



Universidad de Concepción  
Facultad de Ingeniería

# AISLAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA HÍBRIDA INSULAR EN CHILE

Una propuesta para la sustentabilidad energética insular



Por  
James Alexis Morales Lassalle

Comisión Evaluadora: Dr. Dante Figueroa, Dr. Martín Jaques, Dr. Jorge Jimenez

Profesor guía: Dr. Oscar Link

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al  
grado de Doctor

Agosto 2021

Concepción, Chile

## Dedicatoria

A Carolina. Sin tu incondicional apoyo y fe en mí,  
nada de esto se habría materializado.



## **Agradecimientos**

Un especial agradecimiento a Carolina, mi esposa, y a mi familia, por jamás dudar de qué podría alcanzar este punto. Vuestra fe y apoyo fueron insumo esencial para mi trabajo. Les prometo que su confianza valdrá la pena.

A Dante Figueroa, amigo y mentor. Sin tu apoyo, particularmente en los últimos meses, difícilmente podría haber concretado esto.

Al Dr. Oscar Link, por su gentileza y honestidad, al generar las instancias que propiciaron el cierre de este trabajo.

A DSS S.A., por confiar en mi desempeño, y darme el espacio necesario para poder desarrollar mi trabajo de tesis. Gracias por la confianza Pablo.

A la “Red de Pobreza Energética” de la Universidad de Chile por permitirme participar en su grupo, y darme retroalimentación fundamental para el desarrollo de mi trabajo.

Finalmente, quisiera agradecer a la Universidad de Concepción por brindarme el apoyo institucional para desarrollar esta tesis, además de facilitarme financiamiento a través de becas de exención de arancel y mantenimiento durante parte de mi estadía.



1	Resumen	1
2	Introducción	2
2.1	Optimización Energética Híbrida Renovable	3
2.2	Aislamiento insular	6
2.3	Indicadores de aislamiento	7
3	Hipótesis y objetivos específicos	8
3.1	Objetivo General	8
3.2	Objetivos específicos	8
4	Materiales y métodos	9
4.1	Revisión bibliográfica de sistemas de generación híbridos	9
4.2	Análisis de la relación Habitantes - Consumo eléctrico	10
4.3	Datos de islas chilenas	11
4.4	Desarrollo del Índice de Aislamiento Energético Insular	14
4.4.1	Método Delphi	26
4.4.2	Análisis de robustez	27
4.4.2.1	Método de normalización	28
4.4.2.2	Método de agregación	29
4.4.2.3	Análisis de incerteza	29
4.4.2.4	Análisis de sensibilidad	30
4.4.2.5	Parametrización de referencia	31
5	Resultados	32
5.1	Optimisation of hybrid renewable energy systems on islands: A review	32
5.2	A super linear power law for the energy consumption of islands	54
5.3	Developing an insular energy isolation index: the case of Chile	71
6	Discusión	93
7	Conclusiones	100
8	Referencias	102
9	Anexo	109
9.1	Islas consideradas en el estudio de la relación Habitantes – Consumo eléctrico Anual.	109
9.2	SIDS consideradas en el estudio de la relación Habitantes – Consumo eléctrico anual	110
9.3	Países considerados en el estudio de la relación Habitantes – Consumo eléctrico anual	110
9.4	Islas Maldivas, como parte del estudio de la relación Habitantes – Consumo eléctrico anual	114
9.3	Encuesta Delphi 1ra Ronda	119



# 1 Resumen

En el presente trabajo se evalúa la idoneidad de sistemas híbridos de generación eléctrica, con enfoque particular en islas, tanto del mundo como de Chile, y la posibilidad de cuantificar el nivel de aislamiento energético de estas unidades a partir del diseño de un índice de aislamiento energético insular. El trabajo se divide en 3 partes: (1) Se realiza una revisión bibliográfica de la experiencia en optimización de sistemas híbridos en islas alrededor del mundo; (2) Se identifican características que convierten a las islas en unidades geográficas especiales desde el punto de vista energético; (3) Se plantea la construcción de un índice que refleje las condiciones de aislamiento energético a las que se ven sometidas las comunidades insulares. Para abordar el punto (1) se realizó una extensa revisión bibliográfica en revistas indexadas, que incluyeran un proceso de optimización de sistemas híbridos (o Hybrid Renewable Energy System, por sus siglas en inglés). La muestra consideró un total de 73 islas, distribuidas por todo el mundo, incluyendo pequeñas comunidades insulares (como Mykines y Eigg), así como islas con alto grado de desarrollo y población (como Canarias o Hainan). El trabajo permitió recolectar información relacionada con: aspectos demográficos y geográficos de las islas, nivel de demanda eléctrica y metodologías de obtención de perfiles de carga, metodologías de evaluación del potencial energético renovable, objetivos de optimización, metodologías y herramientas de optimización, mix de generación y almacenamiento de energía. En el trabajo se discuten elementos comunes en los procesos de optimización, así como los principales desafíos de su diseño. Además, se identificó de manera preliminar una relación de potencia, con exponente superior a 1 entre las variables de población y consumo eléctrico, elemento que fue analizado en la segunda parte de esta tesis.

Para el punto (2) se sugirió una ley de potencia entre las variables de población y consumo eléctrico anual para islas. En este caso, se escogió una muestra de 51 islas distribuidas por todo el mundo, pero que cumplieran con criterios que aseguraran su aislamiento. El resultado demostró que el consumo energético seguía una relación de potencia con exponente 1.12 y un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.91$ . La relación demostró ser significativa estadísticamente, mientras que las variables se distribuyen de manera normal. Los resultados fueron comparados con los obtenidos para otras entidades geográficas, en particular, países y pequeños estados insulares en desarrollo (SIDS), verificándose una diferencia significativa para ambos casos. Se hipotetizó tanto en los alcances de este resultado, como las posibles explicaciones de la diferencia entre las distintas entidades geográficas. Algunas posibilidades serían: ineficiencias en el transporte de la electricidad, existencia de deseconomías de escala, la distribución espacial de los asentamientos insulares y finalmente el efecto que aspectos políticos pudiesen tener en el consumo eléctrico.

Finalmente, para abordar (3) se planteó el diseño de un indicador compuesto, al que se llamó "Índice de Aislamiento Energético Insular" y que permite evaluar "La carencia en el acceso a un conjunto de fuentes y/o servicios energéticos, propiciado por las condiciones territoriales inherentes de una isla". Se identificaron 4 dimensiones para abordar esta problemática, a partir de las cuales se definieron 8 indicadores. El índice se sometió a un análisis de incerteza y sensibilidad para evaluar la robustez del mismo y finalmente ser aplicado a una muestra de 58 islas chilenas con asentamientos permanentes.

## 2 Introducción

Uno de los mayores desafíos para Chile, es el acceso equitativo a los diversos servicios energéticos existentes. Hasta hace algunos años, el acceso a electricidad de manera continua, a costos razonables, y de buena calidad, estaba reservado sólo a aquellas zonas que estuviesen interconectadas a alguno de los sistemas mayores (SIC-SING-SEA-SEM), mientras que zonas aisladas o con generación autónomas, debían subsistir con la carga de costos de generación considerablemente más caros e inestables que el resto del país.

Sin embargo, durante la última década en Chile se han logrado profundos avances en materia de energía, lo que se refleja en el fomento a la inversión en infraestructura energética (CNE, 2020), reducción de costos de la energía (Ley N° 20928, 2016), descarbonificación (MINENERGIA, 2020a), planificación a largo plazo (MINENERGIA, 2017), eficiencia energética (Ley N° 21305, 2021) y un fuerte impulso a fuentes energéticas renovables, a través de políticas como la Ley N° 20.698 (2013) o la estrategia nacional de hidrógeno verde (MINENERGIA, 2020b). Chile se ha propuesto como meta mejorar el sistema eléctrico en términos de robustez, resiliencia, acceso y calidad, expresamente descritos en al menos dos pilares de la política 2050: Seguridad y Calidad de Suministro y Energía como Motor de Desarrollo.

Existen tanto elementos internos como externos que propician los cambios observados. Por un lado, durante la última década se ha evidenciado un involucramiento cada vez mayor de la ciudadanía en torno al desarrollo de proyectos energéticos, lo que a menudo ha derivado en extensos procesos judiciales. De hecho, solo los proyectos del sector energético abarcan un 32% del total de procesos en judicialización para finales de 2019, igualando a los sectores de minería e inmobiliarios en conjunto (CPC, 2019). Por otro lado, factores externos han influenciado fuertemente las políticas públicas orientadas a mejorar la sustentabilidad ambiental, a partir de compromisos internacionales generalmente asociados al cambio climático (Decreto 30 del Ministerio de Relaciones Exteriores, 2017). En este contexto, uno de los grandes desafíos energéticos de Chile es lograr un sistema robusto, de calidad y con acceso equitativo para toda la población.

A pesar de esto, existe aún mucho trabajo por realizar en zonas geográficamente desconectadas del país, particularmente islas o comunidades rurales. En muchos casos aún se cuenta con suministro limitado de energía (electricidad disponible solo durante un período del día), deficiencias en la distribución, altos costos para el consumidor, sistemas con un potencial compromiso del medio ambiente o incluso, simplemente, sin acceso a electricidad. En el reporte “Ruta de la Luz” desarrollado por el Ministerio de Energía (MINENERGIA, 2019), se indica que al menos unas 24.556 viviendas no tienen acceso a energía, destacando la Región de Los Lagos con un total de 4.383 (ver Figura 1).

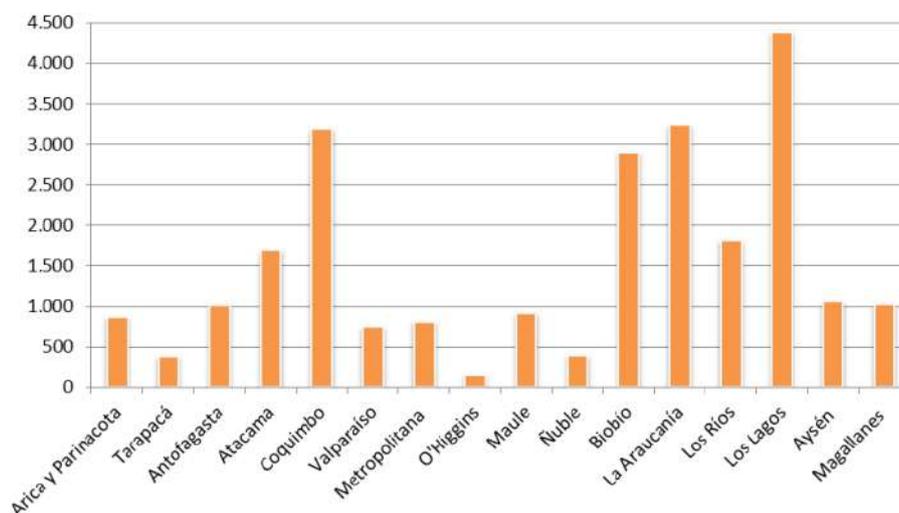


Figura 1. Viviendas sin energía por Región. Fuente: MINENERGIA, (2019).

El acceso a la electricidad ha sido descrito por diversos autores como el elemento fundamental para alcanzar un desarrollo social profundo (Aguirre-Mendoza et al., 2019; CEPAL, 2009; Pelz & Urpelainen, 2020). De esta manera, aquellas zonas o unidades territoriales que tengan la condición de “aisladas”, a menudo presentan niveles de desarrollo inferiores a sus pares que cuentan con un nivel de conexión mayor (CEPAL, 2009). Dentro de estas zonas, como se discutirá en profundidad más adelante, destacan los habitantes de islas pues presentan elementos de aislamiento intrínsecos a su condición de insularidad, tales como distancia a centros urbanos, alta dependencia de combustibles importados para la generación, escaso acceso a servicios energéticos y aislamiento territorial.

Para abordar los elementos que determinan las condiciones de aislamiento energético de estas comunidades, es necesario contar con alguna herramienta que permita evaluar la información disponible, y condensarla a través de indicadores que reflejen esta realidad. Para lograr esto se propone el diseño del “**Índice de Aislamiento Energético Insular**”; indicador que dará cuenta de las brechas de acceso y calidad a los servicios eléctricos en las islas, así como reconocer elementos comunes entre estas, de manera de facilitar el análisis sobre estas y eventualmente priorizarlas de acuerdo con la implementación de políticas públicas.

De igual manera, se analizará la posibilidad de implementación y optimización de sistemas de generación eléctrica renovable híbridas (o HRES, por sus siglas en inglés: Hybrid Renewable Energy Systems), particularmente en zonas que comparten la condición insular, a través de una revisión literaria de estudios de optimización energética en el mundo. Finalmente, se aplicará el indicador desarrollado a un conjunto de islas chilenas y se elaborará un ranking de acuerdo con el grado de aislamiento energético que estas posean.

## 2.1 Optimización Energética Híbrida Renovable

Debido a su alta disponibilidad y madurez tecnológica, la generación en base a combustibles fósiles (principalmente diésel) ha sido la metodología más usada para proveer energía eléctrica a comunidades aisladas (Kennedy et al., 2017). En estos casos, si bien se logra satisfacer la demanda de manera potencialmente continua, los costos comparativos son considerablemente

mayores que otras fuentes energéticas (Thomas et al., 2016). Además, su uso supone al mismo tiempo una importante afectación al medio ambiente (Mahesh & Sandhu, 2015). Por ejemplo, en el caso de comunidades insulares, existe un potencial riesgo debido al transporte del combustible diésel en barco y emisiones contaminantes (Biobio Chile, 2021; El Mercurio, 2019; Kuang et al., 2016). Esto se vuelve particularmente relevante en el caso de las islas dada su alta dependencia de combustibles fósiles para la generación, como única fuente (Gils & Simon, 2017).

Por otro lado, la posibilidad de conexión de estas comunidades a redes de distribución centralizadas a menudo no es una opción, por el alto costo que esto conlleva, ya sea mediante cables aéreos o submarinos (Aguirre-Mendoza et al., 2019).

Diversos estudios han concluido que la mejor estrategia para enfrentar esta problemática es la utilización de sistemas híbridos de generación, los que consideran el uso de más de una fuente energética, con al menos una de ellas de origen renovable. Esto último resulta una característica incluso atractiva para las islas, dado que estas presentan, a menudo, un significativo potencial energético renovable (Dorotić et al., 2019; Enevoldsen & Sovacool, 2016; Katsaprakakis, 2016; H. Liu & Qu, 2014; Meza et al., 2019; Segurado et al., 2011). El uso de sistemas de este tipo puede mejorar la eficiencia y confiabilidad, superando las limitaciones económicas que surgen al utilizar solo una fuente (Lin et al., 2016; Siddaiah & Saini, 2016; Thomas et al., 2016). Un ejemplo de estos sistemas en nuestro país es el proceso de electrificación de las islas del Archipiélago de Chiloé, que inició en el año 2000 al instalar un sistema de generación híbrido en Isla Tac, en base a energía eólica y respaldo diésel, permitiendo a su comunidad contar por primera vez con electricidad las 24 horas (Stevens et al., 2001). Este estudio derivó en que en la actualidad 6 islas del grupo Desertores cuenten con sistemas de generación híbridos (solar, eólico y diésel).

Las herramientas de dimensionamiento y optimización de sistemas híbridos son variadas, y una gran cantidad de estudios se han llevado a cabo para probar su eficacia en zonas aisladas. Las etapas presentes en un proceso de optimización pueden resumirse como se indica en la Figura 2.

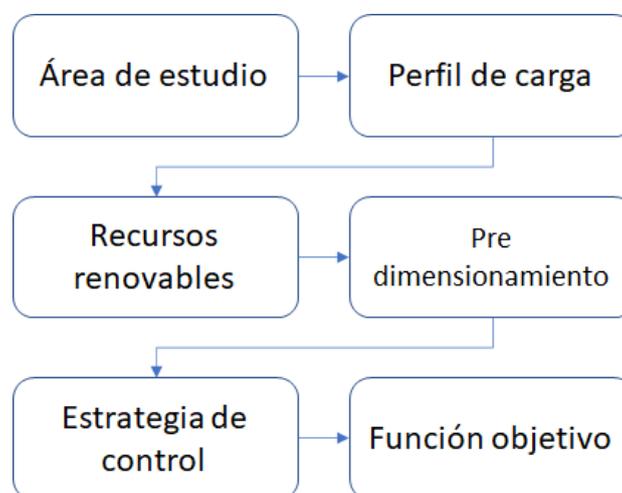


Figura 2. Proceso general de optimización energética. Fuente: elaboración propia

**Área de estudio:** En cualquier proceso de optimización, es importante definir la localización geográfica de la entidad o sistema a optimizar, así como las características del sistema: número de viviendas (y de habitantes), tipo de consumo, infraestructura energética disponible, existencia de subsidios al consumo eléctrico o restricciones geográficas (por disposición legal) a la instalación de sistemas de generación, por ejemplo, en lugares que se encuentren en zonas protegidas.

