

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE PENETRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA PROMOVER LA MOVILIDAD SOSTENIBLE EN LA CIUDAD DE QUITO

ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO PARA SER  
USADO EN EL TRANSPORTE PÚBLICO EN LA CIUDAD DE QUITO.

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECANICO

ARIEL GERMAN PUERTAS CARRION

[ariel.puertas@epn.edu.ec](mailto:ariel.puertas@epn.edu.ec)

DIRECTOR: SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

[santiago.vaca@epn.edu.ec](mailto:santiago.vaca@epn.edu.ec)

DMQ, agosto 2024

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Ariel Puertas declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**ARIEL PUERTAS**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Ariel Puertas, bajo mi supervisión.

---

**SANTIAGO VACA**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ARIEL PUERTAS

SANTIAGO VACA

## DEDICATORIA

Este TIC esta dedicado con profunda gratitud y cariño a las personas mas importantes de mi vida que han sido el apoyo y motivación a lo largo de este viaje académico.

A mi querido padre Rene, quien siempre mostro su apoyo y fe en mi desde el inicio hasta el final de esta travesía, por siempre estar ahí en los momentos más difíciles y por nunca dejarme solo en los momentos que mas necesite.

A mis hermanos Daniel, Mandy y Kevin, por estar siempre estar a mi lado con el apoyo y comprensión en los momentos más difíciles.

A mi madre Gladys que siempre estuvo con su apoyo sin medida en todo momento.

A mi querida abuelita Mariana por su valioso consejo de perseverancia y fortaleza que me han inspirado a seguir adelante.

A todos mis amigos Nicolas, Sebastián, Jaime, Iván, Frank, Juan, Xavier, Delejo, Omar, Josué que me han apoyado, por todos esos amigos que conocí en esta travesía inolvidable.

Sin el apoyo y la confianza que me han tenido esto no hubiera sido posible, gracias por tanto y perdón por tan poco.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi mas sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido en el desarrollo y culminación de esta tesis.

En primer lugar, a mi tutor de tesis el Ing., Santiago Vaca por su apoyo contante y por todas las reconvenciones hechas para poder culminar este trabajo. Por su dedicación y paciencia que han sido fundamentales para poder completar todas las actividades propuestas para culminar este trabajo.

A todos los profesores de Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, que han formado parte de esta travesía con todos sus consejos y conocimientos brindados.

A mi familia, en especial a mi padre que hizo todo esto posible, a mis hermanos y a todas las personas que me apoyaron durante todo este proceso.

A mis amigos, por su compañerismo y amistad incondicional en todo momento.

A la Escuela Politécnica Nacional, por proporcionarme tantos años de conociendo para poder ser un profesional.

Agradezco a todas las personas que me han brindado su granito de arena para poder culminar este trabajo.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
2 Marco teórico .....	3
2.1 El hidrogeno.....	3
2.2 Clasificación del Hidrogeno por colores.....	5
2.3 Producción de Hidrogeno a partir de Energías Renovables. ....	6
2.4 Energías Renovables para la producción de hidrógeno verde.....	8
2.5 Carro de Hidrogeno.....	9
2.6 Ubicación Geográfica.....	10
3 METODOLOGÍA.....	12
3.1 Recolección y selección de datos.....	12
3.2 Cálculos Generales.....	15
3.3 Cálculos Específicos .....	16
4 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
4.1 Resultados .....	27
4.2 Conclusiones .....	35
4.3 Recomendaciones .....	36
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37

## RESUMEN

Este Trabajo de Integración Curricular tiene como objetivo analizar el requerimiento de energía y agua de la producción de hidrógeno verde para la movilidad sostenible, para ello se analizaron las rutas existentes de producción de hidrogeno verde para escoger la ruta más favorable para el contexto quiteño. Posteriormente se cuantifico la cantidad de agua e hidrogeno que necesitaría un hipotético automóvil que funcione con celda de combustible a base de hidrogeno, de uso privado. También se cuantificaron los recursos que serían requeridos por las fuentes de energía renovable, y las áreas que ocuparían estos recursos. Se tomo como base que un automóvil promedio recorre 20000 kilómetros al año. A su vez se realizó la estimación para todos los vehículos del cantón Quito.

Finalmente, se realizó una comparación de recursos necesarios y áreas para identificar cuál es la opción más favorable.

**PALABRAS CLAVE:** producción de hidrogeno, carro de hidrogeno, -energía, energías renovables.

## **ABSTRACT**

This Curricular Integration Project aims to analyze the energy and water requirements to produce green hydrogen for sustainable mobility. To achieve this, existing green hydrogen production routes were analyzed to choose the most favorable route for the context of Quito. Subsequently, the amount of water and hydrogen needed for a hypothetical private vehicle powered by a hydrogen fuel cell was quantified. The resources required by renewable energy sources and the areas these resources would occupy were also quantified. It was assumed that an average car travels 20,000 kilometers per year. An estimate was also made for all the vehicles in the Quito canton. Finally, a comparison of the necessary resources and areas was made to identify the most favorable option.

**KEYWORDS:** Production of Hydrogen, Hydrogen Car, Energy, Renewable Energies



# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La lucha contra el cambio climático es una preocupación a nivel global. Esto ha llevado a que varios países busquen formas de tener una economía en la neutralidad de carbono. El Ecuador también contribuye a este esfuerzo, por lo tanto, es uno de los países que ha firmado un acuerdo internacional para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Dado que el uso de derivados del petróleo en el transporte es uno de los principales responsables de las emisiones de gases invernadero, es crucial la adopción de tecnologías que permitan la reducción de consumo de los derivados de petróleo para poder disminuir la huella de carbono.

En la búsqueda de soluciones sostenibles que reduzcan las emisiones de gases invernadero se considera que el transporte es uno de los mayores aportantes, aproximándose a  $\frac{1}{4}$  de las emisiones globales de  $CO_2$ . La alternativa sostenible para disminuir la emisión de gases invernadero son los vehículos de pila de combustible de hidrogeno. Los vehículos con pila de combustible de hidrogeno consumen entre 29 - 66 % menos energía que un auto convencional.

En específico, Quito es un adecuado caso de estudio, debido a que ha enfrentado desafíos significativos debido a la calidad del aire, emisiones de gases invernadero y al alto congestión de tráfico por parte de los vehículos convencionales. Los vehículos de pila de combustible de hidrogeno son una solución prometedora ya que podrían ayudar a reducir la contaminación y mejorar la calidad de aire en la ciudad. Asimismo, provee una limitación geográfica que ayuda a simplificar el sistema de transporte energético para poder estudiarlo con mas detalle.

El siguiente proyecto de investigación tiene como objetivo principal analizar el requerimiento de energía y agua para la producción de hidrogeno mediante el uso de energías renovables en el parque automotor de la ciudad de Quito, Ecuador. Se llevará a cabo un estudio exhaustivo desde la recopilación de información de los vehículos de hidrogeno hasta la cantidad de recursos y demanda energética de los mismos.

## **1.1 Objetivo general**

Analizar el requerimiento de energía y agua de la producción de hidrógeno mediante el uso de energías renovables, para la movilidad sostenible.

## **1.2 Objetivos específicos**

Evaluar y comparar distintas tecnologías y métodos de producción de hidrógeno utilizando fuentes de energía renovable.

Analizar el potencial de producción de energías renovables para el cantón de Quito.

Estimar el consumo de agua y energía asociado a la producción de hidrógeno para la movilidad sostenible.

Cuantificar los recursos requeridos por los dispositivos de producción de energía renovable, y el área que estos ocuparían para la producción de hidrógeno verde.

Comparar las áreas ocupadas y recursos utilizados para suplir la demanda energética de los automóviles de Quito.

## **1.3 Alcance**

Este proyecto de integración curricular parte con la recopilación de información. En este caso, se deberá investigar sobre conceptos y fundamentos de energías renovables, rutas de producción de hidrógeno, vehículos de hidrógeno, entre otros. Luego de esto se define la línea base del parque automotor en Quito, con la estimación del uso de hidrógeno y agua. Posteriormente se determinarán los escenarios de penetración de los vehículos a hidrógeno y se analizarán sus características principales. Finalmente, se hará un análisis con los posibles sistemas renovables en función del área que ocupan para producir la energía requerida.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 El hidrogeno

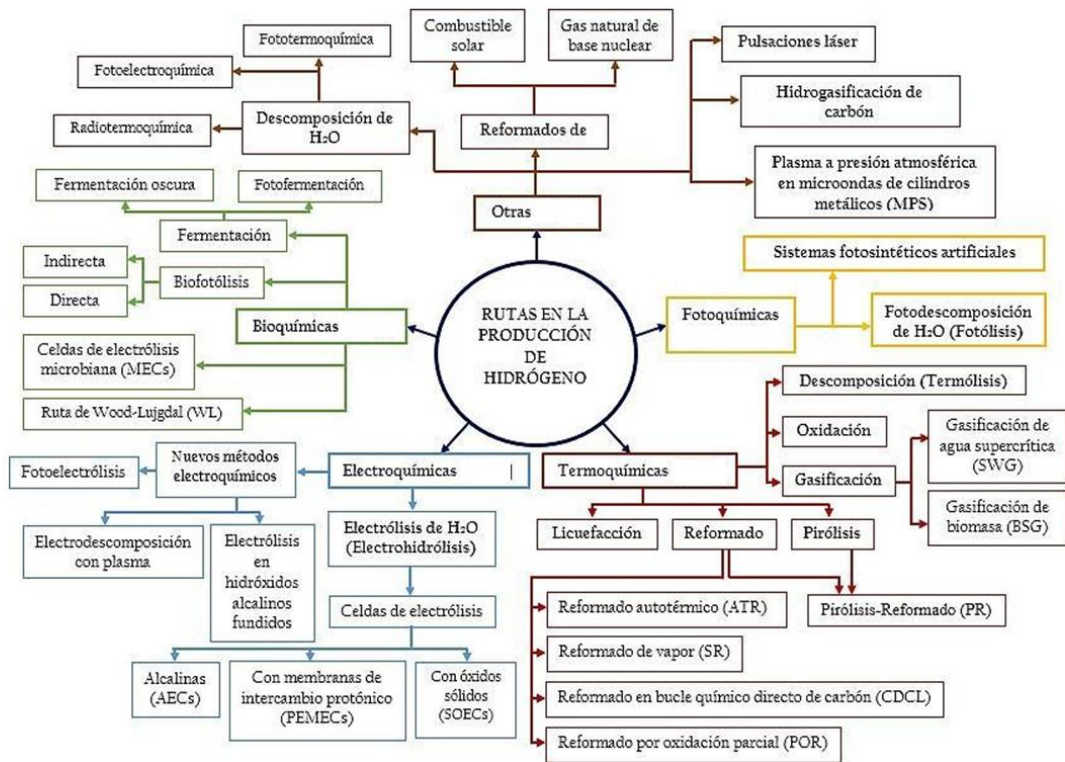
El hidrogeno es el elemento químico que más se encuentra en el universo, y uno de los más abundantes en la tierra, este se encuentra en su mayor parte combinado en forma de agua. El hidrogeno no se encuentra libre en la naturaleza, para separar el hidrogeno es necesario energía por lo que el mismo no se considera una fuente de energía primaria sino como un vector energético [1].

