantidad de papa requerida, se requirió registrar la cantidad de sustrato inicial obtenido por cierta cantidad de papa utilizada. Estos datos se registraron a partir la revisión bibliográfica. A continuación, se muestra un ejemplo del cálculo para obtener la cantidad de papa requerida para el caso optimista de la papa.

$$masa\ de\ papa\ requerida = masa\ del\ sustrato\ requerido * \frac{masa\ de\ sustrato}{masa\ del\ papa} = \frac{1.007.526}{0,24} = 4.241.321\ ton$$

En la tabla A.4 se presentan los datos cálculos y registrados, con el fin de obtener la cantidad de papa que se requeriría para producir PLA como sustituto del PE consumido en el año 2020 en Chile.

**A.4:** Estimación de la cantidad de sustrato, subproducto y remolacha azucarera requerida.

Productividad	Rendimiento	Sustrato (ton)	Relación entre sustrato y producto	Producto (ton)
Optimista	72%	1.007.526	0,24	4.241.321
Pesimista	75%	908.039		3.822.517