**Perfil de carga:** El perfil de carga es una curva que describe el consumo energético a lo largo de un período de tiempo determinado. Este tipo de información es de vital importancia pues determina el patrón de consumo que el sistema de generación deberá satisfacer. Justamente su definición es uno de los elementos más complejos a obtener para el caso de comunidades aisladas pues, a menudo, no existe información al respecto. Diversas metodologías permiten lograr una aproximación al perfil de carga real, y pueden clasificarse en top-down y bottom up, que son descritas con mayor detalle en la sección 5.1 del presente manuscrito.

**Recursos renovables:** Una correcta optimización energética dependerá de la calidad de los datos de entrada del recurso renovable disponible. Al igual que en el caso del perfil de carga, diversas metodologías permiten aproximaciones con distintos grados de precisión, desde modelos globales, datos históricos o la comparación con otros lugares que compartan similitudes geográficas. Estas metodologías son descritas en detalle en la sección 5.1 de la presente tesis.

**Predimensionamiento:** El predimensionamiento involucra la evaluación de potenciales componentes a utilizar. Esto es, tipos de turbinas o paneles fotovoltaicos, su capacidad, rendimiento, o las características de los sistemas de respaldo y almacenamiento, si fuera el caso. De igual manera, resulta conveniente tener estimaciones de costos de cada uno de los componentes, pues permitirá determinar los costos de implementación del sistema.

**Estrategia de control:** En esta etapa se planifica el funcionamiento de los sistemas de almacenamiento. En qué condiciones se realiza carga o descarga de baterías, en qué momento los excedentes son transferidos a un sistema centralizado (si fuere el caso) o como el sistema responderá ante las variaciones de demanda de energía o potencia. La mayoría del software de optimización energética incluyen estrategias de control entre sus parámetros de entrada.

**Función objetivo:** En la literatura se describen diversos objetivos por los cuales implementar un sistema de generación híbrido. Sin embargo, la mayoría se define entre la minimización de los costos finales de una unidad de energía, a menudo llamado LCOE (Levelized Cost of Electricity), la maximización de la cobertura eléctrica o la mejora en algún parámetro medioambiental (como la reducción de gases de efecto invernadero, o el porcentaje de penetración de fuentes renovables). Cabe señalar que, a menudo, estos objetivos no son compatibles entre sí, de modo que disminuir los costos finales de la energía, no necesariamente va de la mano con la mejora de los parámetros ambientales.

Finalmente, en el estudio realizado por Morales et al., (2021), adjunto en la sección 5.1 de este manuscrito, se realiza una revisión extensa sobre procesos de optimización energética híbrida en 73 islas alrededor del mundo, logrando capturar elementos en común, además de los principales desafíos que debe enfrentar su diseño e implementación.

## 2.2 Aislamiento insular

Las comunidades insulares son, a menudo, sistemas complejos donde aspectos demográficos, sociales, económicos, culturales y políticos, deben interactuar en pequeñas escalas espaciales (Clark, 2009; Figueroa & Rotarou, 2016; Petridis et al., 2017). De igual manera, la condición insular supone una especial vulnerabilidad ante eventos como desastres naturales o los efectos del cambio climático (Betzold, 2015; Kelman, 2017; Rampengan et al., 2014; Veron et al., 2019). Por otro lado, diversos autores han señalado que los aspectos más críticos que afectan el desarrollo social y económico de una isla están íntimamente ligados con la disponibilidad de fuentes de generación energética (o la dependencia de combustibles importados), suministro de agua potable, tratamientos de desperdicios y el transporte (Aguirre-Mendoza et al., 2019; Chen et al., 2007) (Aguirre-Mendoza et al., 2017; Chent et al., 2007; van Alphen, 2007). Muchas de las problemáticas aquí señaladas, se asocian a una característica en común que muchas islas poseen: su aislamiento. De hecho, en el trabajo de Liu et al. (Y. Liu et al., 2018), se definen cuatro criterios que determinan si una zona (no necesariamente una isla) se encuentran aislada: (i) considerables distancias a grandes centros poblados, (ii) acceso limitado a la red eléctrica, (iii) alta dependencia en combustibles importados, (iv) problemas en transporte (interconectividad). Todos aspectos comúnmente presentes en comunidades aisladas (Figura 3).

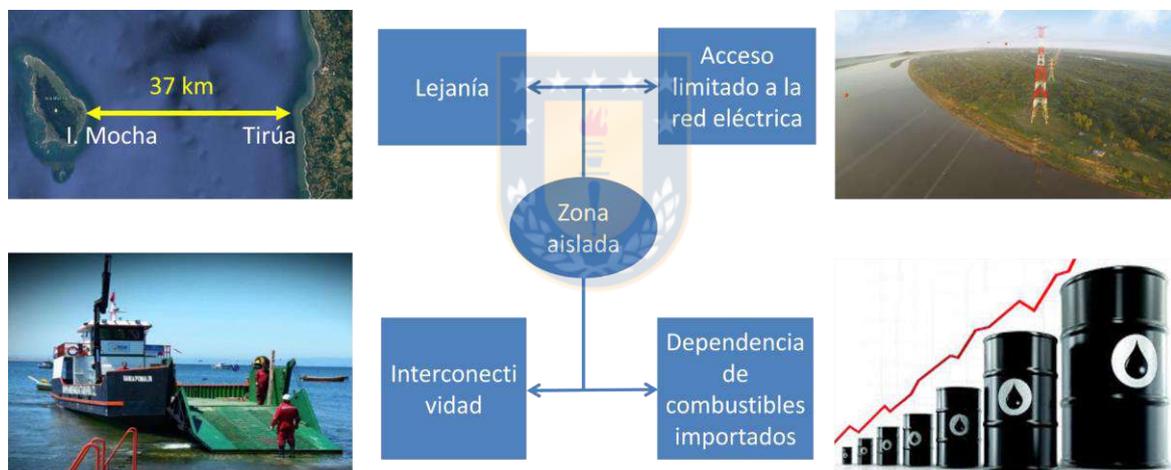


Figura 3. Características comunes de zonas aisladas, a menudo presentes en comunidades insulares. Fuente: elaboración propia en base a Liu et al., (2018).

Cabe señalar que, de los 4 elementos que definen a una zona aislada, dos (ii y iii) están directamente relacionadas a brechas de acceso energético, de manera que los efectos propios del aislamiento natural de las islas propician brechas de acceso a distintos servicios energéticos. La calidad insular, por ende, implica condiciones de aislamiento energético. En el presente trabajo, se definirá el aislamiento energético como "La carencia en el acceso a un conjunto de fuentes y/o servicios energéticos, propiciado por las condiciones territoriales inherentes de una isla".

En nuestro país, el problema del aislamiento de los territorios se ha abordado en estudios como el trabajo de Arenas et al., (1999), donde se presenta una metodología, que permite identificar el nivel de aislamiento territorial para las comunas de Chile. El objetivo fue "poner en relieve las enormes diferencias existentes entre las distintas comunas y facilitar futuras acciones diferenciadas en materia de políticas públicas". La base metodológica del estudio fue

actualizada en 2012, hasta alcanzar un nivel de madurez que permitió caracterizar el aislamiento territorial a nivel de “localidad”: unidad geográfica arbitraria definida como la agrupación de viviendas habitadas en una zona en particular del país (Carvajal et al., 2012). Este estudio, que presenta el “indicador de aislamiento territorial”, permite visualizar cómo las características geográficas del país propician condiciones de “aislamiento estructural”. Por ejemplo, mientras los niveles de interconexión entre la zona centro y norte del país permiten desplazamientos relativamente rápidos entre distintas localidades, hacia el sur, y particularmente desde la Región de Los Lagos, los accidentes geográficos y la disgregación del continente en cientos de islas, propician condiciones naturales de aislamiento.

Aunque menos documentado, existen aproximaciones al nivel de aislamiento de comunidades insulares en Chile, como se discute en el trabajo de Rojas Zamorano & Szlafsztein, (2019), basado justamente en el indicador de Carvajal et al., (2012). El estudio se aplicó a 10 comunas de la provincia de Chiloé, permitiendo identificar su grado de aislamiento. Si bien esto significa un avance para abordar la realidad que viven los habitantes de las islas de Chile, se hace necesario profundizar y extender el análisis.

## 2.3 Indicadores de aislamiento

Como se mencionó anteriormente, Arenas et al. (1999) desarrolló un indicador de aislamiento territorial en base, principalmente, al criterio de expertos en el tema. Para ello se evaluaron elementos físicos, económicos, demográfico-culturales y administrativos. A partir de este trabajo es posible caracterizar el aislamiento a lo largo de nuestro país, con una escala de nivel comunal. Posteriormente, en el estudio de Carvajal et al., (2012), la metodología es refinada, definiendo formalmente un índice de aislamiento como:

$(2 \times \text{Grado Integración}) - \text{Condiciones Geográficas Estructurales} = \text{Índice de Aislamiento}$

El primer término de la relación hace referencia a aquellos componentes que permiten disminuir o atenuar las condiciones de aislamiento natural o estructural (segundo término) de una determinada localidad. El factor “X 2” de la ecuación, se pensó de manera de resaltar aquellos elementos que efectivamente son susceptibles de ser intervenidos, de manera de reducir los niveles de aislamiento. La definición de ponderaciones y los ámbitos considerados fueron definidos por el equipo de expertos consultado.

En términos generales, el uso de indicadores (de diversa índole) ha tenido un largo desarrollo en el tiempo, siendo utilizados en diversos campos, transformándose en una potente herramienta de información para los tomadores de decisiones y el público en general (Singh et al., 2012), pues permiten capturar realidades o fenómenos complejos y multidimensionales de manera simple y fácil de entender (Saltelli, 2007). De igual forma, Schuschny y Soto (2009), en su Guía metodológica para el diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible, destacan el uso de indicadores por su capacidad de síntesis, lo que permite orientar a tomadores de decisiones y enfocar el debate político.

## 3 Hipótesis y objetivos específicos

### 3.1 Hipótesis

- Los sistemas de generación híbridos resultan apropiados para responder a las necesidades energéticas de zonas aisladas como las islas.
- Las islas presentan características de aislamiento energético inherentes a su condición de insularidad, que las hacen distinguibles de otras entidades geográficas.
- Las características de aislamiento pueden ser levantadas mediante un indicador compuesto que recoja la carencia en el acceso a un conjunto de fuentes y/o servicios energéticos.

### 3.2 Objetivo General

Evaluar la idoneidad del uso de sistemas energéticos híbridos para islas de Chile en conjunto con el desarrollo de un índice de aislamiento energético insular.

### 3.3 Objetivos específicos

- Verificar el uso de sistemas híbridos de generación eléctrica en islas en el mundo.
- Comparar el uso de energía en islas, respecto de otras entidades geográficas.
- Construir y validar un índice de aislamiento energético insular.
- Caracterizar las islas en estudio en base indicadores que recojan las brechas de acceso a fuentes y servicios energéticos.

## 4 Materiales y métodos

### 4.1 Revisión bibliográfica de sistemas de generación híbridos

Para dimensionar los alcances y características de un proceso de optimización energética híbrida, aplicado a islas, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de estudios que abordan la temática, tanto a nivel conceptual, como de implementación.

El estudio consideró 73 casos de optimización energética híbrida, distribuidos por todo el mundo (ver Figura 4). Para cada caso revisado se recogió la información señalada en la:

Tabla 1. Variables recogidas a partir de la revisión bibliográfica.

Categoría	Variable
Identificación	Nombre de isla
Geográfico	País
	Continente
	Latitud - Longitud
	Superficie [km <sup>2</sup> ]
Demográfico	Población
Energético	Interconexión (aislada o conectada a la red)
	Capacidad [MW]
	Carga máxima [kW]
	Consumo eléctrico [MWh/año]
Optimización energética híbrida	Tipo de escenario de optimización
	Metodología de optimización
	Objetivo de optimización
	Capacidad del sistema híbrido [MW]
	Fuentes de generación
	Almacenamiento
	Perfil de demanda
Información de recurso renovable	
Economía	Principal actividad económica

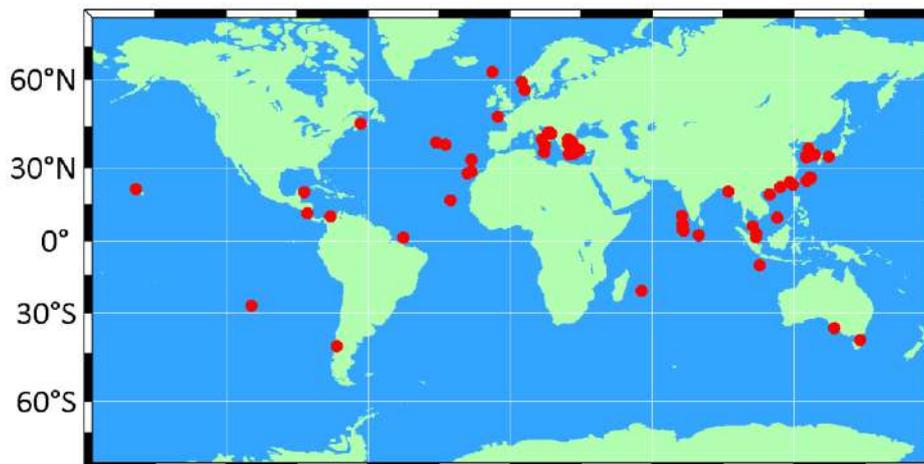


Figura 4. Localización de las 73 islas analizadas

## 4.2 Análisis de la relación Habitantes - Consumo eléctrico

Esta parte del estudio, al igual que lo señalado en la sección 4.1, involucra el análisis de islas alrededor del mundo. Sin embargo, su enfoque es más específico y orientado a comprender las características de la relación entre habitantes de una isla y el respectivo consumo eléctrico anual.

Para ello, se consideró una serie de criterios de exclusión para las islas revisadas, particularmente en el sentido de no combinar islas con grados muy distintos de aislamiento. Esto último es relevante porque, por ejemplo, existe unidades insulares que se encuentran considerablemente más interconectadas que otras, como la isla de Manhattan, en Estados Unidos, o incluso a escala local, con el caso de Chiloé. Así, el alcance de esta parte del estudio consideró:

1. La población de las islas debe ser de al menos 100 habitantes, y no más de 1.000.000. El límite inferior se aplica para asegurar que alguna comunidad habite la isla de manera permanente, de modo que se cuente, idealmente, con servicios públicos o sanitarios que requieran un suministro estable de energía. El límite superior fue establecido para evitar que islas con alto grado de desarrollo social y económico puedan alterar los requerimientos naturales de energía de una isla.
2. Solo se considerarán territorios administrativamente dependientes de otra entidad política, o de otro estado soberano. De esta manera, se excluyen las islas que son en sí mismos estados (como los pequeños estados insulares en desarrollo, o SIDS, por sus siglas en inglés).
3. Solo islas eléctricamente aisladas entrarán al estudio. Las islas interconectadas con redes de distribución centralizadas, o conectadas a su vez con otras islas no entrarán al estudio. Esto con el objetivo de evitar que la demanda eléctrica de otras entidades afecte los valores de consumo de la isla.
4. Solo se considerará información disponible o publicada luego del 2015 (ya sea de consumo eléctrico o de población de la isla). El objetivo es limitar el espacio de tiempo entre las distintas mediciones, de modo de que los datos analizados sean comparables.

Junto con el universo de islas considerados en este estudio, se realizó un análisis similar en otras entidades geográficas, de manera de evaluar sus similitudes o diferencias. Así, se considerará por separado el caso de pequeños estados insulares en desarrollo (SIDS) y países del mundo<sup>1</sup>

Finalmente, el estudio consideró 51 islas no interconectadas, 14 SIDS y 160 países (datos disponibles en los Anexos 9.1, 9.2, 9.3). Además, se realizó un análisis particular al caso de Maldivas, país que cuenta con al menos 182 islas habitadas, aunque de manera separada, para que el peso relativo de este conjunto de islas (respecto del resto de islas no interconectadas) no afecte la relación final (datos disponibles en Anexo 9.4).

---

<sup>1</sup> La mayoría de las SIDS puede considerarse, a la vez, un país. En este caso, se priorizará su condición de SIDS, antes que de país.