El hidrogeno se caracteriza por ser un gas incoloro, insípido, inodoro, no presenta toxicidad y el mismo es muy reactivo y también inflamable, es el elemento con menor masa atómica y es muy liviano entre todas sus características como se muestra en la tabla 2.1 [2].

Tabla 2.1. Propiedades del Hidrogeno [2]

Propiedad	Valor	Unidades
Fórmula química	$H_2$	-
Masa molecular	2.016	g/mol
Temperatura de ebullición (1 atm)	20.35	K
Temperatura crítica	33.25	K
Presión crítica	1.316	MPa
Densidad del gas a 20 °C y 1 atm	0.08375	kg/m <sup>3</sup>
Densidad del líquido a 20 °C y 1 atm	67.84	kg/m <sup>3</sup>
Mezcla estequiométrica en el aire	29	%
Límite de inflamabilidad en el aire	4-75	% Vol
Límite de detonación en el aire	18-60	% Vol
Temperatura de autoignición	858.15	K
Temperatura de llama en el aire	2318.15	K
Radio de expansión, líquido a gas a 20 °C	1 a 848	-
Poder calorífico Superior	141860	kJ/kg
Poder Calorífico Inferior	120000	kJ/kg

Al tener una amplia gama de aplicaciones en las que se usa el hidrogeno, tradicionalmente se han generado muchas rutas para la producción de este elemento. En la gráfica 2.1 se muestran las rutas de producción de hidrogeno donde las 5 formas principales son: bioquímicas, electroquímicas, termoquímicas, fotoquímicas y otras. [3]



**Figura 2.1** Rutas de producción de Hidrogeno. [3]

- Ruta Bioquímica: Esta ruta utiliza organismos vivos para producir hidrogeno, esta se la puede realizar mediante fermentación, biofotólisis, celdas de electrolisis microbianas y ruta de Wood Lujgda (WL). Esta ruta aprovecha los recursos orgánicos como residuos que pueden contribuir a una economía circular, esta es muy ineficiente a grandes escalas de producción.
- Ruta Electroquímica: Esta ruta utiliza la electricidad como fuente de energía para separar el agua en hidrogeno y oxígeno. Esta ruta tecnológicamente es la más madura con la electrolisis y la electricidad que se utiliza puede generarse a partir de energías renovables. La eficiencia de esta, está vinculada al costo de los materiales utilizados.
- Ruta Termoquímica: Esta ruta utiliza las altas temperaturas para realizar reacciones químicas que generan hidrogeno, esta se puede realizar mediante licuefacción, reformado, pirolisis, gasificación, oxidación y descomposición. Esta ruta puede

generar grandes cantidades de hidrogeno, pero tiene una demanda energética muy grande para alcanzar las temperaturas necesarias y puede generar subproductos como emisiones si no se controla adecuadamente.

- Ruta Fotoquímica: Esta ruta utiliza la luz solar para impulsar reacciones químicas que producen hidrogeno, esta se puede realizar mediante sistemas fotovoltaicos artificiales y foto-descomposición. Esta ruta es la menos madura debido a su alto costo y baja eficiencia capturando la luz solar.
- Otras rutas: También conocidos como métodos no convencionales de producción de hidrogeno, la mayor parte de estos se basan en la combinación de 2 o más rutas tradicionales como las antes mencionadas. Estas pueden ser radio termoquímica, fotoelectroquímica, foto-termoquímica, combustible solar, gas natural de base nuclear entre otras. Estas rutas son menos desarrolladas y están en constante investigación y desarrollo [3], [4].

## 2.2 Clasificación del Hidrogeno por colores.

La producción de hidrogeno puede clasificarse en diferentes colores según el método de producción y el impacto ambiental que tiene. Estos colores representan si la cantidad de emisiones es alta – media – baja – nula [5].

En la figura 2.2 se muestra las rutas de hidrogeno y su color asociado, se puede observar que el hidrogeno se clasifica en 9 colores diferentes [6]

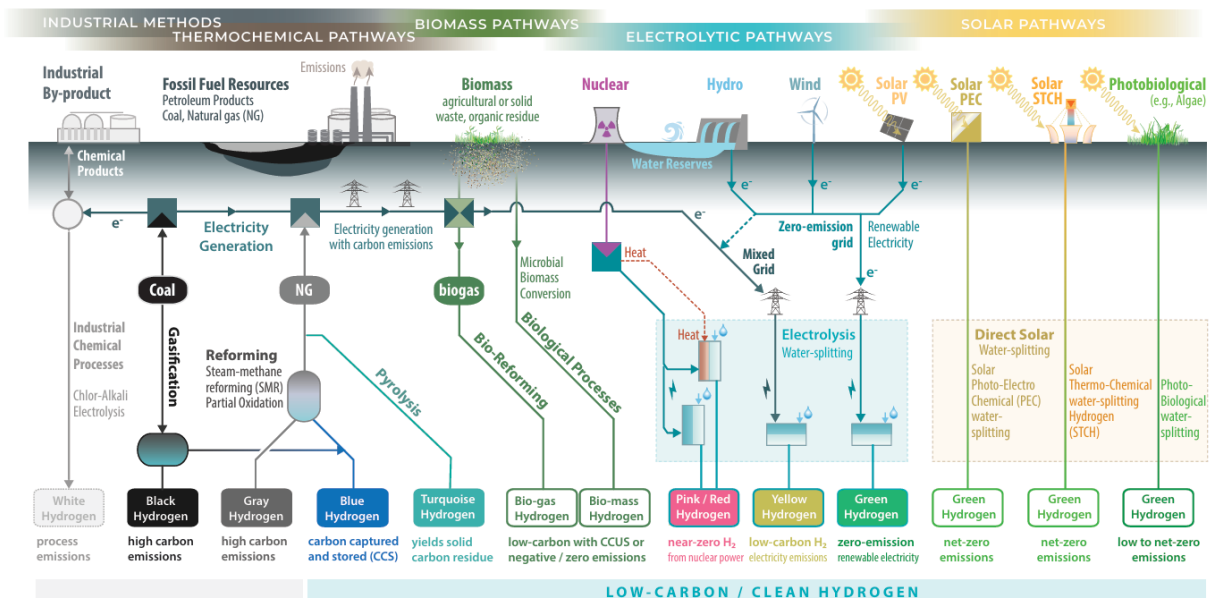


Figura 2.2 Clasificación del Hidrogeno por colores. [6]

- Hidrogeno negro/ café es producido mediante gasificación de carbón y tiene altas emisiones de  $CO_2$  este es el método más contaminante.
- El hidrogeno gris es producido comúnmente por reformado de metano con vapor (usando gas natural). Tiene alto-medio emisiones de  $CO_2$ .
- Hidrogeno azul es producido por reformado de metano con captura y almacenamiento de carbono. Esto reduce 2 kg de  $CO_2$  por kg de  $H_2$  producido.
- Hidrogeno Turquesa producido por pirólisis de metano este emite carbono sólido en lugar de  $CO_2$ , lo que reduce a bajas emisiones de  $CO_2$ .
- Hidrogeno rosa es producido por electrolisis con electricidad de plantas nucleares, tiene bajo impacto de  $CO_2$ .
- Hidrogeno amarillo es producido mediante electrolisis usando fuentes de electricidad incluyendo no renovables.
- Hidrogeno verde es producido mediante electrolisis de agua usando solamente fuentes renovables, esta no tiene emisiones de  $CO_2$ .
- Hidrogeno blanco es producido como un subproducto de algún proceso industrial. (Electrolisis cloro-álcali). [6]

## **2.3 Producción de Hidrogeno a partir de Energías Renovables.**

En la actualidad se producen más de 500 millones de  $m^3$  al año de hidrogeno en el mundo, por lo que se han desarrollado varias rutas para producir hidrogeno con aplicación en las energías renovables [7]. La producción del hidrogeno es en un 96% de energía primaria a través de combustibles fósiles, siendo ocupada en un 95% en consumo propio de las industrias que lo demandan. Como se muestra en la figura 2.3 solo un 4% se produce a través de electrolisis con energías renovables [8].

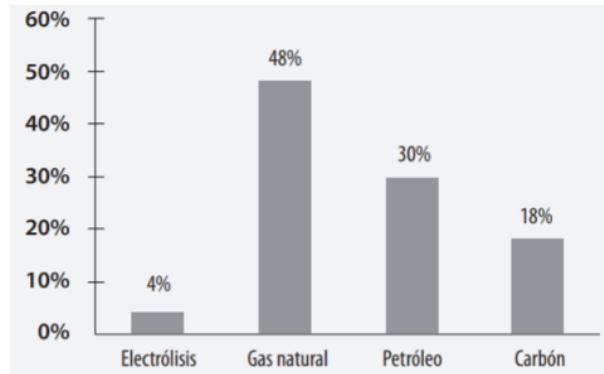


Figura 2.3. Origen del hidrogeno producido [8].

### Producción de Hidrogeno a través de la electrolisis.

Al tener a la electrolisis como la alternativa de producir hidrogeno verde podemos observar las tecnologías más utilizadas [9]:

- **Electrolizadores Alcalinos:** utilizan una disolución alcalina, se suele utilizar el hidróxido de potasio (KOH) como electrolito, estos son los más comunes y rentables del mercado.
- **Electrolizadores de Protón Exchange Membrane (PEM):** utilizan un polímero solido conductor de protones como electrolito, este tiene un costo más alto debido al uso de metales preciosos, pero permiten acoplarse fácilmente a sistemas fluctuantes (Energías renovables).
- **Electrolizador de Oxido de Sodio (SOEC):** utilizan materiales cerámicos como electrolito, lo que permite la reducción de costos, pero es la tecnología menos desarrollada en comparación de las anteriores [10].