## 4.3 Datos de islas chilenas

Si tomamos en cuenta lo descrito en el “Boletín Informativo: Territorio insular chileno. Tipología, superficie y número de unidades” (Errázuriz & Rioseco, 1983), es posible identificar al menos unas 5.900 islas entre los extremos norte y sur de nuestro país, mientras que otras 8.333 no cabrían dentro de la categoría de islas. Sin embargo, del conjunto total, solo algunas decenas presentan una población permanente y, por ende, susceptibles de ser analizadas desde el punto de vista energético. Para definir el conjunto de estudio se utilizará el Sistema de Información Geográfico QGIS. Para el estudio se considerarán todas las islas de Chile que posean asentamientos humanos permanentes y que cumplan con los requisitos que se mencionan a continuación:

- Que existan al menos 1 servicio de salud.
- Que exista al menos 1 establecimiento educacional.
- Que no cuenten con estatutos o leyes territoriales especiales (como Rapa Nui o el Archipiélago Juan Fernández), o consideren una administración especial de las Fuerzas Armadas, como es el caso de isla Quiriquina o Dawson.

De los criterios recién definidos, es posible identificar 58 islas, distribuidas desde la Región del Biobío hasta la Región de Magallanes, las que se encuentran listadas en la Tabla 2.

Finalmente, para generar una base de datos con la información relativa a islas de Chile, se llevó a cabo un exhaustivo proceso de consulta a organismos estatales, respecto a información de sistemas de generación, capacidad, consumo y combustible. La información recibida por medio de Transparencia puede ser consultada en la carpeta Anexo “Información Autoridades”. Además, a partir del Censo 2017 se obtuvo información relativa a los habitantes de cada isla, así como la distribución de estos en la respectiva unidad geográfica.

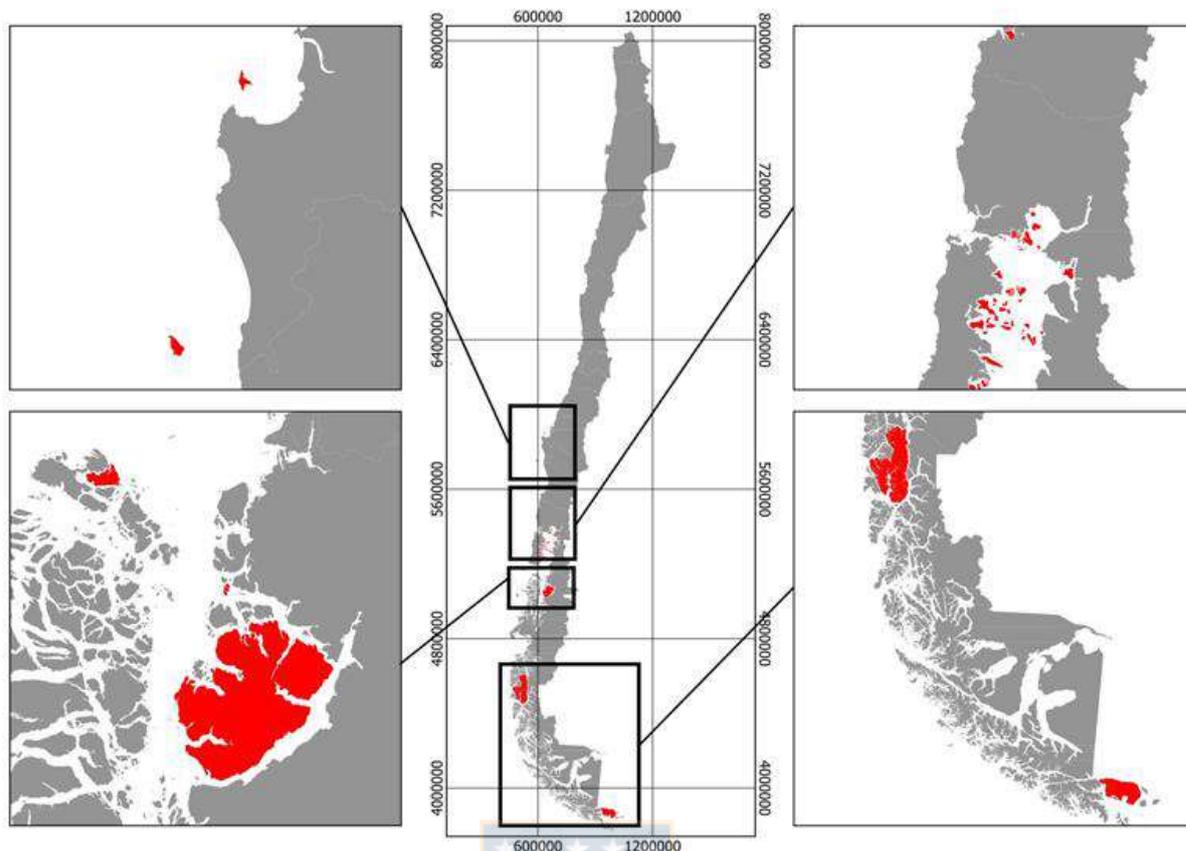


Figura 5. Mapa general de las islas consideradas en este estudio.

Tabla 2. Tabla de islas consideradas para el estudio (n.e. significa "no específica").

Nombre Isla	Hbts.	Capacidad instalada (KW)	Hrs Suministro	Combustible para generación [L]	Consumo eléctrico [kWh/año]
Abtao	268	Conectada a la red			n.e.
Acuy	51	40	12	17.759	70.025
Ahullini	40	-	24	15.300	27.505
Alao	293	100	24	82.502	56.353
Añihue	161	40	12	34.000	29.698
Apiao	621	200	24	53.950	102.766
Ascensión	1.454	1.32	24	527.238	n.e.
Aulin	76	60	12	26.400	15.396
Butachauques	506	315	23	84.000	167.431
Caguache	309	150	24	47.526	59.712
Cailín	220	200	24	73.820	73.156
Calbuco	9.46	Conectada a la red			n.e.
Cucahue	355	Conectada a la red			n.e.

Chaulinec	151	200	24	55.450	80.971
Chauflín	69	40	12	18.650	18.925
Chelín	143	300	18	29.340	55.164
Chenio	91	164	12	57.700	n.e.
Chidhuapi	316	Conectada a la red			n.e.
Chuit	93	35	24	16.500	37.311
Chulín	89	55	24	17.200	23.411
Coldita	101	100	24	18.940	15.553
Del Rey	444	Conectada a la red			n.e.
Huapi	292	417	24	0	n.e.
Huar	988	Conectada a la red			n.e.
Imerquiña	12	10	24	2.880	3.067
Laitec	309	100	24	55.450	104.740
Las Huichas	838	482	24	n.e.	n.e.
Lemuy	3.739	Conectada a la red			n.e.
Linlín	379	576	12	92.594	89.514
Llahuen	25	0	0	0	0
Llancahué	84	0	0	0	0
Llanchid	34	20	24	4.320	19.800
Llingua	250	150	24	45.850	48.204
Magdalena	65	100	18	43.200	n.e.
Maillén	929	Conectada a la red			n.e.
Mancera	41	Conectada a la red			n.e.
Mechuque	302	234	24	76.400	62.845
Meulín	488	200	24	62.490	110.797
Mocha	406	525	24	65.000	n.e.
Navarino	55	2.148	24	n.e.	n.e.
Nayahue	64	55	24	15.300	27.505
Puluqui	2.302	Conectada a la red			n.e.
Quehui	608	200	24	85.650	211.307
Quenac	312	150	24	50.800	86.792
Quenu	124	100	24	20.400	n.e.
Queullín	157	0	0	0	0
Quihua	1.807	Conectada a la red			n.e.

Quinchao	7.889	Conectada a la red			n.e.
Santa María	1.173	450	24	311.440	n.e.
Tabón	374	289	24	47.600	n.e.
Tac	182	30	24	25.855	70.025
Talcan	113	60	24	16.080	19.639
Taucolón	42	30	12	21.000	5.836
Tenglo	1.359	Conectada a la red			n.e.
Teuquelin	32	34	12	18.935	4247
Toto	130	100	24	42.391	n.e.
Tranqui	161	Conectada a la red			n.e.
Wellington	100	400	14	117.965	n.e.

#### 4.4 Desarrollo del Índice de Aislamiento Energético Insular

Tal como se señaló los objetivos de la presente tesis, se plantea el diseño de un indicador compuesto que permita evaluar “la carencia en el acceso a un conjunto de fuentes y/o servicios energéticos, propiciado por las condiciones territoriales inherentes a una isla”. Este indicador se llamará “Índice de Aislamiento Energético Insular” o IAEI, en adelante.

Dado que las condiciones de aislamiento de una entidad geográfica pueden analizarse desde distintos enfoques, el IAEI debe recoger la multidimensionalidad de las condiciones de aislamiento energético. Se definieron, entonces, 4 categorías:

**Electricidad:** Dimensión que evalúa el acceso a servicios eléctricos.

**Combustibles:** Involucra el acceso a combustibles (líquidos y GLP) y la dependencia a la importación de estos para la generación eléctrica.

**Aislamiento territorial:** La componente territorial se evaluará a través del indicador de aislamiento territorial elaborado por (Carvajal et al., 2012), para la SUBDERE.

**Potencial Renovable:** Potencial energético renovable, eólico y solar.

Tabla 3. Indicadores seleccionados para cada categoría

Categoría	Sub-Categoría	Indicador	Fuente
Electricidad	Acceso al suministro eléctrico	Disponibilidad de electricidad	Portal Transparencia
		Distancia a subestación de distribución más cercana	Cálculo a través de software GIS
Combustibles	Dependencia de combustibles importados para generación eléctrica	Cantidad de combustibles importados per cápita para generación eléctrica	Portal Transparencia
	Combustibles líquidos	Disponibilidad de combustibles líquidos	(Briano & Herrera, 2018)

	GLP	Disponibilidad de GLP	(Briano & Herrera, 2018)
Aislamiento territorial	Aislamiento territorial	Aislamiento territorial	(Carvajal et al., 2012)
Potencial renovable	Potencial eólico	Velocidad del viento	(MINENERGIA, 2021a)
	Potencial solar	Irradiancia global horizontal	(MINENERGIA, 2021b)

Las fuentes de datos para obtener la información de los indicadores se indican en la Tabla 3. A su vez, el detalle de cómo serán considerados se indica a continuación:

- **Disponibilidad de electricidad:** indicador que describe el acceso a energía eléctrica proveniente desde un sistema de distribución centralizado. Existen dos posibles valores para este indicador: 0, en el caso de que no se cuente con algún sistema de generación centralizado y 1, en caso de que efectivamente exista un sistema de generación, o bien la isla se encuentra interconectada con otro sistema eléctrico. Para esta metodología, la generación propia a partir de mini generadores diésel, no se considerará como “disponibilidad de electricidad”. Valores intermedios podrán ser obtenidos en caso de que la isla cuente con acceso parcial, o sea, solo una porción de la isla tenga acceso a la red, o bien el suministro sea por algunas horas al día. En cualquiera de estos casos, el indicador tomará el valor de la suma ponderada entre la cantidad de habitantes y el régimen de acceso al cual estén sometidos. Información obtenida a partir del Portal de Transparencia.
- **Distancia a la subestación eléctrica más cercana:** la distribución de la energía eléctrica dentro del sistema depende de la existencia de subestaciones de distribución a lo largo del país. A medida que una comunidad se encuentra más alejada del sistema, aumenta el nivel de aislamiento energético. Esta información será obtenida a partir de información geográfica de las redes de generación y distribución eléctricas, dispuestas por “Comisión Nacional de Energía”(CNE, 2021). El cálculo se realizará a partir del punto geográfico de la isla más cercano a la subestación eléctrica.
- **Dependencia de combustibles importados para la generación eléctrica:** Este índice permite cuantificar el grado de dependencia que presentan las islas, respecto al combustible importado necesario para la generación eléctrica. La unidad de medida en este caso será de litros/cápita. Información obtenida a partir del Portal de Transparencia.
- **Disponibilidad de combustibles líquidos:** indicador que describe el acceso de las comunidades a servicios de distribución de combustibles líquidos (estaciones de servicio). Según el informe de Briano & Herrera, (2018), existen 3 categorías de acceso a combustibles líquidos: Sin acceso; con acceso, pero a precios sobre el promedio nacional; con acceso a un precio igual o menor al promedio nacional. A estas 3 categorías se les asignará un valor de -1, 0 y 1, respectivamente. Ahora bien, dado que esta información es relativa a pequeñas comunidades, de las cuales puede haber varias en una misma isla, se realizó un promedio ponderado respecto de cuántos habitantes de cada isla están en alguna de estas categorías, y así obtener valores intermedios.
- **Disponibilidad de GLP (Gas Licuado de Petróleo):** indicador que describe la disponibilidad de GLP en las comunidades. En base a la metodología de cálculo descrita

en Briano & Herrera, (2018), solo existen dos posibilidades para esta variable: con acceso sobre el valor promedio de Chile, o igual o menor al precio promedio de Chile. Esto ocurre por la forma en que este combustible es distribuido en Chile, donde existen diversas empresas que realizan el reparto a domicilio. Según la metodología, aquellas zonas del país donde no se suele utilizar este combustible, es simplemente porque su precio no lo hace una competencia razonable para otros energéticos como la leña, de la cual existe mucha disponibilidad en zonas rurales del sur del país. De esta manera, este indicador sólo puede tomar valores entre 0 y 1.

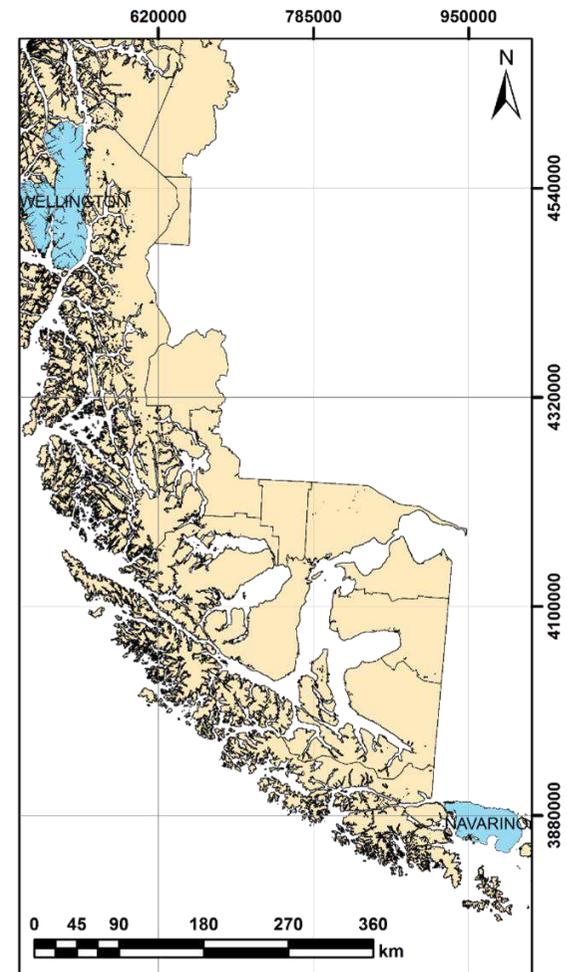
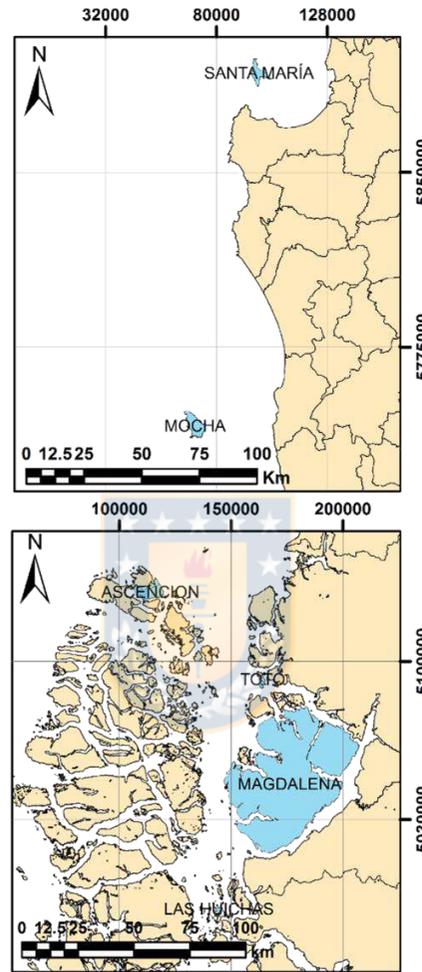
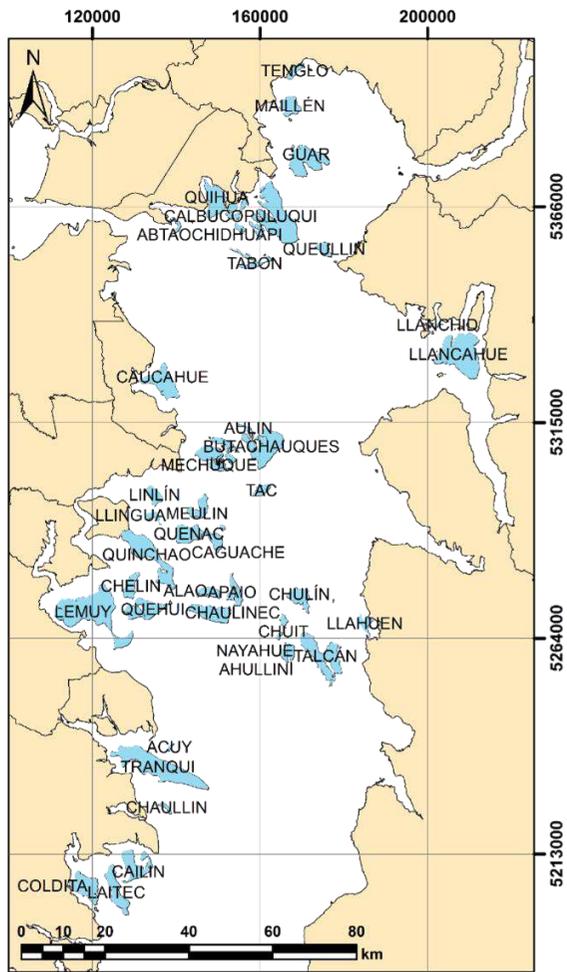
- **Aislamiento territorial:** esta variable se obtiene directamente desde el índice de aislamiento territorial desarrollado por el Departamento de Estudios y Evaluación de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo de Chile (Carvajal et al., 2012). En este informe se define el Índice de Aislamiento como:

$(2 \times \text{grado de integración}) - \text{condiciones geográficas estructurales} = \text{índice de aislamiento}$

De dónde el *grado de integración*, considera indicadores de acceso a servicios de educación, salud y proveedores de bienes y servicios. Las condiciones geográficas estructurales describen las distancias (medidas en horas de viaje) desde el punto de aplicación a centros urbanos o centros político-administrativos. De esta manera, el índice puede tomar valores de -1 a 2, siendo -1 el máximo aislamiento posible, y 2 el máximo grado de integración posible. Cabe señalar que, metodológicamente, este indicador se aplica a la entidad geográfica "Localidad" que, a su vez, se divide en Zonas Urbanas y Entidades Rurales. De esta manera, como en una misma isla es probable que existan diversos tipos de entidades, para lograr un valor específico por isla, se trabajó con un promedio ponderado en relación con la cantidad de habitantes en las respectivas entidades. La información de población se obtuvo a través del "Instituto Nacional de Estadísticas" (INE) de Chile (INE, 2018).

- **Velocidad del viento:** Se entiende que, en la medida que un territorio (isla en este caso), presente un bajo potencial energético renovable, podría considerarse más aislado energéticamente que otro territorio que tenga mayor potencial renovable. Esta definición, más bien cualitativa, puede ser llevada a una dimensión cuantitativa si se considera alguna variable física del recurso. El National Renewable Energy Laboratory (NREL) utiliza una escala de "clases de viento", determinada por la densidad de potencia del viento. A su vez, con algunas suposiciones metodológicas, es posible obtener esta cantidad a partir del promedio anual de la velocidad del viento (Burdett & Van Treuren, 2014). Esta información puede ser obtenida, para Chile, a través del Explorador Eólico del Ministerio de Energía de Chile (MINENERGIA, 2021a).
- **Irradiancia global horizontal:** De manera análoga al caso de la energía eólica, en Právālie et al., (2019) se propone una clasificación para el potencial energético solar, en base a la irradiancia global horizontal promedio anual. Esta información puede ser obtenida, para Chile, a través del Explorador Solar del Ministerio de Energía de Chile (MINENERGIA, 2021b).

Las figuras 6 a la 14 muestran espacialmente los indicadores considerados para la muestra de 58 islas.



**Simbología**

- División comunal
- Islas seleccionadas

**DATOS CARTOGRÁFICOS Y GEODÉSICOS**

Datum: WGS 1984  
 Proyección: Universal Transverse Mercator (UTM)  
 Huso: 19S

Figura 6. Las 58 islas que forman parte del estudio.

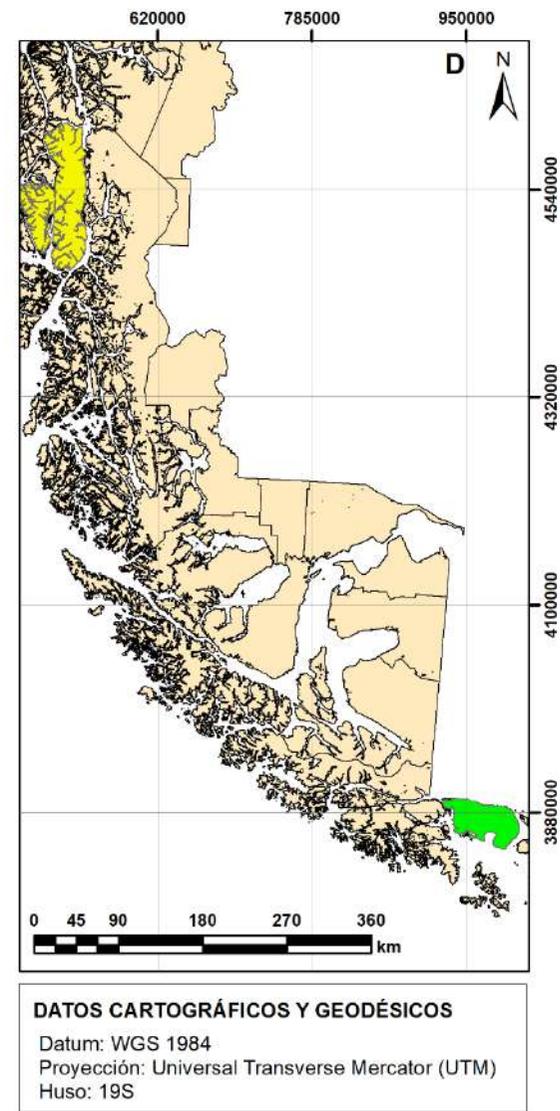
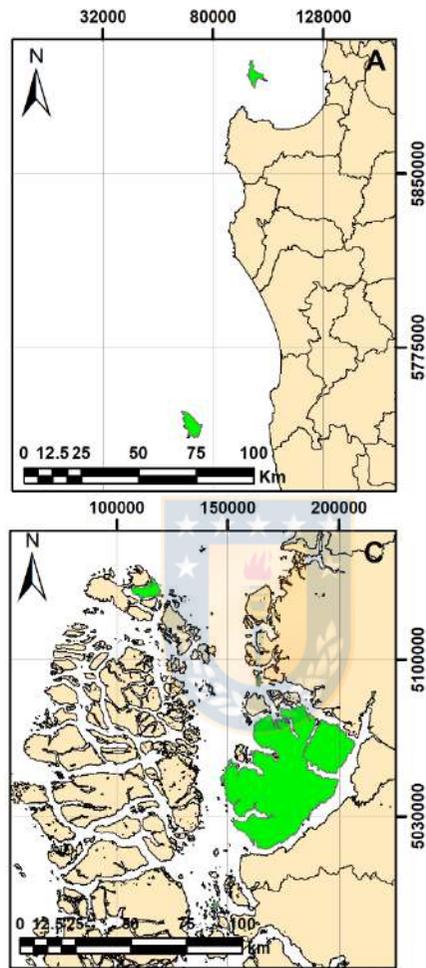
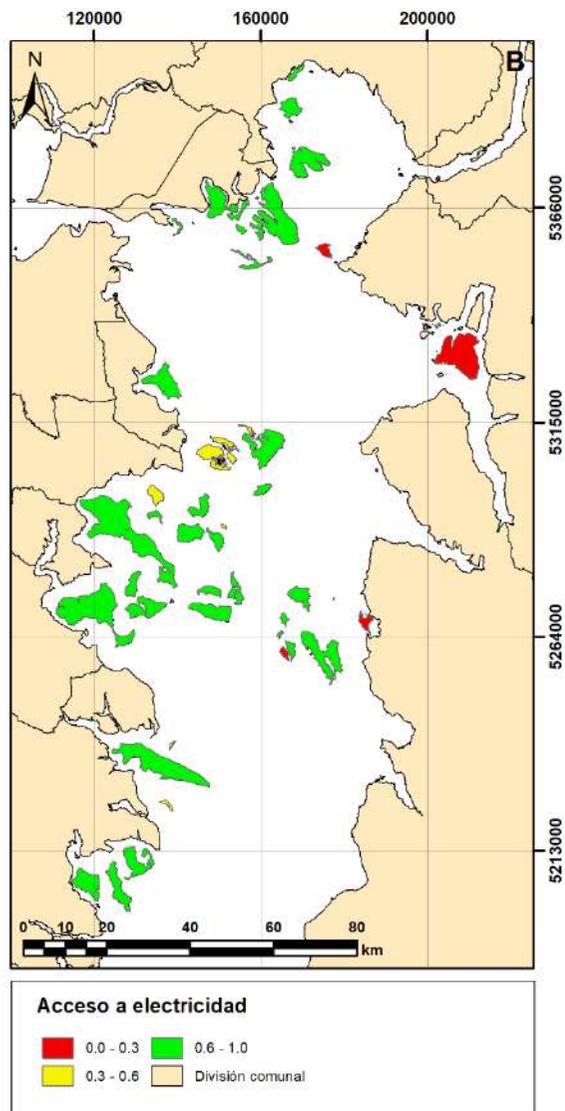


Figura 7. Acceso a electricidad, donde 0 implica sin acceso, y 1 con acceso las 24 horas. Los valores intermedios se explican por acceso parcial al suministro eléctrico.

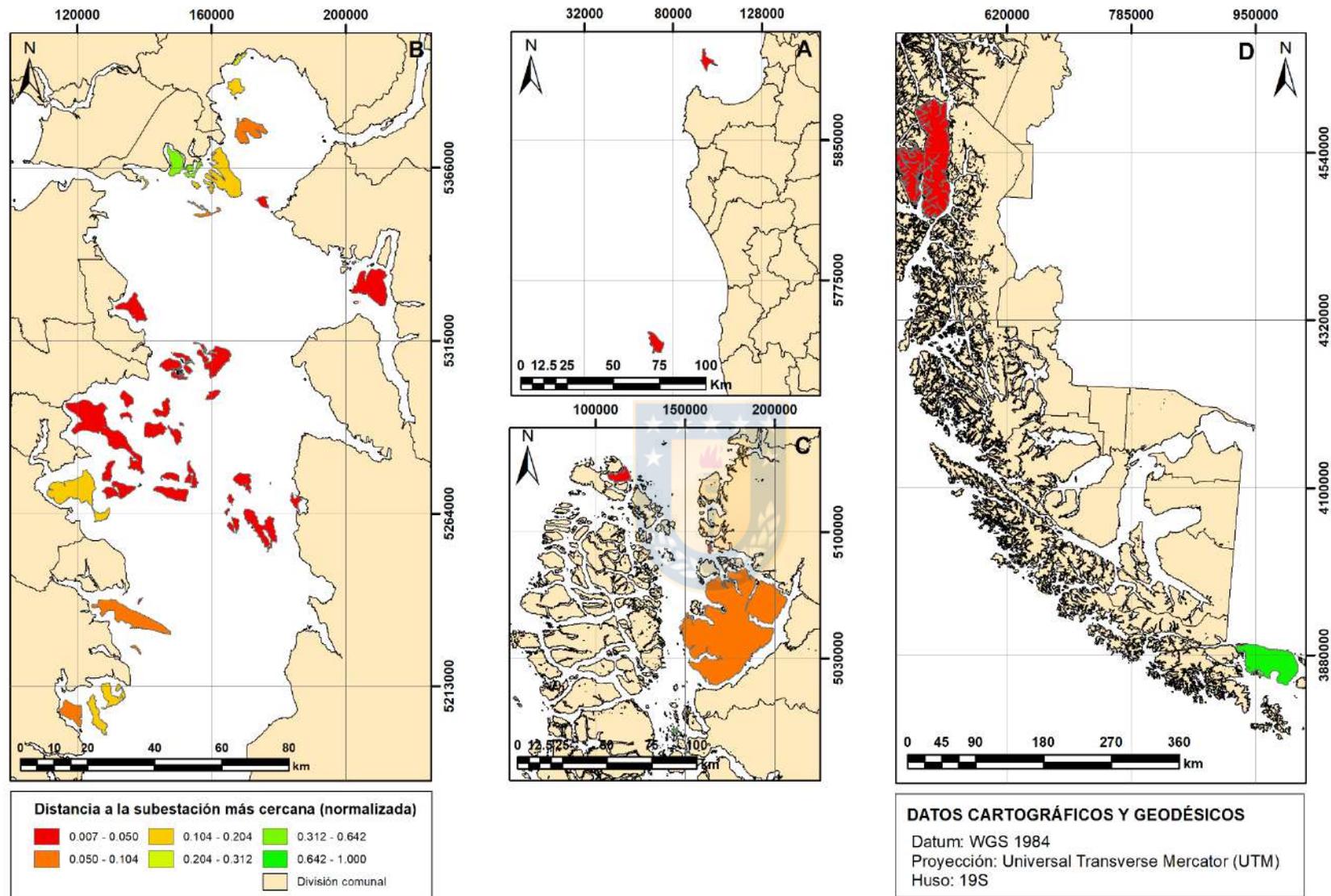


Figura 8. Distancia a la subestación eléctrica más cercana. Los valores se encuentran normalizados según la isla más lejana a una subestación (correspondiente al valor 0).

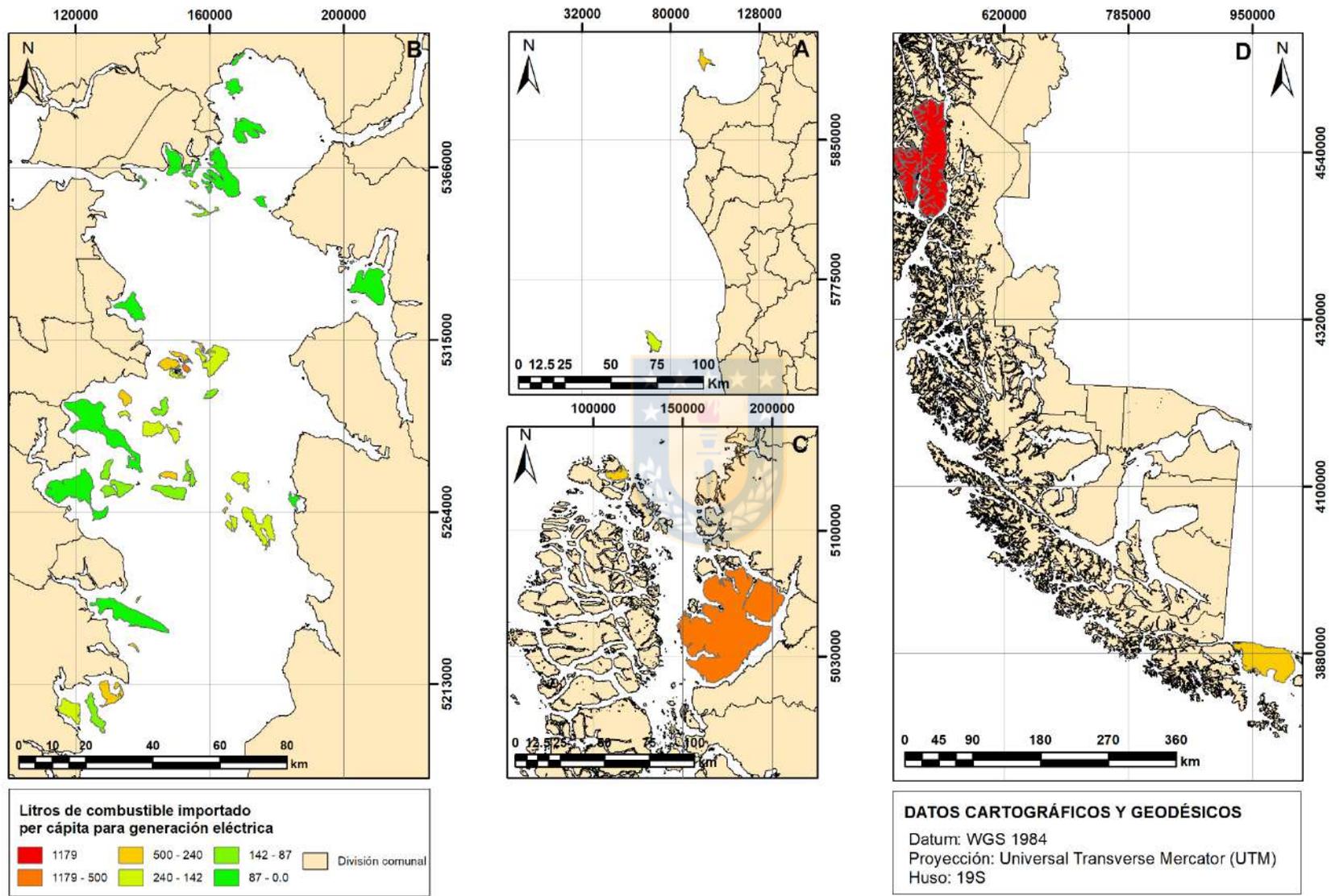


Figura 9. Consumo de combustibles líquidos para generación eléctrica, en litros per cápita.