	Alkaline electrolyser			PEM electrolyser			SOEC electrolyser		
	Today	2030	Long term	Today	2030	Long-term	Today	2030	Long term
Electrical efficiency (% LHV)	63–70	65–71	70–80	56–60	63–68	67–74	74–81	77–84	77–90
CAPEX (USD/kW <sub>e</sub> )	500	400	200	1 100	650	200	2 800	800	500
	1400	850	700	1 800	1 500	900	5 600	2 800	1 000

Figura 2.4. Características techno-económicas de diferentes tecnologías de electrolizadores [11].

## 2.4 Energías Renovables para la producción de hidrógeno verde.

Actualmente, la preocupación por el cambio climático y la búsqueda de alternativas sostenibles nos dejan a las energías renovables como principal alternativa para generar energía de forma limpia y así poder reducir las emisiones de gases invernadero. Los principales recursos de energía renovable utilizados son para la producción de hidrógeno verde: biomasa, eólica y solar [12].

**Tabla 2.2.** Cantidad de recursos para producir Hidrogeno y eficiencia de producción [12].

<b>Fuente de Energía</b>	<b>Proceso</b>	<b>Cantidad para producir 1 kg de hidrogeno</b>	<b>Eficiencia de Producción</b>
<b>Biomasa</b>	Gasificación de Biomasa	13.0 kg de biomasa seca	44.00%
<b>Energía Eólica</b>	Electrólisis	46 kWh	48.30%
<b>Energía Solar</b>	Electrólisis	46 kWh	72.60%

- Energía Solar

También conocida como la energía del sol, es la energía que llega en forma de radiación electromagnética. Es un tipo de energía renovable es considerada limpia ya que no genera contaminantes y es inagotable en el tiempo de un ser vivo. Para ser generada es necesario convertir la energía bruta en energía útil mediante: solar térmica o solar fotovoltaica.

La energía solar puede ser utilizada para alimentar a un electrolizador, de esta forma separa el agua mediante un proceso electroquímico lo que permite generar hidrogeno verde [13].

- Energía Eólica

Esta se obtiene a partir del viento, es decir aprovecha la energía cinética del aire, esta ha demostrado su viabilidad técnica y económica. Existen 2 formas de producir electricidad a partir del viento estas son: Sistema asilado y parques eólicos.

Los aerogeneradores convierten la energía cinética capturada en energía eléctrica que se utiliza para alimentar a un electrolizador para producir hidrogeno mediante un proceso electroquímico [14].



- Biomasa

La biomasa es una fuente de energía renovable proveniente de los residuos de la materia orgánica están suelen ser residuos de actividades como: agropecuarias, forestales residuos urbanos, cultivos entre otros.

Los residuos utilizados son sometidos a un proceso de conversión donde la biomasa se convierte en energía útil mediante gasificación o digestión anaeróbica. Primero se realiza la combustión directa, luego la gasificación, seguido de un proceso de reformado para finalmente tener el hidrogeno mediante un proceso de purificación [15].

## 2.5 Carro de Hidrogeno.

En los últimos años se han desarrollado varias tecnologías con diferentes características, como se muestra en la tabla 2.3 donde se detalla la tecnología más utilizada por los vehículos de pila de combustible de hidrogeno y se compara con las tecnologías de un vehículo eléctrico e híbrido. [16].

**Tabla 2.3.** Comparación de la tecnología que utiliza los vehículos [16].

<b>Tecnología</b>	<b>Beneficios</b>	<b>Descripción</b>
Celdas de Combustible de Hidrógeno (HFC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento mínimo</li> <li>- Solo produce agua y calor</li> <li>- Eficiencia del 40-60%</li> <li>- Mayor alcance</li> <li>- Tiempo de recarga corto</li> <li>- 60% de energía convertida en trabajo</li> <li>- Operación silenciosa</li> <li>- Reducción de GHG del 50-90%</li> </ul>	Utilizan hidrógeno para generar electricidad que impulsa el motor del vehículo.
Vehículos Eléctricos con Batería (BEV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emisiones cero durante la operación</li> <li>- Menor costo de operación</li> <li>- Eficiencia energética alta</li> </ul>	Utilizan baterías recargables para almacenar electricidad y alimentar el motor eléctrico.
Vehículos Híbridos Enchufables (PHEV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Combina motor eléctrico y de combustión interna</li> <li>- Menor consumo de combustible</li> <li>- Flexibilidad en el uso de energía</li> </ul>	Utilizan tanto un motor de combustión interna como uno eléctrico, con la capacidad de recargarse externamente.

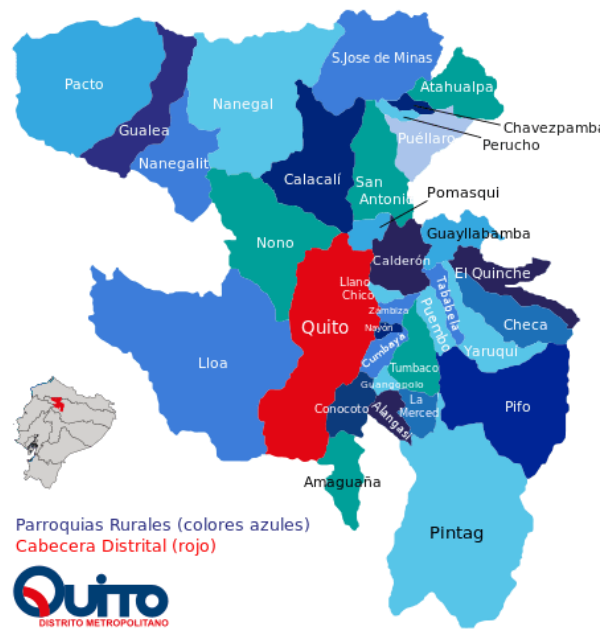
## 2.6 Ubicación Geográfica

Para poder manejar datos de forma más exacta utilizaremos un límite demográfico tomando en cuenta el sector de Quito, que es la capital de la república del Ecuador. Los datos más relevantes se muestran en la tabla 2.4 [17], y una ubicación demográfica con sus límites se muestra en la figura 2.5. [18]

**Tabla 2.4.** Características más relevantes del cantón Quito [17].

<b>Aspecto</b>	<b>Detalles</b>
<b>Extensión</b>	422.802 hectáreas / 4.228 km <sup>2</sup>
<b>Altitud</b>	2.850 msnm / 9.350 pies
<b>Clima</b>	283-298 K / 50-77°F
<b>Moneda Oficial</b>	Dólar estadounidense (USD)
<b>Impuestos</b>	12% IVA, 10% servicios turísticos
<b>Electricidad</b>	110V AC / 110V
<b>Coordenadas</b>	Latitud: -0.1865943, Longitud: -78.4305382
<b>Sistema de Transporte</b>	Trolebús, Eco vía, Metrobús-Q, buses alimentadores, taxis amarillos
<b>Distancias a otras ciudades</b>	Guayaquil: 420 km, Cuenca: 450 km, Santo Domingo: 133 km
<b>Población</b>	Aproximadamente 2.2 millones de habitantes
<b>Cantidad de Vehículos matriculados</b>	508316 vehículos matriculados

La cantidad de vehículos matriculados en el distrito metropolitano de Quito se refiere a todos los vehículos tales como: automóviles, SUV, camionetas, camiones, motocicletas, furgonetas autobuses entre otras [19].



**Figura 2.5.** Ubicación demográfica con límites del cantón de Quito en Pichincha. [18]

### **3 METODOLOGÍA**

El propósito de esta metodología es mostrar la cantidad de energía y agua que requiere un automóvil de hidrogeno al año, para luego analizar las posibles alternativas de fuentes de energía renovables que pueden suplir esta demanda.

Este estudio es cuantitativo y descriptivo, ya que parte de la investigación y análisis de varios informes, libros, documentos y artículos científicos para luego realizar cálculos con las respectivas estimaciones.

La metodología se divide en 3 partes la primera: selección y recolección de datos, para luego realizar cálculos generales (cantidad de H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O y cantidad de energía requerida) y finalizando con cálculos específicos (cantidad de área para generar la demanda de energía con fuentes renovables: solar, eólica, biomasa)

Para la metodología se empezará con un análisis de la distancia total recorrida por un automóvil al año, luego se realiza una selección de vehículo de pila de combustible de hidrogeno para después con las características del vehículo seleccionado se cuantifiqué la cantidad de hidrogeno y agua requerida para recorrer la distancia total de un año.

Una vez obtenida la cantidad de hidrogeno y agua se procederá a calcular la cantidad de energía que se necesita para producir esa cantidad de hidrogeno, para realizar estas estimaciones se considera como tecnología de producción de Hidrogeno la electrolisis de Protón Exchange Membrane (PEM) [10], luego se estimara la cantidad de automóviles que están matriculado en el Distrito Metropolitano de Quito para calcular la energía necesaria para todos los automóviles.

Finalmente, al tener un valor de energía requerida se procederá a calcular las áreas respectivas que se necesita para generar hidrogeno a través de energías renovables como la energía solar, eólica y bioenergía.

#### **3.1 Recolección y selección de datos.**

Para un automóvil, se estima que el promedio que recorre al año es de 19000 a 20000 kilómetros al año, en este análisis se ocupara el dato de 20000 kilómetros para analizar, cuando el automóvil ah recorrido la estimación más alta [22].

Al tener el recorrido que tiene un automóvil al año se analizara que vehículo de pila de combustible de hidrogeno es el óptimo.

En la figura 3.1 se observa el modelo de vehículo, su autonomía, capacidad de tanque lleno, motor y consumo de hidrogeno.