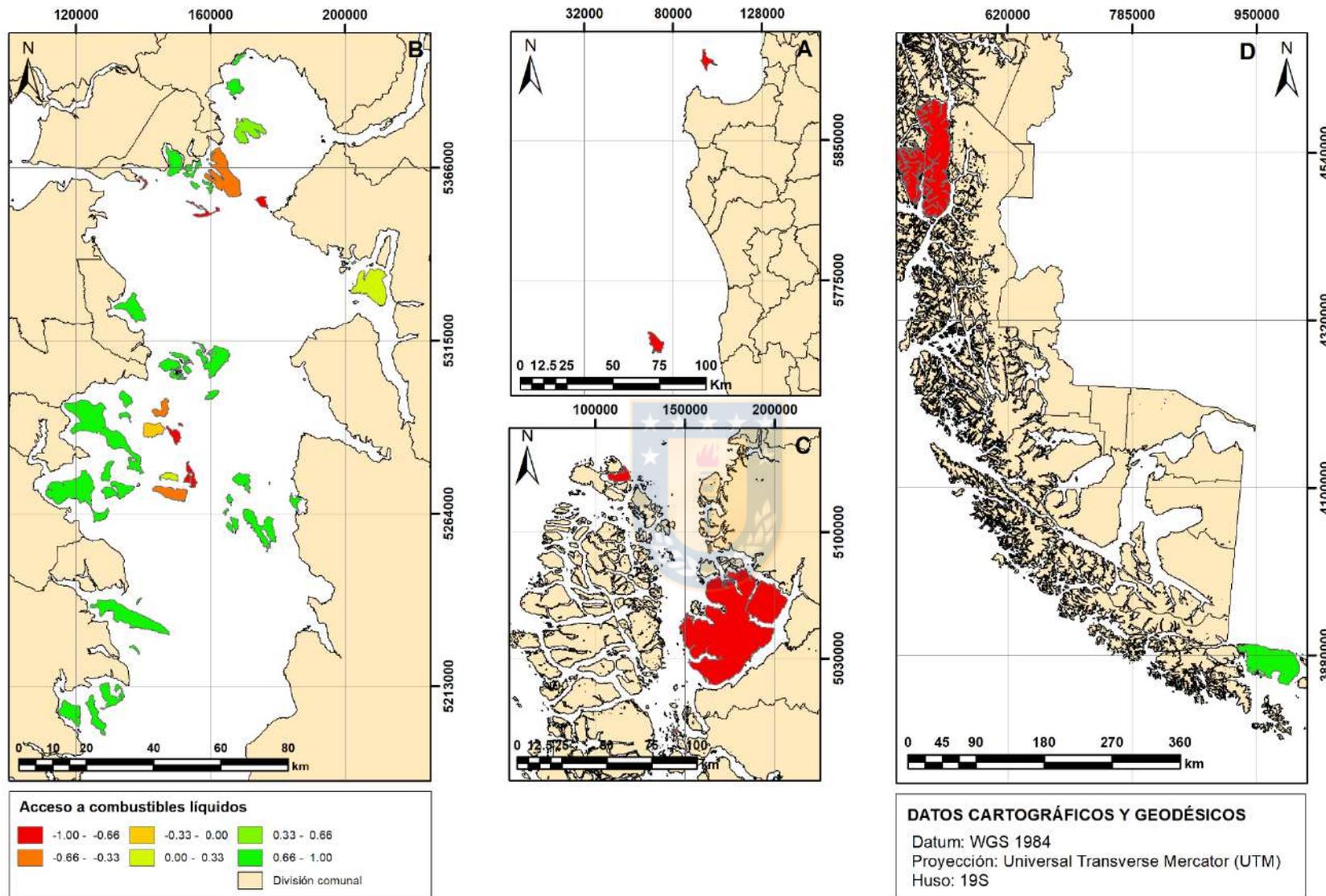


Figura 10. Nivel de acceso a combustibles líquidos. El valor -1 indica sin acceso. El valor 0 indica acceso a un costo superior al promedio nacional. El valor 1 indica acceso a precios inferiores al promedio nacional. Valores intermedios indican distintos niveles de acceso en una isla.

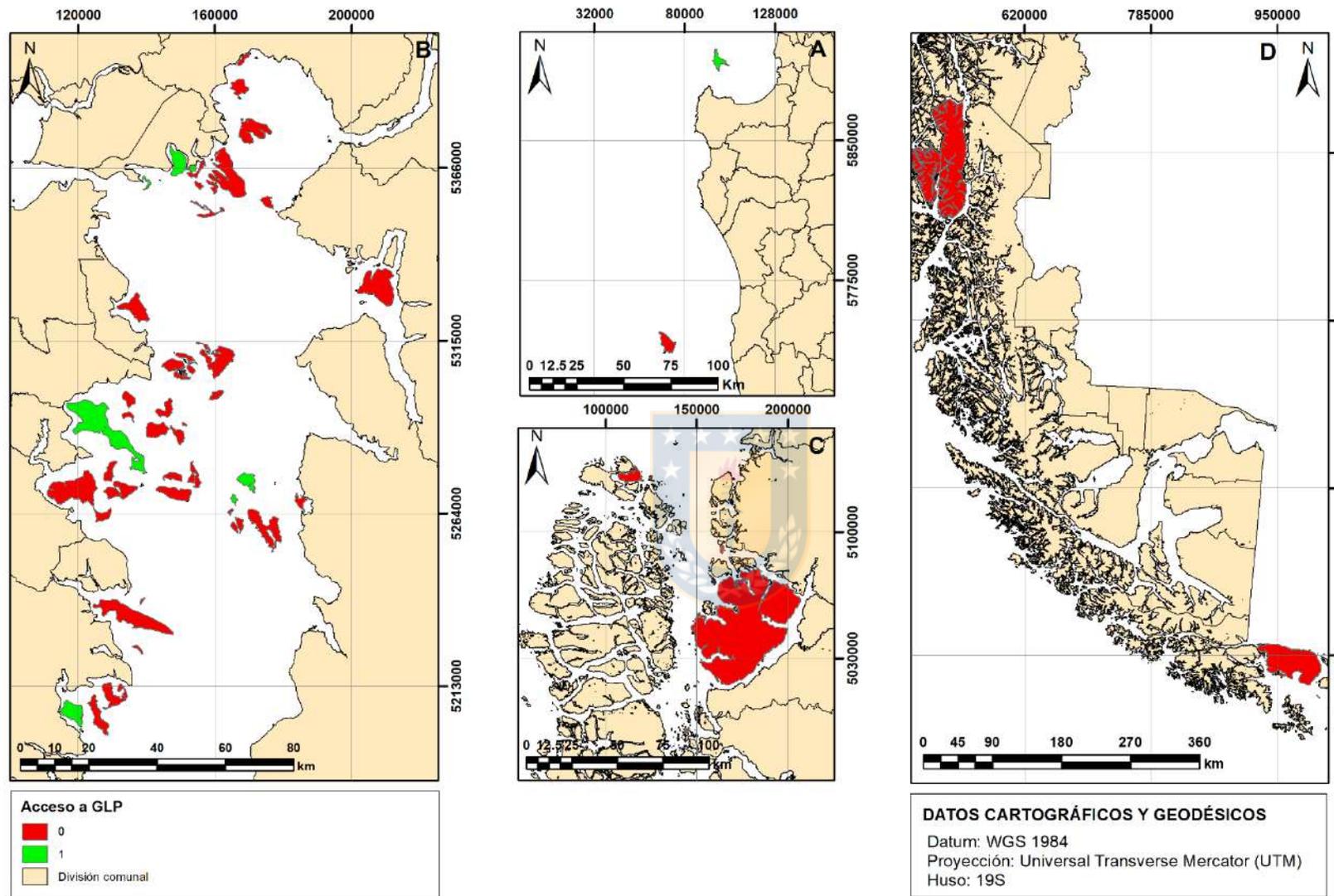


Figura 11. Nivel de acceso a GLP. El valor 0 indica acceso a costos superiores al promedio nacional. El valor 1 indica costos inferiores al promedio nacional. Cabe señalar que, a diferencia del caso de combustibles líquidos, la metodología elaborada por Briano & Herrera, (2018), no considera zonas aisladas por GLP.

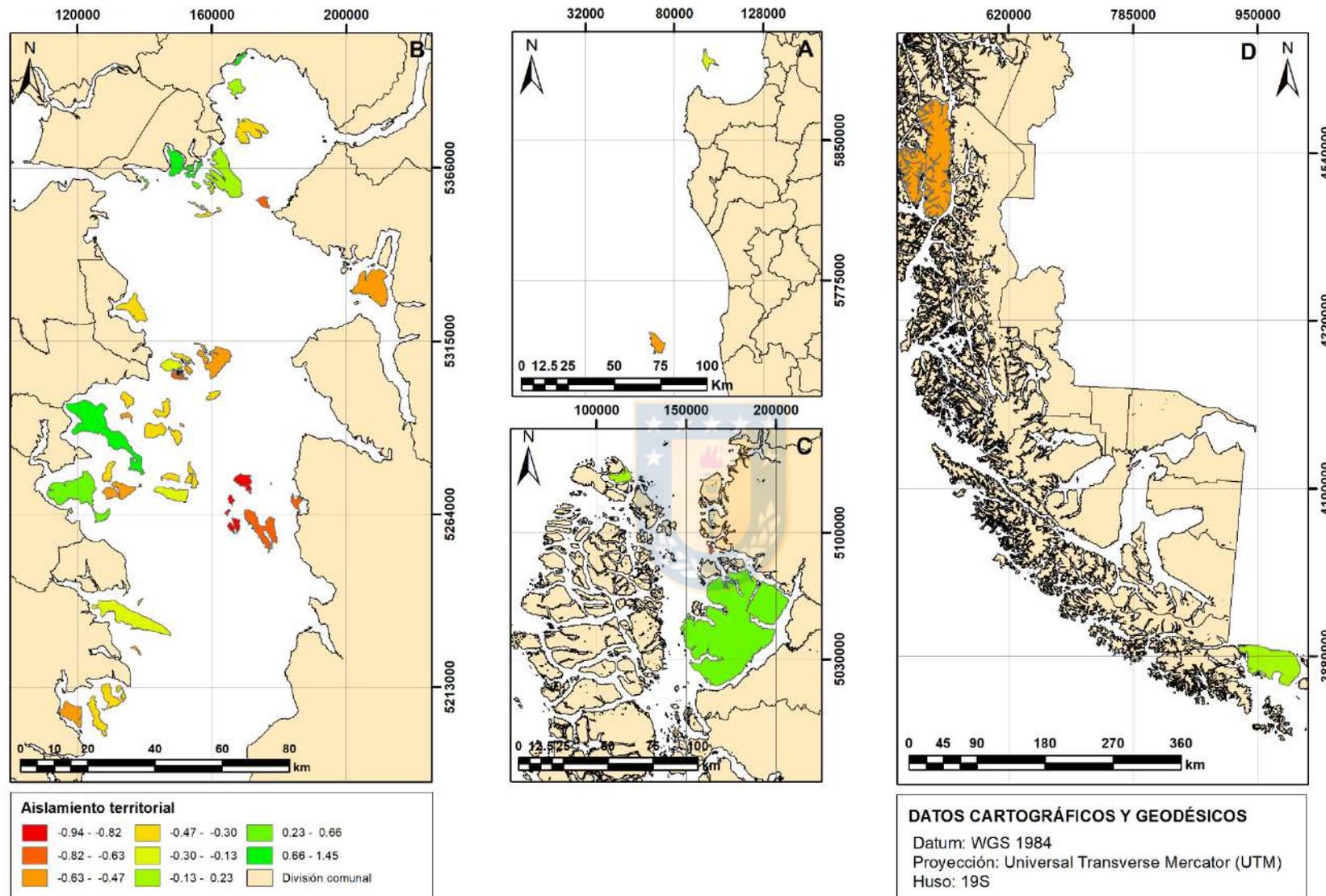


Figura 12. Nivel de aislamiento territorial según metodología de Carvajal et al., (2012). Los valores fueron llevados al nivel de isla a partir de un promedio ponderado de los valores de cada entidad rural, en base a la población registrada en cada entidad.

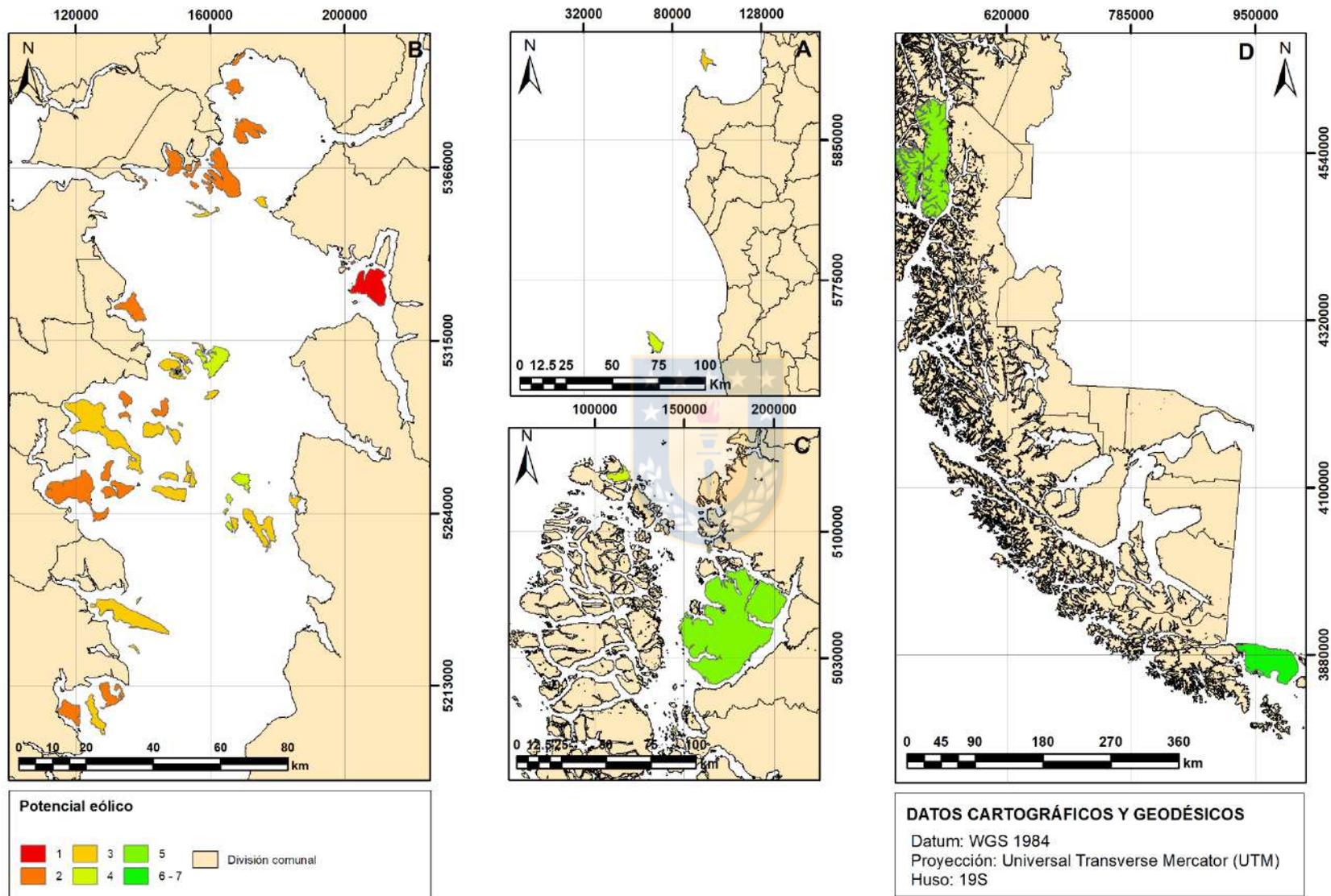


Figura 13. Potencial renovable eólico en base a “clases de viento” según Burdett & Van Treuren, (2014).