Vehicle model	Driving cycle	Driving range (km)	Fuel tank capacity (kg)	Motor capacity (kW)	FC capacity (kW)	Hydrogen consumption (g/km)
<b>Passenger car</b>						
Toyota MIRAI II	Combined	650	5.6	137.2		7.6
Toyota MIRAI	Combined	650	5.6	137.2		7.6
Hyundai NEXO	Combined	756	6.33	120		8.4
Honda Clarity FC		589	5	130		
Hyundai ix35	NEFZ	594	5.64	100		10
<b>Transporter</b>						
Citroën ë-Jumpy Hydrogen	WLTP combined	400	4.4	100	45	
PEUGEOT e-Expert Hydrogen	WLTP combined	400	4.4	100	45	
Opel Vivaro-e HYDROGEN	WLTP combined	400	4.4	100	45	
HOLTHAUSEN HyMax-75	WLTP combined	350	6	72	40	20
HOLTHAUSEN HyMax-80	WLTP combined	300	6	72	40	20
QUANTRON QLI FCEV	WLTP combined	500	8.2	100	45	
<b>Truck</b>						
FAUN Bluepower		250	16.1	240	90	
FAUN City Power		500	32	140	90	
Hyundai Xcient FC		400	30.08	350	180	
QUANTRON QHM FCEV	WLTP combined	700		500	120	
T680 FCV		725	58.8	309.5		
HYZON HYHD8-200	Hyzon internal testing	563	50	275	200	
HYZON HYHD8-110	Hyzon internal testing	563	50	275	110	
HYZON REFUSE TRUCK		201	25	240	110	
HYZON HYMAX 24 tonne		400	30	160	80	75.19
HYZON HYMAX 46 tonne		680	50-60	190-295	110-200	103.09
HYZON HYMAX 70 tonne		600	50-60	190-295	110-240	153.85

**Figura 3.1** Vehículos de pila de combustible de hidrógeno (HFCEV) actualmente disponibles en el mercado [16].

Al realizar el análisis respectivo el vehículo que menos consumo de hidrogeno tiene por kilómetro recorrido es el Toyota Mirai, el ciclo de este es combinado lo que quiere decir que las pruebas fueron hechos tanto en autopista como en la ciudad, la autonomía que tiene es de 650 kilómetros. Al tener las mejores características en función del consumo y capacidad del tanque se escoge el Toyota Mirai I.

Al tener que un automóvil recorre 20000 kilómetros al año se calcula la cantidad de hidrogeno que este necesita con la ecuación 3.1:

$$C_{H_2} = C_c * D_{año}$$

**Ecuación 3.1** Consumo de hidrogeno al año.

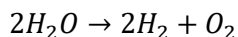
Donde:

$C_{H_2}$ : Consumo de hidrogeno al año [kg  $H_2$ ]

$C_c$ : Consumo de hidrogeno por kilometro  $\left[ \frac{kg H_2}{km} \right]$

$D_{año}$ : Distancia recorrida al año [Km]

Una vez obtenida la cantidad de hidrogeno que se necesita al año podemos calcular la cantidad de agua que vamos a necesitar al año para esto utilizamos la reacción química estequiométrica mostrada en la ecuación 3.2:



**Ecuación 3.2** Reacción química estequiométrica del agua. [23]

Tomando en cuenta la ecuación química del agua y al tener la cantidad de hidrogeno podemos obtener la cantidad de agua que se necesita y también la cantidad de O2 que se va a obtener, para esto se necesitara el peso molecular.

**Tabla 3.1** Peso molecular de los elementos y compuestos [23].

Elemento o compuesto	Peso molecular [g/mol]
$H_2O$	18.0
$H_2$	2.015
$O_2$	31.99

Al tener el peso molecular y los gramos de hidrogeno podemos obtener las moles de Hidrogeno que necesito para ello se usa:

$$mol_{xx} = \frac{g_{xx}}{P.M_{xx}}$$

**Ecuación 3.3** Formula para el cálculo de moles [23]

Donde:

$mol_{xx}$ : moles de compuesto o elemento [moles]

$g_{xx}$ : gramos de compuesto o elemento [gramos]

$P.M_{xx}$ : Peso molecular del compuesto o elemento [gramos/mol]

Al observar la reacción química estequiométrica, se tiene 2 moles de hidrogeno y 2 moles de agua por lo tanto la cantidad de moles de  $H_2O$  que se requieren son iguales a las de  $H_2$ .

Luego al tener las moles de agua necesarias se calcula la cantidad de gramos de agua con la ecuación 3.3. y se obtiene la cantidad de hidrogeno y de agua que necesita el Toyota Mirai I para recorrer 20000 kilómetros al año.

### 3.2 Cálculos Generales

La producción de hidrogeno se supondrá que es a través de energías renovables por lo que se usara la electrólisis como tecnología de producción y se utilizara como electrolizar Protón Exchange Membrane (PEM).

Al tener la cantidad de hidrogeno que se necesita, con la ecuación 3.4 se calcula el potencial de energía eléctrica necesaria para producir hidrogeno:

$$E_d = \frac{PCS * C_{H_2}}{n_e * F_{ae}}$$

**Ecuación 3.4** Energía eléctrica necesaria para producir hidrogeno. [24]

Donde:

$E_d$ : Energía eléctrica necesaria [kWh/año]

PCS: Poder Calorífico Inferior del Hidrogeno [39.4 kWh/Kg  $H_2$ ]

$C_{H_2}$ : Consumo de  $H_2$  al año [kg/año]

$n_e$ : Factor de eficiencia del electrolizador [75%]

$F_{ae}$ : Factor disponible de la electrólisis [95%]

La eficiencia del electrolizar (PEM) es de 75% basado en el calor especifico superior del hidrogeno que es 39.4 kWh/Kg  $H_2$ , el factor disponible de la electrólisis al ser usada mediante electricidad se usa como el 95% [24, 25].

Al obtener la energía eléctrica necesaria para que el Toyota Mirai I recorra 20000 kilómetros al año podemos hacer una estimación de cuanta energía se requiere para todos los vehículos del Distrito Metropolitano de Quito.

Al conocer la cantidad de vehículos matriculado en el Distrito Metropolitano de Quito, y al tener los porcentajes de automóviles y automóviles SUV se estima la cantidad de automóviles matriculados en Quito como se muestra en la tabla 3.2, en esta no se toman en cuenta las camionetas, motocicletas, camionetas, furgonetas, autobuses, tráileres entre otros [19].

**Tabla 3.2** Cantidad automóviles en el Distrito Metropolitano de Quito [19].

Cantidad de Vehículos en el Distrito Metropolitano de Quito						
Año	Vehículos Matriculados	Porcentaje automóviles	Automóviles	Porcentaje vehículos SUV	Vehículos SUV	Total, de Automóviles
2022	508316	28.5	144870	35.7	181469	326339

Al tener el total de automóviles matriculados en Quito, se calcula la energía total requerida al multiplicar la cantidad de energía eléctrica que requiere 1 automóvil por la cantidad total de automóviles.

### **3.3 Cálculos Específicos**

Se requiere calcular la cantidad de recursos necesarios para satisfacer esta demanda energética de manera eficiente y sostenible por medio de energías renovables, por lo que se calculara la cantidad de paneles, aerogeneradores y toneladas de residuos para cubrir la demanda y también se estimara un área requerida para estos.

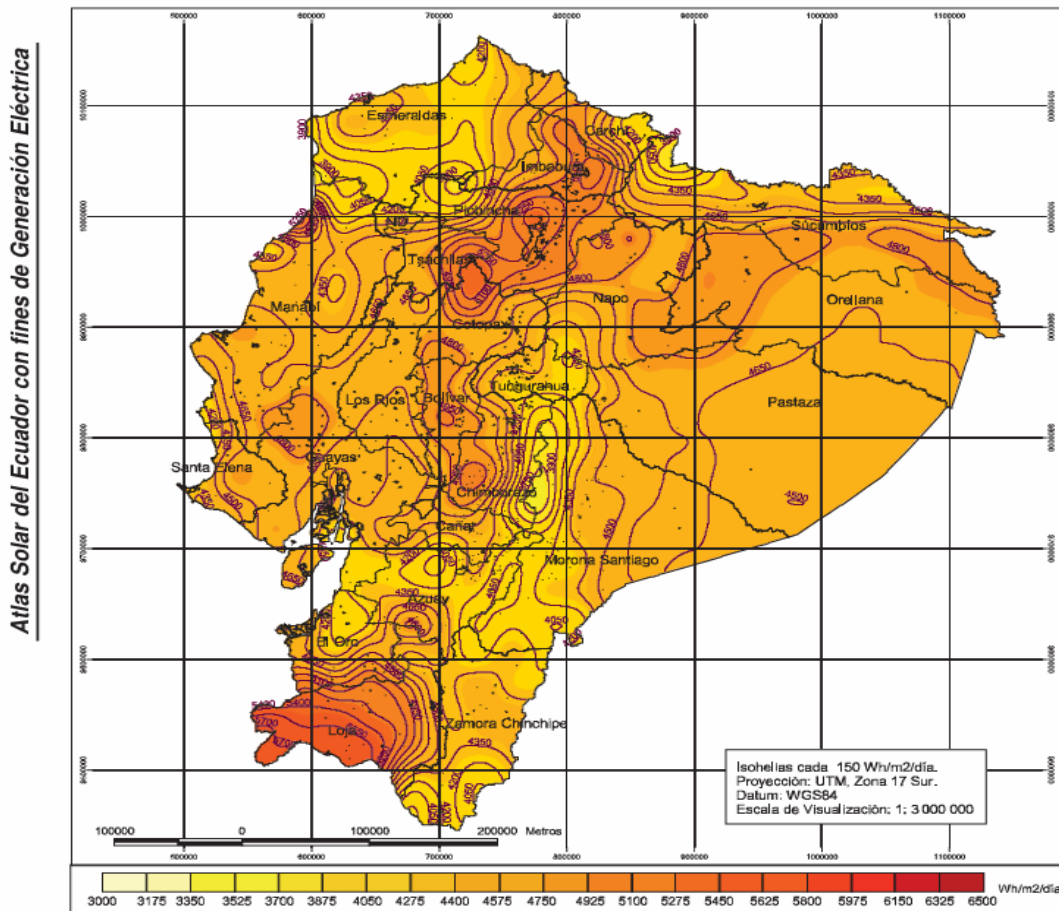
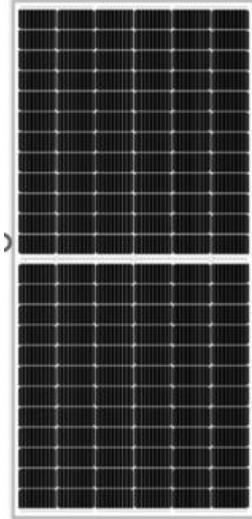
#### **Energía Solar**

Para comenzar con el cálculo de paneles solares necesarios para producir energía, se necesita seleccionar que tipo de panel se va a utilizar, para este caso se usaran los paneles más usados en Ecuador, una vez seleccionada el panel se procede a analizar las características necesarias en este caso se necesitara la potencia del panel junto con las medidas de este como se muestra en la tabla 3.3 y la hora solar pico / día como se muestra en figura 3.2 en este caso se supondrá que es un sistema conectado a la red y se usara el promedio anual de las horas pico/ día [26].