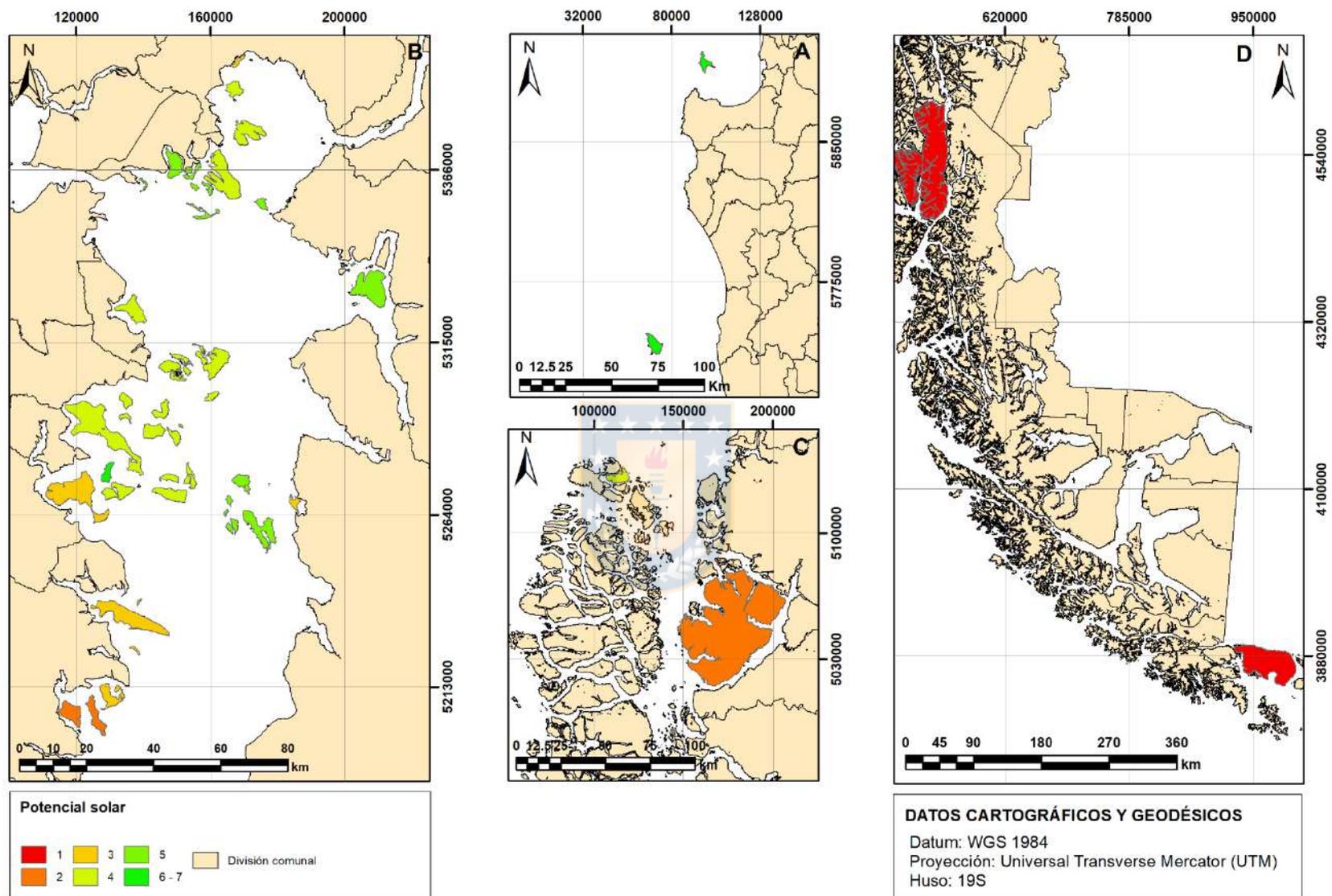


Figura 14. Potencial renovable solar en base a metodología de Právělie et al., (2019).

#### 4.4.1 Método Delphi

El método de Delphi es una técnica que permite la recolección de información, de carácter cualitativo, frente a la opinión de una gran cantidad de expertos en la materia. Su uso permite la convergencia de criterios que, de otra forma, podrían llegar a ser muy dispares. El objetivo principal es facilitar la toma de decisiones en alguna materia determinada, que recoja opiniones convergentes y representativas de un grupo mayor de individuos (Reguant-Álvarez & Torrado-Fonseca, 2016).

Para efectos de este trabajo, se recurrirá a la metodología de encuesta Delphi para lograr una definición de los pesos relativos de las componentes del IEAI. Para ello, se generará una encuesta por etapas con el apoyo de un grupo de expertos en materia energética, de distintas disciplinas relacionadas.

El proceso de consulta se divide en 4 etapas, tal como se señala en la Figura 15.



Figura 15. Etapas del proceso de consulta, metodología Delphi. Fuente: Reguant-Álvarez & Torrado-Fonseca, (2016).

**Fase 1:** en la primera fase se define el objetivo de la consulta, las dimensiones o variables a explorar y, eventualmente, las fuentes de información que deberán ser consultadas. En nuestro caso, es importante describir las dimensiones que serán abordadas en la generación del Índice de Aislamiento Energético Insular.

**Fase 2:** se identifica al grupo de expertos en la materia que evaluará los antecedentes presentados. Esta selección puede ser determinante en la obtención de resultados convergentes. Evidentemente, como esta metodología es profundamente cualitativa, no existe un número preciso de expertos a consultar, ni tampoco una regla para definir sus áreas de conocimiento. Sin embargo, se recomienda escogerlos tomando en cuenta distintas áreas del conocimiento, que estén estrechamente relacionadas con la problemática abordada, o con las variables que determine el estudio. En el caso de este estudio se considerarán expertos principalmente del ámbito académico, pero a la vez, de distintas áreas disciplinares.

**Fase 3:** El proceso de consulta debe considerar el número necesario de iteraciones que permita la convergencia de opiniones. Se recomienda que cada iteración considere un proceso de retroalimentación para los participantes, de manera que puedan considerar los resultados previos en las siguientes rondas.

**Fase 4:** En la etapa final se evalúan los resultados alcanzados y se ponen a disposición de los expertos participantes. Se da lugar, además, a la posibilidad de discutir sobre las valoraciones específicas que se hayan alcanzado en alguna materia en particular.

El proceso incluirá al menos dos rondas de consulta, al final de las cuales se les informará de los resultados parciales que se vayan alcanzando, de manera de favorecer el consenso de criterios. En la sección 8.1 de este trabajo se adjuntan las preguntas a efectuar en cada ronda, y los resultados de la misma se incluirán en el Anexo “Cuestionario Delphi” en carpeta adjunta.

#### 4.4.2 Análisis de robustez

El método escogido para la construcción del índice de aislamiento tomará como base la metodología presentada en “Handbook on Constructing Composite Indicator” elaborado por la Organización para Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE, 2008), junto con “Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible”, elaborado por Schuschny y Soto, (2009), para la CEPAL. A partir de estas dos guías es posible resumir 7 pasos esenciales en la construcción del indicador compuesto:

1. Marco teórico: En esta etapa se provee de los elementos base para la selección y posterior combinación de variables en la construcción del indicador compuesto.
2. Selección de datos: Los datos seleccionados deben asegurar solidez analítica, ser cuantificables, representativos y relevantes al fenómeno que se esté estudiando.
3. Imputación de datos faltantes: Incluir técnicas para rellenar gaps de información, en caso de ser necesario.
4. Análisis multivariado: Para estudiar la estructura completa de la base de datos, su idoneidad y la interrelación de las variables.
5. Normalización: De manera de hacer todos los datos comparables entre sí.
6. Ponderación y agregación: Definición del peso que cada variable tendrá en el indicador y así construir los valores de este.
7. Análisis de sensibilidad e incerteza: Se evalúa si pequeñas variaciones en los datos y variables se traducen a su vez en pequeñas modificaciones del indicador compuesto.

En este capítulo se presentará principalmente lo relativo al punto 7, respecto a la metodología de evaluación de la robustez de un indicador compuesto. El detalle y resultados de esta metodología, aplicada a los datos de islas de Chile, se discute en detalle en los resultados de la sección 5.3.

El objetivo del análisis de incerteza y sensibilidad es cuantificar el grado de dependencia del indicador compuesto, respecto de las variables que lo integran. Cada uno de los factores de incerteza puede ser definido de diversas maneras. Por ejemplo, para la imputación de datos faltantes es posible utilizar tanto modelación implícita como explícita. En la primera, los “gaps” de información son rellenados a partir de unidades que compartan características similares, mientras que en el segundo caso se utilizan estadísticos como la mediana, la moda, u otros más sofisticados como regresiones lineales.

En la evaluación del IAEI se considerarán 3 factores de incerteza:

1. Normalización.
2. Selección de indicadores.
3. Ponderación según expertos.

#### 4.4.2.1 Método de normalización

La normalización de los datos es un paso necesario, previo a la agregación de variables en el indicador compuesto. Esto se produce porque las unidades de medida a menudo no son comparables entre sí. Por ejemplo, tal como se definió al inicio de la sección 4.4, algunas de las variables tomarán valores discretos, como el acceso a GLP (valores entre [0,1]) o las clases de viento y radiación solar (valores entre [1,7]), pero también continuos, como el índice de aislamiento territorial (valores entre [-2,1]). Incluso algunos indicadores presentan unidades de longitud, como la distancia a la subestación eléctrica, o la cantidad de combustible importado para generación eléctrica. Por ello, es necesario realizar un proceso de normalización de datos para evitar la aparición de fenómenos dependientes de la escala (Talukder et al., 2017). Una serie de métodos de normalización puede ser revisado en Freudenberg, (2003) y Jacobs et al., (2004). A continuación, se señalan algunos de los más utilizados.

#### Ranking

Una forma sencilla de normalizar los valores de los indicadores es utilizar un ranking sobre sus valores independientes. Mediante esta técnica se evitaría, por ejemplo, el efecto de valores escapados. El ranking se define de la siguiente manera:

$$I_{qi} = Rank(x_{qc})$$

con  $I_{qi}$  el valor del indicador compuesto, para la isla  $i$  el indicador  $q$ . Una metodología similar sería utilizar percentiles para ordenar los datos.

#### Estandarización (o z-score)

Para cada variable es posible calcular la media y desviación estándar, medidas sobre la población de unidades en análisis (islas). De esta manera, para cada indicador  $x_{qi}$  (con  $x_{qi}$  como el valor del indicador  $q$ , para la isla  $i$ ), se calcula el promedio  $x_{qi=\bar{i}}$  de las islas y su desviación estándar  $\sigma_{qi=\bar{i}}$ . La fórmula de normalización puede escribirse como:

$$I_{qi} = \frac{x_{qi} - x_{qc=\bar{i}}}{\sigma_{qc=\bar{i}}}$$

así,  $I_{qi}$  tendrá valores similarmente dispersos para todas las islas.

#### Rescalamiento (o min-max)

Para esta normalización se considera el rango máximo de valores que la variable puede adquirir. La idea es llevar los valores de cada variable al rango acotado [0,1]. Para llevar a cabo esta transformación se debe aplicar la siguiente expresión:

$$I_{qi} = \frac{x_{qi} - \min_i(x_{qi})}{\max_i(x_q) - \min_i(x_q)}$$

donde  $\min_i(x_q)$  y  $\max_i(x_q)$  son los valores mínimos y máximos que puede alcanzar cada indicador  $q$ .

#### 4.4.2.2 Método de agregación

Al igual que en el caso de la normalización de datos, existen diferentes esquemas de agregación de variables. Algunas de las más destacables son:

##### Suma de rankings

En este caso se toma simplemente el resultado de aplicar la normalización por ranking, detallada en la sección anterior, y se aplica la suma a través de los  $q$  indicadores de cada isla. La suma de rankings puede quedar expresada:

$$CI_i = \sum_{i=1}^q Rank(I_{qi})$$

##### Suma ponderada

Mediante este método, el indicador compuesto se calcula mediante la agregación lineal de la suma ponderada de los valores normalizados obtenidos, de la siguiente manera:

$$CI_i = \sum_q^Q w_q I_{qi}$$

$CI_i$  es el indicador compuesto IAEI para cada isla, y  $0 < w_q < 1$ .

#### 4.4.2.3 Análisis de incerteza

Llamaremos a cada factor de variabilidad  $X_k$ , con  $k = 1, 2, 3$ , ya que se evaluará el efecto del esquema de ponderación escogido, el método de normalización y la inclusión/exclusión de una variable del indicador a la vez. Entonces, para cada factor de variabilidad se considerará una variable aleatoria discreta, de manera de realizar la prueba de alternativas posibles, a través de un experimento del tipo Monte Carlo. De esta manera,  $X_1 = normalisation$  podrá variar entre el método de estandarización o reescalamiento;  $X_2 = weighting\ scheme$  variará dependiendo de las ponderaciones que los distintos expertos hayan definido, y  $X_3 = inclusion/exclusion$  quitará una de las 8 variables del índice a la vez, mientras que las ponderaciones se redistribuyen de manera proporcional.

A su vez, sea  $\zeta \in [0,1]$  un número aleatorio que determinará qué opción, para cada factor, será considerada en la iteración. Si  $m$  son las respectivas opciones para cada factor, la probabilidad de que una opción sea escogida queda determinada por:

$\zeta$	$X_k$
Si $\zeta \in [0, \frac{1}{m})$	$X_k = \text{Opción 1}$
Si $\zeta \in [\frac{1}{m}, \frac{2}{m})$	$X_k = \text{Opción 2}$
...	...
Si $\zeta \in [\frac{m-1}{m}, 1)$	$X_k = \text{Opción } m$

La variable de salida a considerar en el análisis de incerteza y sensibilidad será el ranking  $Y = Rank(CI_i)$ , de la isla  $i$ , para los valores ordenados del indicador compuesto  $CI_i$ .

Dado que sólo se evaluarán 3 factores de variabilidad, cada iteración de Monte Carlo debe considerar 3 números al azar (a partir de una función de probabilidad uniforme, en este caso).

Para la ejecución de este experimento Monte Carlo se llevarán a cabo 10.000 iteraciones y en cada caso se obtendrá el resultado final  $Y = Rank(CI_i)$ . Los resultados se evaluarán de manera conjunta para ver el grado de incerteza del ranking de islas, en base a los factores de variabilidad escogidos.

#### 4.4.2.4 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se basará en el uso de la varianza, tanto de cada factor de variabilidad por separado, como a partir de las interacciones que entre estos pueda existir. De esta manera, la varianza asociada a la sensibilidad del modelo (valor de salida  $Y = Rank(CI_i)$ ) frente a los distintos valores que puede tomar un factor  $X_k$  queda determinada como:

$$V_k = V_{X_k}(E_{X_{-k}}(Y|X_k))$$

Esta ecuación indica que el factor  $X_k$  se mantendrá fijo, y tomará un valor específico  $x_k^*$ . Posteriormente se calcula la esperanza (media) de la variable de salida  $Y$  sobre todos los demás factores (exceptuando el factor que toma un valor fijo  $x_k^*$ ). En este caso, si se calcula el valor de  $V_k$ , y este es 0, significa que el factor  $X_k$  no contribuye a afectar el valor de  $Y$ . Lo anterior puede extenderse a todos los factores, en todas las combinaciones posibles. Finalmente, es posible calcular un indicador de sensibilidad de la siguiente manera:

$$S_k = \frac{V_{X_k}(E_{X_{-k}}(Y|X_k))}{V(Y)} = \frac{V_k}{V(Y)}$$

Detalles del cálculo pueden obtenerse a partir de OECD, (2008). Cabe señalar que la expresión  $S_k$  permite obtener solamente la sensibilidad de "primer orden". Esto es, suponiendo que no existe interacción entre los factores y que, si sumamos la contribución a la varianza total de cada uno de los factores, el resultado sería 1. Como en general esto no ocurre, se debe utilizar algún tipo de aproximación. En este trabajo se utiliza la aproximación de Saltelli, (2002), descrita en OECD, (2008). Finalmente, la expresión que involucra tanto la

varianza de primer orden, como de órdenes superiores producto de los efectos de la interacción entre los valores que toman los factores de variabilidad se determina por:

$$S_{Tk} = \frac{V(Y) - V_{X-k}(E_{Xk}(Y|X_{-k}))}{V(Y)} = \frac{E_{X-k}(V_{Xk}(Y|X_{-k}))}{V(Y)}$$

#### 4.4.2.5 Parametrización de referencia

Como fue mencionado, para el desarrollo del IAEI nos enfocaremos en 3 fuentes de incerteza: el método de ponderación, el método de normalización y la inclusión/exclusión de un indicador a la vez. Sin embargo, el análisis de incerteza requiere de un valor de referencia sobre el cual ser comparado. Para este caso, los valores de referencia para los factores de incerteza serán:

- Para el caso del método de ponderación se utilizará el promedio de las ponderaciones que los expertos, a través de la metodología de consulta Delphi, hayan determinado.
- El método de normalización corresponderá al re-escalamiento.
- Se evaluará el IAEI quitando un indicador a la vez y redistribuyendo la ponderación según sea el caso.

Cabe señalar que, en el caso del re-escalamiento, se utilizaron dos islas ficticias como referencia. Cada una con condiciones extremas y valores mínimos y máximos en sus respectivos indicadores, de manera que sirvan como islas de referencia. Hacer esto evitará que los máximos sean relativos a la isla con menor aislamiento energético de la muestra de 58 consideradas en este estudio. Estas islas sólo intervienen en el cálculo de la normalización de los datos y no son consideradas dentro del análisis de incerteza o sensibilidad.

# 5 Resultados

Publicación aceptada en *Island Studies Journal*. <https://doi.org/10.24043/isj.167>

## 5.1 Optimisation of hybrid renewable energy systems on islands: A review

*Island Studies Journal, Ahead of print*

### Optimisation of hybrid renewable energy systems on islands: A review

James Morales Lassalle

Faculty of Engineering, Universidad de Concepción, Concepción, Chile  
[jmoralesl@udec.cl](mailto:jmoralesl@udec.cl) (corresponding author)

Dante Figueroa Martínez

Department of Geophysics, Universidad de Concepción, Concepción, Chile  
[dantefigueroa@udec.cl](mailto:dantefigueroa@udec.cl)

Luis Vergara Fernández

Faculty of Engineering, Universidad de Concepción, Concepción, Chile  
[lvergaraf@udec.cl](mailto:lvergaraf@udec.cl)

**Abstract:** Access to energy services is recognised as a fundamental aspect of economic and social development. This is particularly important for isolated areas, where electrical supply is not guaranteed. Because of their inherent geographic characteristics, islands are prominent cases of isolated areas that must import and burn fossil fuels, with environmental and economic consequences. In this context, Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) emerge as an alternative to traditional generation to reduce energy costs and environmental issues. This study aims to demonstrate the feasibility of implementing HRES on islands, based on energy optimisation. We present an extensive review of HRES optimisations across 73 island cases, collecting information about energy demand, energy system sizes, and optimisation methodologies. The most commonly proposed HRES components are identified, and a significant power relationship is found between population and annual energy demand on islands. Further, we identify islands with higher-than-expected and lower-than-expected consumption and the underlying causes. The main limitations of the reviewed studies are discussed, particularly with regards to availability and quality of hourly demand data and/or meteorological data required for renewable energy assessments. Several approaches to fill these gaps in information are reviewed here, concluding with a discussion of emergent methods and technologies.

**Keywords:** energy optimisation, hybrid renewable energy systems, islands, renewable energy, review

<https://doi.org/10.24043/isj.167> • Received October 2020, accepted June 2021

© *Island Studies Journal*, 2021

## **1. Introduction**

Access to and quality of electrical supply is a fundamental goal for all nations in order to guarantee sustainable development. This is internationally recognised in policies and recommendations like the seventh of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), “Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all”, approved by 193 world leaders in 2015 (United Nations, 2015). In this context, it is necessary not only to guarantee access to energy, but also to implement sustainable ways to obtain it, which involves an increase in the share of renewable energies, improvement in energy efficiency, and international cooperation in related research and technology.

Even though global access to electricity increased from 73% to 89% between 2000 and 2018, some regions, such as sub-Saharan Africa (45% access to electricity) and some regions in Asia, persist in having a lack of access to energy. Globally, close to 0.9 billion people have no access to electricity — mainly in rural or isolated areas (International Energy Agency, 2019). At the same time, energy access is a critical issue for economic and social development of isolated areas. Y. Liu et al. (2018, p. 460) define an “isolated area” as a region that meets some of the following characteristics: large distances to population centres, limited access to utility grids, high dependence on imported energy, and inconvenient transportation. In this context, islands are prominent examples of isolated areas.

According to Kuang et al. (2016), more than 740 million people live on islands, and most of their power systems depend heavily on imported fuels for generation — with economic and environmental consequences (Ioannidis & Chalvatzis, 2017; Krajačić et al., 2008). In the same sense, it is recognised that economic and social development on islands is closely related to availability of energy sources, supply of fresh water, management of waste, and transportation (Aguirre-Mendoza et al., 2019), all of which are energy-related.

An alternative that has attracted attention in recent decades is hybrid renewable energy systems (HRES), which allow greater flexibility, higher reliability and efficiency, and lower energy costs compared with traditional pure diesel generation (Mohammed et al., 2016). Additionally, HRES reduce transportation risks and system instabilities, encouraging the sustainability of the island energy system.

This study aims to evaluate the feasibility of HRES implementation on islands around the world, analysing a wide range of cases in terms of both energy demand and population. Likewise, it is important to identify which aspects of HRES optimisation are most critical, taking into account environmental and geographical conditions of islands. For this purpose, an exhaustive review of hybrid energy systems on islands was carried out, examining 73 island cases and delving into optimisation processes, optimisation methodologies, objectives, most commonly proposed HRES components, and main barriers to researchers.

## **2. Hybrid renewable energy systems**

Due to their availability and technological maturity, diesel engine generators have been the most common method of providing electricity to isolated communities in recent decades (Kennedy et al., 2017). However, significant impacts on the environment related to the use of fossil fuels are a cause for concern (Mahesh & Sandhu, 2015). At a local level, there are potential environmental risks related to the transport of diesel by ships, polluting emissions,

and often high costs of the energy (Kuang et al., 2016). These features are particularly significant on islands around the world, given their dependence on imported fossil fuels as an exclusive energy source (Gils & Simon, 2017; Segurado et al., 2011). At the same time, on a global scale, the extensive use of fossil fuels for electricity generation has transformed the energy sector into the main contributor of greenhouse gases (International Energy Agency, 2018). Furthermore, islands are very sensitive and vulnerable to the potential negative impacts of worldwide issues, such as global warming (Blechinger et al., 2016; Mendoza-Vizcaino et al., 2016).

To diminish the risks related to conventional electricity generation (diesel), reduce the cost of energy, and provide greater reliability to the energy system, some islands are grid-connected to the mainland — but, in most cases, this is not economically feasible due the cost of undersea cables (Aguirre-Mendoza et al., 2019; H. Liu & Qu, 2014). Many studies therefore recommend local harnessing of renewable energies to decrease the emission of pollutants and greenhouse gases and make advances in energy independence and energy cost reductions (Blechinger et al., 2016; Kaldellis et al., 2012; Orhan et al., 2014).

Several authors have recognised renewable energy systems (RES) as a logical alternative for islands because they usually have significant renewable energy potentials (Dorotić et al., 2019; Enevoldsen & Sovacool, 2016; Katsaprakakis, 2016; H. Liu & Qu, 2014; Meza et al., 2019; Segurado et al., 2011). Nevertheless, RES are not always capable of fulfilling the energy demand, and it becomes necessary to complement them with conventional backup units (Siddaiah & Saini, 2016) or with storage units that help to minimise the unmet load by absorbing any energy surplus of the renewable units (El-Bidairi et al., 2018; Katsaprakakis, 2016; Papaefthymiou et al., 2015). Generation systems that have more than one source, including at least one renewable source, are called hybrid systems. Manwell (2004, p. 215) defined hybrid energy systems as the combination “of two or more energy conversion devices [...] that when integrated, overcome limitations that may be inherent in either.” To use two or more suitable energy sources (with at least one being a renewable source) could improve the efficiency and reliability, thus overcoming economic limitations arising from a single energy source (Siddaiah & Saini, 2016; Thomas et al., 2016). The technical and environmental performances of HRES, as well as lower costs, have been demonstrated in many studies (Drouineau et al., 2015; Lin et al., 2016; Ma et al., 2014; Thomas et al., 2016).

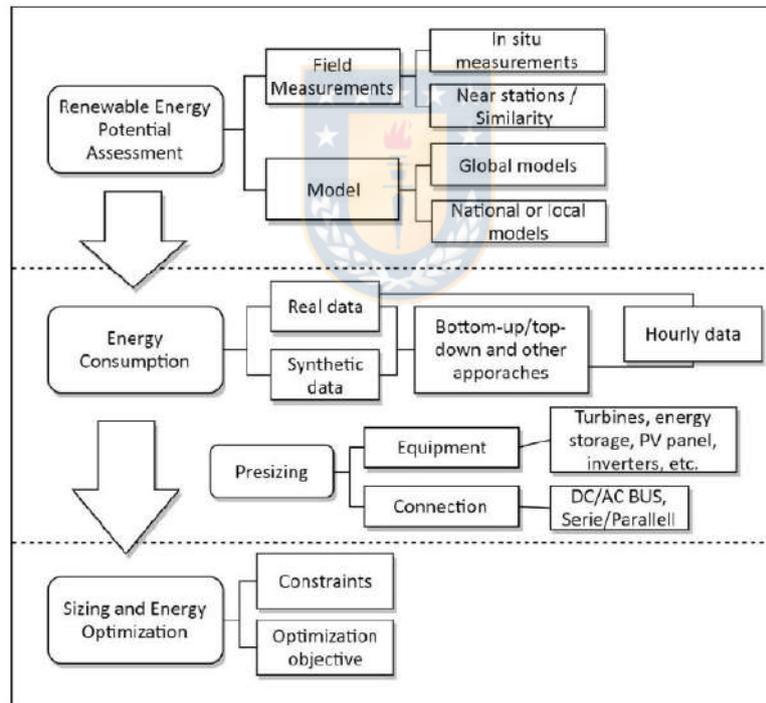
### **3. Review of HRES on islands**

For this study, any paper addressing HRES optimisation on islands published by an indexed journal was initially considered. However, some studies were then excluded due to their lack of detailed information regarding the optimisation process they used. Only cases with sufficient information were included in the final list. A complete list of the 73 islands is presented in Appendix A.

#### **3.1. HRES optimisation**

In an overview of the reviewed case studies, three well-defined stages of HRES optimisation can be described (see Figure 1):

- *Renewable energy potential assessment:* Depending on the specific features of the island, wind, solar, hydroelectric, and other renewable resources should be assessed to evaluate the overall energy potential. Several decisions must be made at this stage, such as which form of energy should be prioritised for harnessing. This decision can consider economic and/or technological criteria, e.g., technology maturity, reliability, and costs (Brito et al., 2014).
- *Energy consumption assessment:* Energy demands of islands can be very different compared with the demands on the mainland. Therefore, simply assuming a direct correlation with population is not necessarily a good strategy for assessing island demand (Brito et al., 2014). This applies not only for the magnitude of the demand but also for its daily variability (produced by different economic activities, e.g., tourism, fishery, services, manufacturing, farming); social issues (e.g., low household incomes); and external subsidies. This information is often not available for islands, and researchers must therefore use different approaches and estimations.
- *Sizing and energy optimisation:* At this stage, the number and capacity of the HRES elements are evaluated to minimise/maximise the objective functions (i.e., unmet energy, net present cost, cost of energy, etc.) and ensure all constraints are satisfied (Bahramara et al., 2016).



**Figure 1.** Three stages in HRES optimisation: renewable energy assessment, energy consumption assessment, and sizing and energy optimisation. *Source:* Authors' own elaboration based on the reviewed cases.

**3.2. Geographic and demographic aspects**

Most of the studied islands lie in the northern hemisphere, mainly in Europe and Asia. Specifically, 30 cases are in Europe, 29 in Asia, 9 in the Americas, 3 in Oceania, 1 in Africa, and 1 in Europe/Asia. The country with the most analysed cases is, by far, Greece, with 13 islands in ten different research works, followed by Croatia with four islands from four papers.

The population of each analysed island varies from 20 people (Mykines, Faroe Islands) to 8.6 million (Hainan Island, China), allowing examination of a wide range of cases. A detailed list of the populations of the studied islands is presented in Appendix A.

As mentioned earlier, the economic activity of an island is crucial for both its level of energy demand and its load pattern. In many of the islands studied (32 cases), tourism is the main economic sector. In six cases, tourism was identified as one of the main economic activities, together with agriculture, fishing, and livestock and dairy products. This aspect is very relevant considering its effect on seasonal demand (Kougias et al., 2019), which leads to more intensive energy consumption during some months of the year due the swelling population of the island. In the span of one year, tourists can easily outnumber the permanent population of an island. The population of St Martin’s Island (Bangladesh), for example, is about 8000 inhabitants, but it is visited by more than 30,000 people throughout the year (Mazumder et al., 2014).

**3.3. Energy demand**

The system size (annual energy demand) of the analysed cases varies significantly, from Mykines with the lowest consumption (0.157 MWh/year) to Hainan with the highest (12,000 GWh/year, comparable to whole countries such as Ecuador or Bolivia). It is possible to define four sizes (quartiles) associated with the annual energy demand (see Table 1).

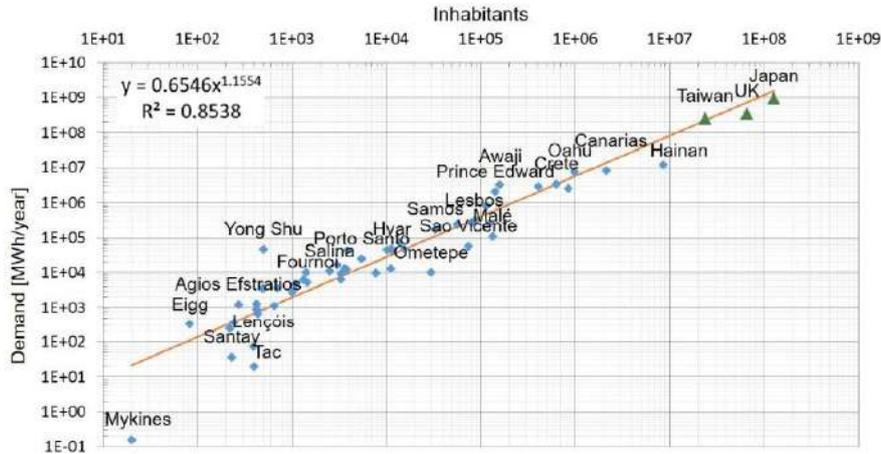
**Table 1.** Energy system size classification.

<b>System classification</b>	<b>Size (MWh/year)</b>
Small size	0 – 650
Medium size	651 – 9950
Large size	9951 – 98,600
Very large size	>98,600

All of the studied cases are presented in Figure 2, where a power relationship between the variables is revealed. It is worth noting the good agreement between the real annual energy demand data and the values predicted by the fitting, with a (logarithmic) slope of approximately 1.16 and an R<sup>2</sup> value of 0.85. This relation is significant, and each of the two variables in logarithmic form follows a normal distribution. The relation holds even when highly developed island countries with large populations (i.e., UK, Taiwan, Japan) are added, even though they were not included in the curve fitting.

It is interesting to analyse how far every island’s energy is from the predicted curve. Islands with values below the curve are associated with lower-than-expected consumption, which in turn is related mainly to primary economic activities or even a subsistence economy. The Mykines island economy, for example, is related mainly to low-impact tourism and sheep farming. Similarly, the economy of Isla Tac (Chile) is based on fishing, and further similarities are observed for Isla Santay (Ecuador), Lençóis (Brazil), Ometepe (Nicaragua), São Vicente

(Portugal), and Malé (Maldives). Even on Hainan Island, with a substantially larger population, the economic activity mainly involved agriculture, with incipient industrial activity at the time of the study (Ye et al., 2012). In contrast, values over the curve are related to secondary and tertiary economic activities, particularly manufacturing and tourism, for example in Awaji (Japan), Karpathos-Kasos (Greece), or Yong Shu Island, in the South China Sea.



**Figure 2.** Demand and population of the analysed islands (blue dots); axes are logarithmically scaled. An exponential adjustment between both variables is also shown. *Note:* UK, Taiwan, and Japan (green triangles) added for comparison and are not included in curve fitting.

### 3.4. Energy load profiles

Perhaps the most fundamental information for performing an energy optimisation is the demand data. Although this information, at least in terms of annual or monthly averages, is usually accessible for big cities, it may not be available for islands. Very frequently, researchers rely on just general information about the demand and must resort to models or other approaches to obtain hourly data.

In the case of our study, just 17 of the 73 analysed islands had measured data; in some cases, only monthly (or even annual) average consumption data were available. Different approaches can be used to address this problem, such as estimations based on average consumption for typical homes, use of software containing a database of consumption patterns, or just scaling the required demand data from a known consumption in a similar location. In general, these techniques can be grouped in top-down or bottom-up approaches. These will now be discussed.