**Tabla 3.3** Características del panel solar 450Wp / 24 Dc Monocristalino [27].

Panel Solar 450 W / 24 VDC Monocristalino RESUN RS71-M450HC	
Características	
Tipo	Monocristalino Half Cell
Modificación	144 cells (6 x24) 166 x 83 mm 9BB
Voltaje Circuito abierto Voc	49.3
Voltaje Potencia Máximo Vmpp	41.5
Corriente Circuito Cerrado Isc	11.6
Corriente Potencia Máxima Impp	10.85
Eficiencia Panel	20.37
Dimensiones	2.094 x 1.038 x 0.035 m
Peso	25 kg
Voltaje	24 V
Potencia	450 Wp
Precio unitario	220 USD
Área	2.173572 m2



**Figura 3.2** Horas Solar Pico para Quito (HSP) [26].

Como se observa en la figura 3.2 se estima que la HSP es 5.275 kWh/m<sup>2</sup>/día.

Una vez obtenidos todos los datos necesarios, se calcula la energía generada con el promedio anual de horas solar pico por día con la ecuación

$$P_{vc} = W_p * h_{SP}$$

**Ecuación 3.5** Energía generada por panel conectado a la red [26].

Donde:

$P_{vc}$ : Energía generada por panel conectado a la red [kWh]

$W_p$ : Potencia del panel [W]

$h_{SP}$ : Hora Solar pico /día

De la ecuación 3.4 se obtuvo la energía eléctrica necesaria al año [kWh/año], para el cálculo de número de paneles como se muestra en la ecuación 3.6 se necesita la energía eléctrica necesaria al día [kWh/día] por lo que se divide  $E_d$  para 365 para obtener la energía eléctrica necesaria al día.

Luego se calcula la cantidad de paneles que se necesita con:

$$N_c = \frac{E_d}{P_{vc}}$$

**Ecuación 3.6** Numero de paneles necesarios [26].

Donde:

$N_c$ : Numero de paneles [unidades]

$E_d$ : Energía eléctrica necesaria al día [kWh/día]

$P_{vc}$ : Energía generada por panel conectado a la red [kWh]

Finalmente se obtiene la cantidad de paneles necesarios para generar la demanda de energía, como se muestra en la ecuación 3.7 si se multiplica por el número total de automóviles de Quito se puede calcular cuantos paneles se necesitan para producir energía para todos los automóviles de Quito.

$$N_{total} = N_c * N_{t_v}$$

**Ecuación 3.7** Numero de paneles para todos los automóviles de Quito.

Donde:

$N_{total}$ : Numero total de paneles [Unidades]

$N_c$ : Numero de paneles [Unidades]

$N_{t_v}$ : Numero total de vehiculos

Al usar los datos de la tabla 3.3 se observa que el área de un panel es de  $2.173572 m^2$ , de la ecuación 3.7 se obtuvo la cantidad de paneles que se necesitaran para producir energía para todos los automóviles de Quito y de la ecuación 3.6 se obtuvo la cantidad de paneles que se necesitan para producir energía para 1 automóvil por lo que si multiplicamos el área de un panel por la cantidad de paneles se pueden estimar áreas necesarias para colocar los paneles como se muestra en la ecuación 3.8.

$$A_N = A_p * N_c$$

**Ecuación 3.7** Área que ocupan # paneles.

Donde:

$A_N$ : Area que ocupan # paneles [ $m^2$ ]

$A_p$ :Area que ocupa 1 panel [ $m^2$ ]

$N_c$ : Numero de paneles [Unidades]

Finalmente se obtiene un estimado de paneles necesarios para generar la demanda de energía eléctrica para cualquier cantidad de automóviles, también se obtuvo un estimado del área, este resultado solo toma en cuenta el área que generan los paneles sin ninguna accesoría adicional.

## Energía Eólica

Para calcular el área estimada que se necesita para producir la demanda energética, primero se supondrá que se realizará un parque eólico y al realizar el análisis en el distrito Metropolitano de Quito se requieren datos que se muestran en la tabla 3.4 que son las estimaciones que se utilizaron para el potencial eólico en el atlas eólico del ecuador [28].

**Tabla 3.4** Parámetros utilizados para la estimación de potencial Eólico [28].

Parámetro	Valor
Resolución del Atlas Eólico	200 m x 200 m
Velocidad media anual considerada	$\geq 7.5$ m/s
Altura de las torres	80 m
Densidad media de ocupación del terreno	3 MW/km <sup>2</sup>
Factor de disponibilidad	0.98
Factor de planta	0.2 a 0.35
Densidad del aire a 2850 m.s.n.m	0.917 kg/m <sup>3</sup>

Se utilizo el promedio de aerogeneradores más conocidos en el mundo por la empresa Wind General Electric. Ge, los datos obtenidos de este estimado es el diámetro de rotor de 95 m y una potencia nominal de 1.75 MW [29].

Lo primero que se calculo es el área del círculo barrida por las palas del aerogenerador como se ve en la ecuación 3.8:

Ahora para calcular el área barrida del rotor se utiliza:

$$A = \pi * \frac{d^2}{4}$$

**Ecuación 3.8** Área del círculo barrido por las palas del aerogenerador. [14]

Donde:

A: área del círculo barrida por las palas del aerogenerador [m<sup>2</sup>]

d: diametro del rotor [m]

Al tener el área del círculo barrida por las palas del aerogenerador se puede calcular el Potencial eólico disponible con la ecuación 3.9 y los parámetros de la tabla 3.4.

$$P_d = \frac{1}{2} * p * A * v^3$$

**Ecuación 3.8** Potencial eólico disponible [14].

Donde:

$P_d$ : Potencia eólica disponible [kW]

$p$ : Densidad del aire [Kg / $m^3$ ]

$A$ : área del círculo barrida por las palas del aerogenerador [ $m^2$ ]

$V$ : Velocidad del viento [m/s]

Después de obtener el potencial eólico disponible se calcula el potencial eléctrico disponible con la ecuación 3.9.

$$P_e = P_d * C_p * n_e * n_c$$

**Ecuación 3.9** Potencial electrico disponible. [14].

Donde:

$P_e$ : Potencial eléctrico disponible [kW]

$P_d$ : Potencial eólico disponible [kW]

$C_p$ : Coeficiente de potencia [0,48]

$n_e$ : Rendimiento generador eléctrico [0.97]

$n_c$ : Rendimiento de la caja multiplicadora de velocidad [0.98]

Para transformar el potencial eólico a potencial eléctrico es necesario multiplicar por los coeficientes de potencia 0.35-0.5; rendimiento del generador 0.92-0.97, y el rendimiento de la caja multiplicadora 0.94-0.98, como se usó una velocidad del viento mayor a 7m/s se utilizó los datos establecidos [14], en caso de utilizar velocidad del viento igual o menor a 7m/s los valores de coeficientes y rendimientos deben ser recalculados.

Después de obtener el potencial eléctrico disponible se multiplica por el tiempo requerido de esta forma se obtiene la energía eléctrica disponible con la ecuación 3.10, si se requiere la energía generada al año se multiplica por 8670 horas.

$$E_g = P_e * t$$

**Ecuación 3.10** Energía eléctrica generada al año mediante aerogeneradores. [14].

Donde:

$E_g$ : Energía eléctrica generada al año mediante 1 aerogenerador. [kWh]

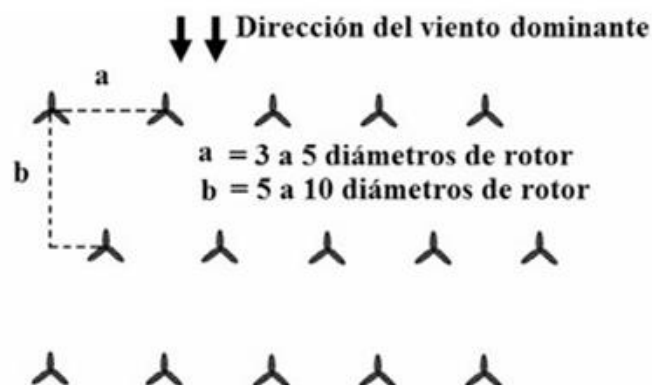
$P_e$ : Potencial eléctrico disponible [kW]

t: tiempo [h]

De esta forma se obtiene la energía eléctrica que produce 1 aerogenerador al año, y con el resultado de la ecuación 3.4 se tiene la energía que requiere 1 automóvil, tal como se realizo con los paneles, se utiliza la ecuación 3.6 para calcular la cantidad de aerogeneradores que se necesita para generar la energía de 1 automóvil.

Luego usando la ecuación 3.7 es decir al multiplicar el numero total de automóviles de Quito por la cantidad de aerogeneradores que se necesitan para producir la energía de 1 automóvil, se obtiene la cantidad total de aerogeneradores necesarios para producir la energía para todos los automóviles de Quito.

Al escoger un parque eólico este tiene normas de distancia entre aerogeneradores como se muestra en la figura 3.3 para que minimice los efectos de interferencia y de estela.



**Figura 3.3** Disposición en tresbolillo de aerogeneradores en un parque eólico [14].

En este caso se calculó las áreas mínimas y máximas para el parque eólico, para ello se utilizó la ecuación 3.11 donde se utilizó la figura 3.3 como referencia para hacer un conteo de aerogeneradores tomando en cuenta una base de 5 aerogenerador, luego por cada fila y columna que se aumenta a los extremos se suman 3 aerogeneradores, y 2 aerogenerador por cada fila y columna interna. Al realizar el análisis matemático se observa que se necesitan 16 filas y 15 columnas para obtener un parque eólico con 512 aerogenerador. Al tener el número de filas y columnas necesarias para diseñar el parque eólico podemos calcular el área.

$$A_{max-min} = 16 * a_{max-min} * d * 15 * 2 * b_{max-min} * d$$

**Ecuación 3.11** Área máxima y mínima para el parque eólico.

Donde:

$A_{max-min}$ : Representa el área máxima o mínima [ $m^2$ ]

$a_{max-min}$ : Distancia dirección perpendicular al viento. [m]

$b_{max-min}$ : Distancia dirección del viento dominante. [m]

d: diámetro del rotor [m]

Finalmente se obtiene un estimado de la cantidad aerogeneradores necesarios para generar la demanda de energía eléctrica para cualquier cantidad de automóviles, también se obtuvo el área del parque eólico con la distancia mínima y máxima entre cada aerogenerador.

## **Bioenergía**

Para calcular el área estimada que se necesita para producir la demanda energética, primero se supondrá que la tecnología para generar energía eléctrica es la combustión directa (quema directa) y al realizar el análisis en el distrito Metropolitano de Quito se requieren datos que se muestran en la tabla 3.5 que son las estimaciones que se utilizaron para el potencial bioenergético en el atlas bioenergético del Ecuador [30].

**Tabla 3.5** Parámetros utilizados para la estimación de potencial eléctrico [30].

Parámetro	Valor	Unidades
Factor de conversión	859.95	kcal/kWh
Rendimiento global de la planta	19.91	%
Poder Calorífico Inferior	Depende del tipo de residuo	Kcal/t
Densidad de Residuos en Quito	1.57	t/km <sup>2</sup> /año

En la tabla 3.5 se ve el factor de conversión de [kcal/kWh], este utilizado como factor de equivalencia en el S.I de kcal → kWh, el rendimiento global de la planta para este caso es mediante combustión directa de una caldera, el rendimiento global toma en cuenta un ciclo termodinámico de planta y pérdidas mecánicas equivalentes al 21.5%, también se toma en cuenta los consumos internos para alimentación de servicio auxiliares y pérdidas eléctricas en los transformadores lo que se estima en un 8%. [30]

Para el cálculo se usan los residuos mas comunes que tiene la provincia de Pichincha como se muestra en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6** Poder Calorífico de los residuos más comunes en Pichincha [30]

Poder Calorífico Inferior de los residuos más comunes en la Provincia de Pichincha.				
Palma africana	12.471	[MJ/kg]	2978660.94	[kcal/t]
Palmito	12.603	[MJ/kg]	3010188.74	[kcal/t]
Cacao	6.464	[MJ/kg]	1543907.01	[kcal/t]
Piña	9.036	[MJ/kg]	2158221.49	[kcal/t]
Forestal	19.259	[MJ/kg]	4599954.37	[kcal/t]

Para calcular las toneladas de residuos que se necesita de cada producto se utiliza la ecuación 3.12.

$$Tr = \frac{E_d * F_c * RGP}{PCI}$$

**Ecuación 3.12** Toneladas de residuos necesarios [30].



Donde:

$T_r$ : Toneladas de residuos al año [t]

$E_d$ : Energía eléctrica necesaria [kWh/año]

$F_c$ : Factor de Conversión [kcal/kWh]

$PCI$ : Poder Calorífico Inferior [kcal/t]

$RGP$ : Rendimiento Global de la planta

De esta forma se obtiene la cantidad de residuos en toneladas que se necesita de cada producto para producir la energía eléctrica necesaria para que el Toyota Mira I recorra 20000 al año.

Al obtener las toneladas de residuos se supondrá que estos son guardados en sacos de 45 kg (1 quintal), utilizando la ecuación 3.13 se podrá calcular la cantidad de sacos necesarios, multiplicando por 1000 para tener en kilogramos y finalmente dividiendo para 45 kg que es el peso de cada quintal.

$$N_t = \frac{T_r}{p_{kg}} * 1000$$

**Ecuación 3.13** Número total de quintales.

Donde:

$N_t$ : Número total de quintales. [unidades]

$T_r$ : Toneladas de residuos al año [t]

Luego usando la ecuación 3.7 es decir al multiplicar el número total de automóviles de Quito por la cantidad de quintales que se necesitan para producir la energía de 1 automóvil, se obtiene la cantidad total de quintales necesarios para producir la energía para todos los automóviles de Quito, esto se realizara con cada residuo de producto de la tabla 3.5.

Finalmente, para poder calcular un área estimada que ocuparan los residuos de productos se utiliza la ecuación 3.14, donde se usó el dato de la densidad de los residuos de Quito de la tabla 3.5.

$$A_r = \frac{Tr}{D_{rQ}}$$

**Ecuación 3.14** Área estimada para los residuos. [30]

Donde:

$A_r$ : Área estimada de residuos en Quito [ $km^2$ ]

$Tr$ : Toneladas de residuos al año [t]

$D_{rQ}$ : Densidad de residuos en Quito [ $t/km^2/año$ ]

Finalmente se obtiene un estimado de la cantidad quintales necesarios para generar la demanda de energía eléctrica para cualquier cantidad de automóviles, también se obtuvo áreas estimadas para cada tipo de residuo de producto.

## 4 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Resultados

Se realiza un análisis de resultados obtenidos en 2 secciones para 1 automóvil y para todos los automóviles del Distrito Metropolitano de Quito.

#### Para 1 automóvil.

Como se observa en la tabla 4.1 el Toyota Mirai I necesita 152 kg de  $H_2$  para recorrer una distancia de 20000 km al año, también se observa que necesita 1357.816 kilogramos de agua que se puede expresar como 1357.816 litros de agua al año.

Al realizar un análisis con respecto al día se puede decir que el Toyota Mirai I, que recorre aproximadamente 55 km al día necesita 0.416 kg  $H_2$  y 3.72 litros de agua al día.

**Tabla 4.1** Cantidad de hidrogeno y agua que necesita el Toyota Mira I al año y al día.  
[Fuente Propia].

Elemento o compuesto	Kilogramos al año	Elemento o compuesto	Kilogramos al día
$H_2O$	1357.816	$H_2O$	3.720
$H_2$	152	$H_2$	0.416
$O_2$	1206.571	$O_2$	3.306

La cantidad de energía eléctrica que se requiere para generar 152 kilogramos de  $H_2$  es 8405. 3333 [kWh/año], también se estima la cantidad de energía eléctrica que necesita al día para producir 0.416 kilogramos de  $H_2$  es 23.0283 [kWh/día].

Como se observa en la tabla 4.2 se muestra el área requerida para generar energía para un automóvil recorra 20000 kilómetros, para estimar estas áreas se toma en cuenta la cantidad de paneles, aerogeneradores y quintales de residuos.

**Tabla 4.2** Áreas requeridas para cada método de generación de energía y cantidad de recursos usados para 1 vehículo. [Fuente Propia].

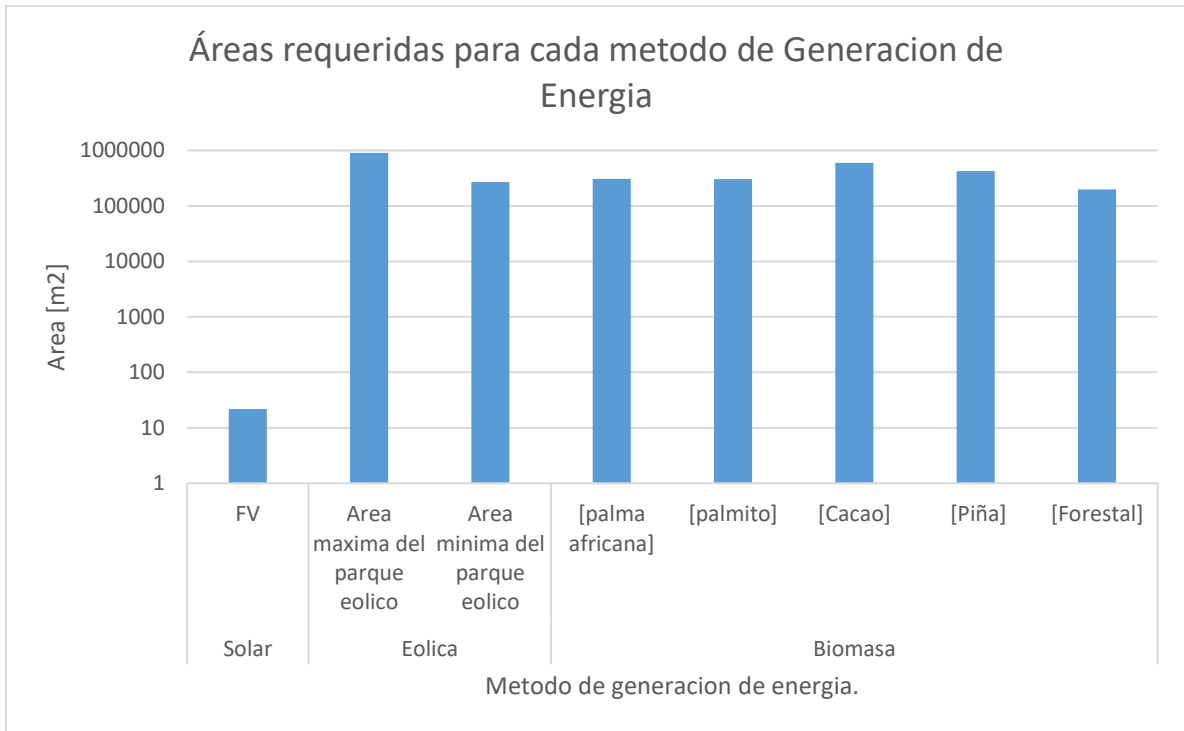
Método de producción de Energía	Producto	Área requerida para 1 automóvil [ $m^2$ ]	Cantidad de (paneles, aerogeneradores y quintales de residuos)
Solar	FV	21.74	10
Eólica	Parque eólico Área máxima	902500.00	0.001534
	Parque eólico Área mínima	270750.00	0.001534
Biomasa	palma africana	307736.27	11
	palmito	304513.13	11
	Cacao	593715.81	21
	Piña	424721.00	15
	Forestal	199271.98	7

En la Figura 4.2 se observa la comparación de las áreas requeridas en  $m^2$  para cada método de generación de energía, se observa que el área mas pequeña son la de los paneles fotovoltaicos con un área de  $21.74 m^2$ .

Luego al analizar las áreas requeridas para el parque eólico, suponiendo solo 1 aerogenerador y tomando en cuenta las distancias máximas y mínimas entre aerogeneradores como cerramientos se tiene un rango entre  $0.9025 - 0.27075 km^2$ , siendo el área máxima el valor más grande entre todos los métodos de generación de energía y el área mínima siendo un valor similar con las áreas de residuos generados.

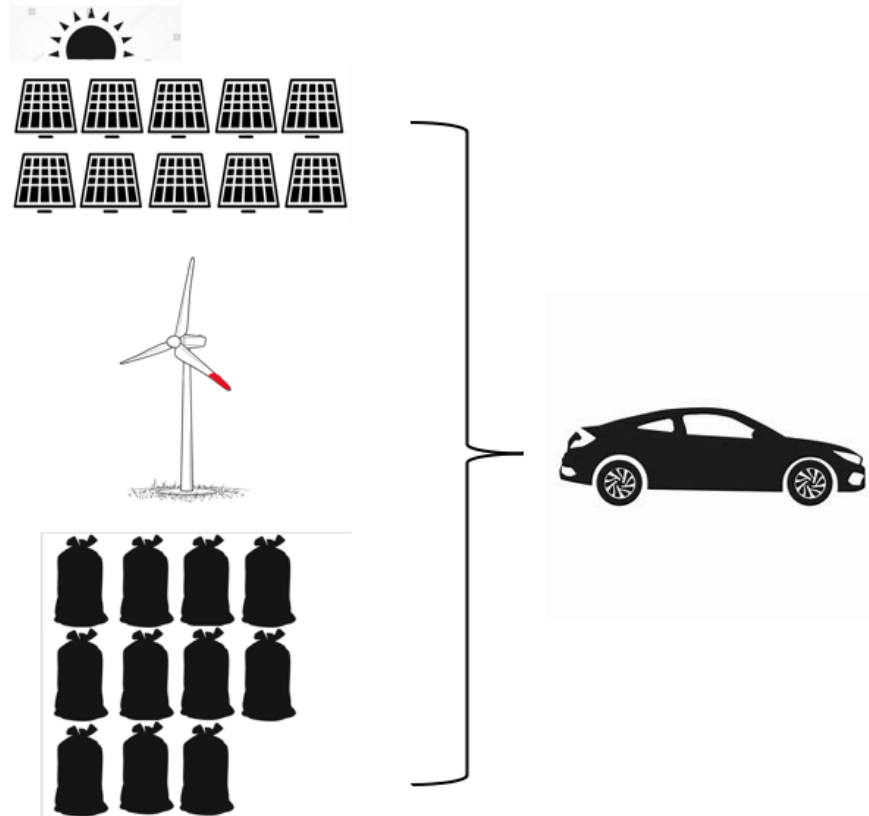
Al analizar las áreas de biomasa que se quemó por combustión directa, esta no varía entre todas debido a los Poderes Caloríficos Inferiores de cada residuo de Producto, siendo el cacao el que ocupa mayor área debido a que su Poder Calorífico Inferior es el mas bajo ocupa mayor cantidad de toneladas de residuos, lo que conlleva a un área mas grande.

El área de los residuos es muy alta debido a que la densidad de residuos en Quito es muy baja según el atlas bioenergético.



**Figura 4.1** Áreas requeridas para generación energía para 1 automóvil [Fuente Propia].

Finalmente se analizará la cantidad de recursos utilizados para que 1 automóvil de pila de hidrogeno recorra 20000 kilómetros al año, como se muestra en la grafica 4.2 la cantidad de recursos solares, eólicos y de masa de residuos utilizados para suplir la demanda energética.



**Figura 4.2** Recursos utilizados para generar energía para 1 automóvil: 10 paneles FV, 0.0015 aerogeneradores (pintado de rojo), 11 quintales de residuos de palma africana [Fuente Propia].

### **Para todos los automóviles de Quito**

Como se observa en la tabla 4.3 se necesita 49603508.54 kg de  $H_2$  para poder abastecer a todos los vehículos del Distrito Metropolitano de Quito al año, también se observa que necesita 443108264.9 kilogramos de agua que se puede expresar como 443108264.9 litros de agua al año.

Al realizar un análisis con respecto al día se puede decir que él para abastecer a todos los vehículos de Quito, que recorre aproximadamente 55 km al día necesita 135900.023 kg  $H_2$  y 1213995.25 litros de agua al día.

**Tabla 4.3** Cantidad de hidrogeno y agua que necesita todos los vehículos de Quito al año y al día [Fuente Propia].

Elemento o compuesto	Kilogramos al año	Elemento o compuesto	Kilogramos al día
$H_2O$	443108264.9	$H_2O$	1213995.25
$H_2$	49603508.54	$H_2$	135900.023
$O_2$	393750927.6	$O_2$	1078769.66

La cantidad de energía eléctrica que se requiere para generar 49603508.54 kilogramos de  $H_2$  es 2742986998.78 [kWh/año], también se estima la cantidad de energía eléctrica que necesita al día para producir 135900.023 kilogramos de  $H_2$  es 7515032 [kWh/día].

Como se observa en la tabla 4.4 se muestra el área requerida para generar energía para todos los automóviles del Distrito Metropolitano de Quito, para estimar estas áreas se toma en cuenta la cantidad de paneles, aerogeneradores y quintales de residuos que se necesitan al año para todos los automóviles.

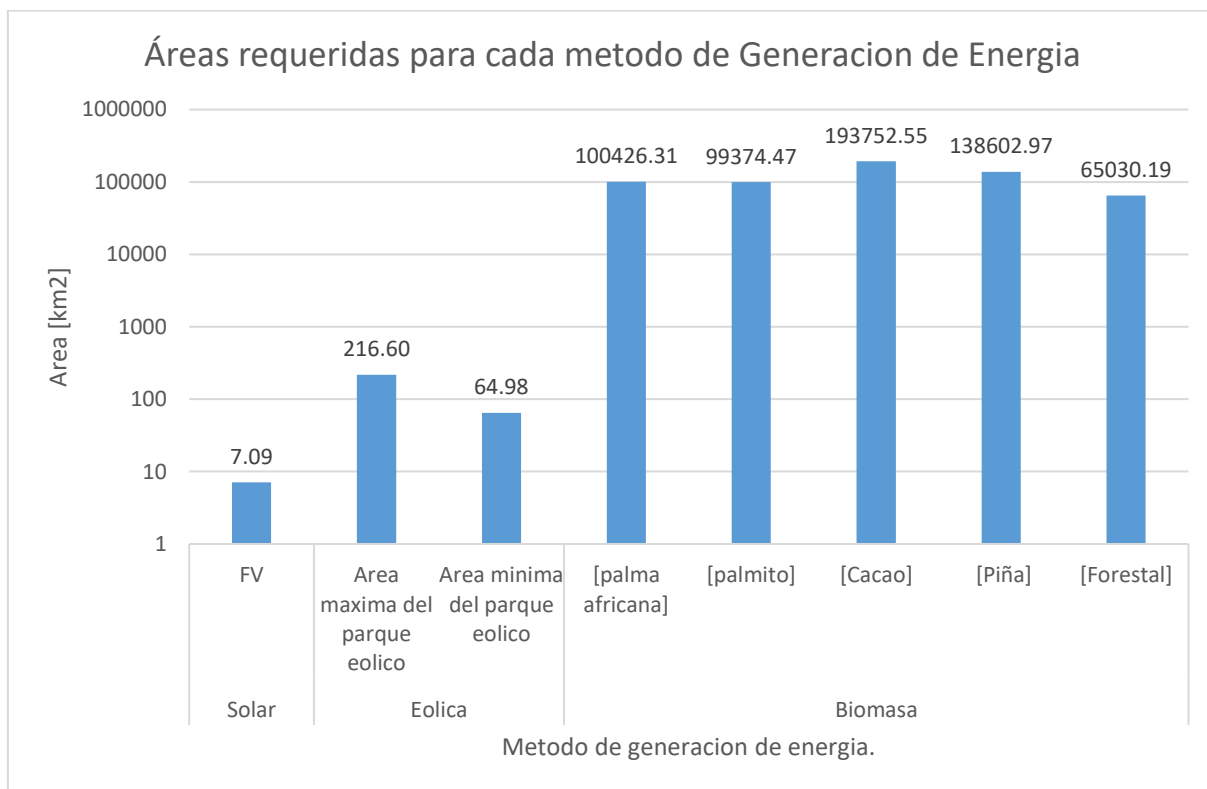
**Tabla 4.4** Áreas requeridas para cada método de generación de energía y cantidad de recursos usados para todos los vehículos de Quito. [Fuente Propia].

Método de producción de Energía	Producto	Área requerida para todos los vehículos de Quito [km <sup>2</sup> ]	Cantidad de (paneles, aerogeneradores y quintales de residuos)
Solar	FV	7.09	3263389
Eólica	Parque eólico Área máxima	216.60	501
	Parque eólico Área mínima	64.98	501
Biomasa	Palma africana	100426.31	3503762
	Palmito	99374.47	3467065
	Cacao	193752.55	6759811
	Piña	138602.97	4835704
	Forestal	65030.19	2268831

En la Figura 4.3 se observa la comparación de las áreas requeridas en  $km^2$  para cada método de generación de energía, se observa que el área más pequeña son la de los paneles fotovoltaicos con un área de  $7.09 km^2$ .

Luego al analizar las áreas requeridas para el parque eólico, suponiendo que tiene 512 aerogenerador y tomando en cuenta las distancias máximas y mínimas entre aerogeneradores, realizando la estructura tresbolillo se tiene que las áreas tienen un rango de  $216.6-64.98 km^2$ , se tiene una buena estimación del área que se ocuparían con los aerogeneradores.

Para el caso de las áreas de los residuos de productos se observa resultados no convenientes ya que son áreas 37 veces mas grandes que el área del Distrito Metropolitano de Quito.



**Figura 4.3** Áreas requeridas para generación energía para todos los vehículos de Quito [Fuente Propia].

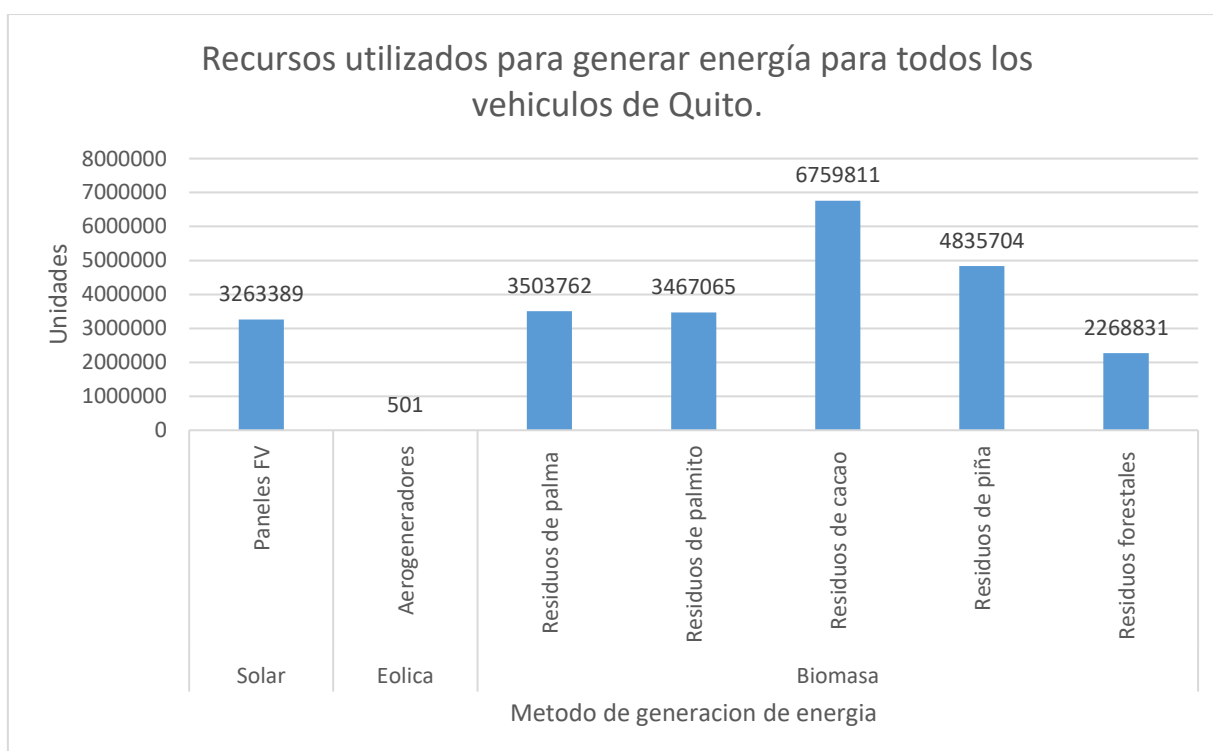
Se observa como estas áreas son más grandes que el área del Distrito Metropolitano de Quito, esto es debido a la baja densidad de residuos en Quito, al cambiar a una densidad diferente se obtienen áreas más realistas como se muestra en la tabla 4.5 donde se realizó el estudio con diferentes densidades tomando en cuenta las densidades de otros cantones.



**Tabla 4.5** Rangos de Áreas para diferentes densidades de residuos en diferentes cantones [30]

Cantón	Densidad de residuos [t/km <sup>2</sup> /año]	Rango de Áreas [km <sup>2</sup> ]
Pedro Vicente Maldonado	147.26	693-2065
Puerto Quito	827.87	123-367
Quito	1.57	65030-193752
San Miguel de los Bancos	114.25	893-2662

Como análisis final se observa los recursos utilizados por cada método de generación de energía en la figura 4.4, la cantidad de aerogeneradores es la menor al tener que ocupar solo 501 aerogeneradores para poder generar la energía requerida para todos los automóviles de Quito.



**Figura 4.4** Recursos utilizados para generar energía para todos los vehículos de Quito [Fuente Propia].

En el caso de los paneles FV se necesitan 3263389 que es una cantidad muy grande en comparación de los aerogeneradores, para poder generar la energía necesaria para suplir la demanda energética para todos los automóviles.

En el caso de los quintales de residuos necesarios se tiene un rango de 2268831-6759811 quintales con un peso de 45kg cada uno para poder generar la demanda de energía necesaria. Los residuos óptimos para el Cantón de Quito son los residuos forestales.

## 4.2 Conclusiones

Existen varias rutas para la producción de hidrogeno. La más madura para la producción de hidrógeno verde con energías renovables es la electrolisis. Para esto se usa de electrolizador el método de Proton Exchange Membrane (PEM) que, a pesar de no ser el más eficiente ni el más económico, es el que mejor se acoplan a sistemas fluctuantes como lo son las energías renovables.

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 4.1 se estimó que se necesita 0.416 kg de  $H_2$  al día o 152 kg de  $H_2$  al año junto a 3.7 litros de agua al día o 1358 litros de agua al año, para generar esta cantidad de hidrogeno se necesita producir energía, 23kWh al día o 8405 kWh al año.

Aunque la investigación tiene límites, al observar la demografía del Distrito Metropolitano de Quito y analizar los atlas energéticos se concluye que tanto la energía eólica y energía solar pueden ser consideradas sostenibles ya que pueden producir la energía eléctrica demandada, la bioenergía en este caso para el cantón de Quito no puede abastecer la demanda energética porque requiere una gran cantidad de recursos.

Finalmente se concluye que a pesar de tener un área mas grande un parque eólico es más sostenible al solo necesitar 501 aerogeneradores en comparación de los 3263389 paneles que a pesar de ocupar un área menor su mantenimiento sería mucho mayor y mas complicado al ser una cantidad tan extensa de paneles FV. Si se compara con la cantidad de quintales de residuos en Quito se concluye que en el mismo no se tiene la cantidad necesaria de residuos para suplir la demanda energética.

### **4.3 Recomendaciones**

Se sugiere realizar estudios similares en otras provincias, cantones o parroquias, de esta forma en un futuro se podrán adoptar estas tecnologías de producción de hidrogeno para la movilidad sostenible.

Se recomienda implementar más información en base a la hoja de ruta del hidrogeno verde en el Ecuador, de esta forma se obtendrán mejores resultados y se puede verificar que tan viable y sostenible son los cambios propuestos.

Los datos y resultados obtenidos en este caso de estudio son específicos para el contexto de la ciudad de Quito. Por lo tanto, no deben ser generalizados ni aplicas en escenarios diferentes.

Se recomienda revisar y ajustar los supuestos utilizados en el estudio para asegurar que reflejen de manera más precisa la realidad caso de estudio. Identificar y analizar posibles supuestos erróneos puede mejorar la calidad y aplicabilidad de los resultados.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Litardo, Estudio de la viabilidad socio-ambiental de hidrógeno como vector energético producido a partir de energías renovables en el Ecuador, Quito, 2014.<sup>00</sup>
- [2] C. F. B. Badia, «Energética del hidrógeno. Contexto, Estado actual y Perspectiva del futuro,» de *Propiedades del Hidrógeno*, Sevilla, Avenida de los Descubrimientos, 2005, pp. 73-81.
- [3] M. H. Brijaldo, «Principales rutas en la producción de Hidrógeno.,» *Cristian Castillo, Geronimo Perez*, vol. 23, nº 2, Enero 28 2021.
- [4] A. K. M. B. Muhammet Kayfeci, «Solar Hydrogen production,» de *Hydrogen Production*, Domenico Ferrero, Academic Press, 2019, pp. 45-89.
- [5] M. Gonzalez Duran, LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES., Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña., 2023.
- [6] A. Kusoglu, «The many colors of Hydrogen,» de *The Electrochemical Society*, Soc. Interface, 2021, pp. 30-44.
- [7] J. G. Velazco, Energías renovables, Barcelona: Reverté. S.A, 2009.
- [8] T. T. F. Elías, DISEÑO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO, Latacunga: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, 2022.
- [9] M. d. R. B. Cervera, Análisis de instalaciones de generación de, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2021.
- [10] M. p. I. T. E. y. e. R. D. (MITERD), Hoja de Ruta de Hidrógeno una apuesta por el hidrógeno renovable., Madrid: BABYDOG arte y comunicación, S.L., 2020.

- [11] D. F. Birol, The Future of Hydrogen, Berlin : International Energy Agency (, 2019.
- [12] M. P. a. D. H. M. Melaina, Resource Assessment for Hydrogen Production, National Renewable Energy Laboratory , 2013.
- [13] D. J. MacKay, Sustainable Energy — without the hot ai, Cambrige: low-resolution edition, 2009.
- [14] M. V. Lopez, Ingenieria de la Energia Eolica, Barcelona : MARCOMBO, S.A., 2012.
- [15] J. C. C. J. E. R. Andrea Bedoya, Produccion Biologica de Hidrogeno: una aproximacion al estado del arte, Medellin: Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [16] M. B. F. S. K. S. A. Z. Pobitra Halder, «Science Direct,» 28 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124002661>. [Último acceso: 20 Julio 2024].
- [17] FLACSO, «Quito Ciudad, capital del Ecuador,» Flaco edu, [En línea]. Available: <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=edd7848c1e759a1bJmltdHM9MTcyMTQzMzYwMCZpZ3VpZD0xY2I0ZjY1Zi04OGFjLTZlZGUtMzE2OC1INGJmODkzYzZmZWmmaW5zaWQ9NTI3Nw&pfn=3&ver=2&hsh=3&fclid=1cb4f65f-88ac-6ede-3168-e4bf893c6fec&psq=quito+ecuador+datos+pdf&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cuZmxh>. [Último acceso: 2024 Julioi 20]
- [18] N. E, «Ecuador Noticias,» Mapa de Quito, 16 Octubre 2012. [En línea]. Available: <https://ecuadornoticias.com/mapa-de-quito/>. [Último acceso: 20 Julio 2024].
- [19] C. P. G. M. L. S. J. V. Daniela Chacón Arias, Informe de Calidad de Vida 2023, Quito: NAtional Endowment Democracy., 2023.
- [20] A. d. R. y. c. d. electricidad, Atlas del sector electrico ecuatoriano., Quito, 2017.

- [21] K. T. M. J. M. José Ramón Gómez, Hoja de ruta de Hidrogeno verde en el Ecuador., Quito: Ministerio de Energía y Minas, 2023.
- [22] D. S. P. Fonseca, «Bluradio,» Cuál es el kilometraje ideal que debería tener un carro dependiendo de sus años, 07 Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.bluradio.com/motor/cual-es-el-kilometraje-ideal-que-deberia-tener-un-carro-dependiendo-de-sus-anos-so35>. [Último acceso: 20 Julio 2024].
- [23] R. E. D. M. L. P. G. G. S. KENNETH W. WHITTEN, Quimica, Ciudad de Mexico: Cengage Learning, 2015.
- [24] L. E.-L. R. A.-L. S. M.-R. Luis Contreras-Vásquez, «Factibilidad de producción de Hidrógeno verde en el Ecuador,» 16 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1805>. [Último acceso: 21 Julio 2024].
- [25] J. P. S. J. S. F.R. Posso, «Estimación del Potencial de Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica en Ecuador,» 12 Enero 2016. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.62>. [Último acceso: 21 Julio 2024].
- [26] I. F. I. Tacuri, Atlas Solar del Ecuador, Quito: CONELEC, 2008.
- [27] P. Store, «Proviento,» Panel Solar 450Wp / 24VDC Monocristalino RESUN RS7I-M-450HC, [En línea]. Available: <https://proviento.com.ec/paneles-solares/34-panel-solar-450wp-24vdc-monocristalino-resun-rs7i-m-450hc.html>. [Último acceso: 21 Julio 2024].
- [28] A. S. B. L. M. V. P. C. S. E. R. I. C. O. S. Medardo Cadena Mosquera, Atlas Eolico del Ecuador con fines de generacion electrica, Quito : MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE: , 2013.
- [29] I. J. J. C. S. V. E. Q. ELIZABETH VELASCO, ESTADO DEL ARTE DE PARQUE EÓLICOS EN CONDICIONES EXTREMAS, Quito: Coordinación General Técnica INER, 2013.

[30]

E. A. V. S. M. P. Richard Espinosa Guzmán, ATLAS BIOENERGÉTICO DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR, Quito: ESIN Consultora S.A. , 2014.