#### Top-down methods

Senjyu et al. (2007) propose an optimal hybrid configuration for Miyako, Kume, and Tokashiki islands, in the prefecture of Okinawa, Japan. To obtain power demand information, they multiplied the peak power demand with the power demand ratio for mainland Okinawa. For this case, the power demand ratio for the mainland was 1/25, 1/100,

and 1/324 for Miyako, Kume, and Tokashiki, respectively. Similarly, Sakaguchi and Tabata (2015) estimated the energy demand for Awaji Island by using energy consumption statistics from the Hyogo Prefecture.

On the other hand, Park and Kwon (2016) used synthesised hourly demand data generated with Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER) software, which is based on scaled annual demand and peak energy data. This information was collected from the Korea Electric Power Corporation for Gadeokdo Island (South Korea). A similar method was used by Demiroren and Yilmaz (2010) for Gökceada, Turkey.

Finally, Shin et al. (2015) used a combination of top-down and bottom-up techniques to obtain the hourly data for Deokjeok Island in South Korea. The authors did not rely on demand data, apart from the annual demands of 2012 and 2013. However, they had monthly consumption for Ongjin District, separated by categories. They assumed the same electric patterns for both locations and scaled down to the annual data of Deokjeok (Shin et al., 2015). To derive hourly data, they used EnergyPlus software, which enables acquisition of hourly consumption data based on building models under specific weather conditions and facility operation schedules.

In general, it should be taken into account that top-down approaches usually assume a typical load profile of continental cities, which will not necessarily represent a load profile of an island. They do, however, allow a better approximation of annual demands than bottom-up approximations, discussed next.

#### *Bottom-up methods*

A bottom-up approach was used in several forms in the examined cases. In Isla Grande (Colombia; Aguirre-Mendoza et al., 2019), the energy demand was estimated considering a set of electrical appliances and the average consumption for a typical native house in the Caribbean region. A similar method was applied in Saint Martin's (Mazumder et al., 2014), where the authors classified families into three groups depending on their income: very solvent, solvent, and poor. For each case, specific appliances were assumed with a determined consumption pattern. Other assumptions included daily random variability and time-step variability (Mazumder et al., 2014).

Ye et al. (2017) presented a case study for Yong Shu Island, a strategic port in the South China Sea. To evaluate the future demand, the authors relied on the standards of building electricity demand in China and the planned construction floor area. For instance, 200,000 m<sup>2</sup> of the port area was considered and, as the standard consumption for this kind of area is 150 kWh/m<sup>2</sup>/year, the total electricity demand was calculated as 30,000 MWh per year. Chua et al. (2014) proposed a sustainable energy system for Pulau Ubin, Singapore. To achieve this, they assumed hypothetical facilities, including hotels, resorts, restaurants, and residential homes, and simulated hourly energy use for these specific buildings.

Bottom-up approximations tend to be more precise than top-down methods in representing daily consumption variability, to the extent that consumption loads are well characterised (e.g., residential, commercial, industrial). However, by assuming the same load profile within a category, the possible inefficiencies of any particular load are overlooked, affecting the characterisation of the represented category.

### 3.4. Renewable energy resource assessment

Islands usually have considerable renewable energy potential (Dorotić et al., 2019; Enevoldsen & Sovacool, 2016; Katsaprakakis, 2016; Meza et al., 2019). However, for correctly sizing an HRES, a good assessment of the available resources is fundamental. Aspects that are inherent to renewable energies, such as intermittence, strong seasonality, and low-energy periods, can adversely affect electricity generation. Unfortunately, as is the case for demand data, renewable energy resource data are often incomplete or not available. This is especially important for islands with no previous energy system implemented. Researchers have employed several approximations when real data are not available, such as by using global models (Aguirre-Mendoza et al., 2019; Ahadi et al., 2016; Basir Khan et al., 2015; Enevoldsen & Sovacool, 2016; Lata-García et al., 2017; Mazumder et al., 2014; Orhan et al., 2014; Park & Kwon, 2016; Ye et al., 2017), historical data (Aguirre-Mendoza et al., 2019; Andaloro et al., 2012; van Alphen et al., 2007), or comparison with a place with similar weather conditions (Basir Khan et al., 2015; Senjyu et al., 2007).

It should be noted that most of the hybrid systems studied in this paper consider just wind and/or solar energy, likely given their technological maturity and the wide availability of these resources. As mentioned previously, however, meteorological data are not always available. For instance, when real solar radiation data are not available, researchers typically use global models like NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER; <https://power.larc.nasa.gov>) or algorithms such as the Graham–Hollands algorithm (Graham & Hollands, 1990), a stochastic method for generating synthetic hourly irradiation values. This algorithm is used, for example, in the energy optimisation software HOMER. In contrast, wind data are, in general, measured on-site. When local wind data are not available, authors usually use data from other periods, assuming that the medium- and long-term variability does not significantly affect the estimation of the wind potential. In a few cases, data from nearby places are used. For example, in the study carried out by Basir Khan et al. (2015) for Tioman Island (Malaysia), the meteorological station they used was not on Tioman but in Mersing, a coastal town 32 km away from the island.

Global models allow a quick but not necessarily accurate estimation of the renewable energy resources; these can be a good initial step if measured data are not available. The performance of global models for solar radiation, however, is usually quite acceptable, which is evidenced by the extensive use of tools such as HOMER or NASA POWER.

Table 2 summarises the sources of wind and solar data of the analysed studies, divided into three categories: instrumental, modelled, and synthesised using software or an algorithm. It can be observed that, in most cases, the winds are actually measured, whereas the solar irradiation data can come from any source.

**Table 2.** Sources of wind and solar data used in the analysed studies.

	<b>Instrumental</b>	<b>Model</b>	<b>Software/Algorithm</b>
Wind	41	11	2
Solar	16	16	15

### **3.5. Optimisation objectives**

The optimisation objective, or the objective function that the methodology will either maximise or minimise, can imply significant differences in the sizing of the final system. Depending on the objective, aspects such as restrictions on the RES penetration, generation technology, energy sources, or energy storage systems could be favoured at the expense of, for example, higher cost of energy (COE). In contrast, if the objective function is one that minimises such aspects as net present cost (NPC), internal rate of return (IRR), or another economical objective, the energy mix could not reach the maximum RES penetration or some environmental indicators (greenhouse gases, pollutant emissions, etc.). From the analysed studies, the four suitable categories of optimisation objectives are the economic, environmental, technical, and multi-objective approach. Each of these will now be discussed.

#### *Economic objectives*

One of the main criteria that an isolated system must meet is that the total investment becomes economically viable, i.e., the cost of the energy is able to keep the system working. In this context, 44.4% (32) of the studied cases present an optimisation regarding economic objectives, such as NPC, COE, IRR, payback period, cost of operation, life cycle cost, and/or others of a similar nature. This is the most common optimisation criterion for islands.

#### *Environmental objectives*

Environmental optimisation objectives involve aspects such as minimising CO<sub>2</sub> emissions, maximising RES penetration, and/or evaluating the possibility of 100% RES. In fact, most of the studies in this category evaluate different levels of RES penetration, with the goal of reaching 100%. Indeed, this is an ambitious objective, usually related to national or global goals. Of the analysed islands, 26% considered environmental criteria for optimisation. In the case of Mykines (Enevoldsen & Sovacool, 2016), for instance, the authors conclude that it is technically possible to combine wind turbines, electrolyzers, and fuel cells to reach 100% RES. They recognise that, in this case, diesel-based systems produce energy at a cheaper levelized cost, but that it is necessary to “slightly compromise reliability and maturity of technology” (Enevoldsen & Sovacool, 2016, p. 647) to achieve a self-sufficient system and a 100% RES, considering its “immense benefits to the environment” (Enevoldsen & Sovacool, 2016, p. 647).

It can be observed that, generally, any alternative that involves a high RES penetration will imply, in turn, yielding in another aspect (e.g., economical). In this sense, some studies justify a 100% RES based on positive externalities, for example for encouraging tourism or the willingness of consumers to pay for tourism services. This argument is present in H.-Y. Liu and Wu’s (2010) case study of Kinmen (Taiwan), where it is recognised that the island will experience a significant increase in population in coming years, with a consequent increase in electricity consumption, in addition to large-scale environmental pollution. They conclude that a 100% RES would provide new jobs, tourism, and investment opportunities (H.-Y. Liu & Wu, 2010).

It is noted that environmental optimisation objectives are focused mainly to reducing CO<sub>2</sub> emissions and maximising RES penetration level. Other approaches, such as life cycle analysis over the HRES components or social implications of the renewable energy infrastructure, are generally not addressed.

#### *Technical objectives*

Technical optimisation objectives aim to evaluate the performance of HRES in different operation conditions, not necessarily restricted to economical or environmental criteria. Only two cases with these characteristics were identified. Corsini et al. (2009) assessed the performance of two renewable energy buffering strategies to balance seasonally varying electricity demand (through a hydrogen-based system) or to satisfy the water requirement (through a desalinated water production system) for Ventotene Island (Italy) by converting the available renewable energy surplus. In Fournoi (Greece; Bertsiou et al., 2018), the authors propose taking advantage of the natural topography of the island by using a pumped storage system (PSS) and, consequently, hydroelectric power. The objective is to evaluate the feasibility of covering part of the electrical requirements and, through a desalination plant, satisfying the water requirements of the island.

#### *Multi-objective approaches*

If two or more optimisation objectives are simultaneously taken into account, the problem may arise that they could be inherently opposed to each other. For example, minimising CO<sub>2</sub> emissions possibly involves higher NPC, and minimising levelized cost of energy (LCOE) is contrary to maximising RES penetration. Multiobjective optimisation was applied in 12% (9) of the studied cases.

Mourmouris and Potolias (2013) present an evaluation framework to support energy planning based on RES for Thassos, Greece. The optimal energy mix is evaluated with a multi-criteria decision analysis tool. There are four evaluation criteria in their study: economical, environmental, social, and technical/technological (Mourmouris & Potolias, 2013). Papaefthymiou and Papathanassiou (2014) investigate the optimum sizing for a PSS for HRES on Lesbos Island. Their analysis considers two perspectives: that of an investor and that of the system. In the first case, the objective is to maximise the return on investment through a single-objective optimisation algorithm (Genetic Algorithm; Papaefthymiou & Papathanassiou, 2014). In the second case, the objective is to maximise RES penetration through a multi-objective evolutionary algorithm (MOEA). Here, the problem is to determine the optimum size of the system that maximizes RES penetration while simultaneously minimising the increase in the overall generation cost.

### **3.6. Optimisation methodologies**

Numerous energy optimisation tools and frameworks have been developed and widely discussed in reviews (Y. Liu et al., 2018; Sinha & Chandel, 2014). Their use in HRES optimisation allows researchers to describe, model, and analyse the operation and performance of the system, which is particularly important given the unique characteristics of islands. HOMER software is, by far, the most used optimisation and sizing energy tool of the studied cases. This application, thoroughly reviewed in Bahramara et al. (2016), was designed for small, isolated energy systems, making it particularly suitable for HRES on islands. HOMER was applied in 22 cases, eight of which were in combination with another optimisation tool. Techno-economical models were applied in 10 cases.

### **3.7. Energy mix**

#### *Generation*

Of the total number of studied cases, 93.2% (68 cases) consider wind energy as one, but not the only, alternative, followed by 83.6% (61 cases) considering solar energy (either photovoltaic energy or concentrated solar power).

Diesel generation still has an important role in the HRES, having been considered in 54.8% (40) of the cases. This last result confirms that diesel generation is a reliable alternative as backup.

It should be mentioned that in 13 cases, the harnessing of hydroelectric energy was proposed, as it is usually available on islands in the form of pumped storage, making use of the renewable energy surplus that would otherwise be lost.

In a few cases, just one kind of renewable energy was considered. For example, in Utsira Island (Norway; Ulleberg et al., 2010), the system only considered wind energy in a small demonstration plant (ten households), with a hydrogen storage system. The aim of this study was to evaluate the performance of the system using updated tools for modelling a hydrogen energy system, to eventually achieve a 100% autonomous power system. On Mykines (Enevoldsen & Sovacool, 2016, p. 642), the researchers justified their decision based on the “strong wind energy potential,” as the Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) mesoscale model indicated an average wind speed of 9.31 m/s at 10 m height. The extremely small population of the island — just 20 inhabitants at the time of the study — could justify that only one renewable source is needed to supply the complete demand.

As the HRES mix is of course related to the available resources on each island, some sources will take priority over others. Despite the geographic and meteorological differences between islands, the current study found that certain energy mixes are typically proposed. The most typical generation mix was the harnessing of wind and solar energy with diesel generation as backup; this combination was preferred in 29 cases.

#### *Energy storage*

To increase the RES penetration on islands, use the surplus renewable generation, or, in general, improve the performance of the entire system, most studies consider at least one type of storage system. It was found that in 62 cases the authors proposed a storage system and, of the remaining 11 cases, four (Awaji, Hainan, Cozumel, and Mykonos) are grid connected. Electrochemical batteries are considered on 44 cases, pumped storage on 12 cases, and hydrogen storage on 11 cases. In two cases (Yong Shu and Utsira), the possibility of using flywheels was evaluated.

In most cases, the energy storage systems are denoted simply as “batteries”, and the researchers do not specify what kinds of electrochemical batteries were considered. When specified, batteries are reported to be lead-acid, lithium-ion, sodium sulphur, nickel cadmium, and redox flow batteries.

PSS are recognized by several authors as the most mature storage technology for medium and large systems (Bertsiou et al., 2018; Katsaprakakis, 2016; Papaefthymiou & Papathanassiou, 2014). Use of PPS in isolated systems, such as on islands, is generally in combination with a wind generation system to recover the surplus energy. Of the studied cases, 12 suggest using a PSS. Further, the proposal for a specific energy storage system was found to be related to the size of the system (see Table 1). The studied cases present a

preponderance of electrochemical battery storage in small systems, which decreases as the size of the system increases. The opposite happens with PSS storage, which tends to grow in importance as the system size increases. Hydrogen storage systems appear to show no correlation with the size of the system.

Finally, considering generation and storage, the most common hybrid energy mix is wind/solar/diesel with electrochemical battery (34.2% [25 cases]), followed by wind/solar/electrochemical battery in 8.2% (6) cases. The main HRES mixes are presented in Table 3.

**Table 3.** HRES mixes found in the studied cases.

HRES mix	Cases
W+S+D+B	25
W+S+B	6
W+S	3
W+S+D	3
W+S+H	3
W+PSS	3

Note: B:Electrochemical battery; D:Diesel; H:Hydrogen+fuel cells; PSS:Pumped storage system; S:Solar; W:Wind.

#### 4. Discussion and conclusions

Although important advances in electrification have been achieved globally, it must be noted that a large part of the world population — close to 0.9 billion in 2018 — still has no access to electricity. This situation occurs mainly in isolated areas, of which islands stand out, given their geographic characteristics. In this context, HRES optimisation appears to be a reliable alternative to the traditional use of fossil fuels, taking advantage of local renewable resources.

The current review of 73 island cases identifies three well-defined stages in a HRES optimisation: renewable energy assessment, energy consumption assessment, and sizing and energy optimisation. The first two stages require the collection of available information, ideally measured instrumentally.

Our analysis identifies the main limitations of studies dealing with HRES in islands, such as the frequent lack of hourly demand data and/or meteorological data — both of which are essential for renewable energy assessments. One of the most relevant issues is the lack of reliable data for an accurate assessment of the renewable resource(s) of each island, and subsequent adequate sizing of the HRES. Global and local models and in-situ measurements emerge as highly advisable. This is particularly evident in the case of wind data, where high spatial and temporal variability of this resource necessitates prioritization of in-situ measurements. On the other hand, global irradiation models provide a good representation of the solar resource data. Again, we emphasize that wind and solar resources are used in most of the analysed cases.

The convenience of using numerical weather prediction (NWP) models, such as Weather Research Forecasting (WRF) or Mesoscale Atmospheric Simulation System (MASS), is notable, particularly in cases when good quality meteorological data were not available.

Nevertheless, in general, the use of this kind of model was not observed among the studied cases, suggesting that the HRES community is not yet regularly using such numerical tools.

We observed a significant lack of detailed energy demand information, for example hourly data with for periods of at least one year, which are essential for assessing seasonal variability. Several approaches were suggested for deriving these missing data, including the combination of top-down and bottom-up approaches. This method entails taking a top-down approach to consider the annual demand for a geographic unit of reference and scale it to the number and type of load units on the island, then employing a bottom-up approach to characterise demand profiles for each kind of unit until the annual demand assumption is obtained.

We found that the annual energy demand of islands follows their population number in a power law (linear when log-log scaled). As discussed earlier, annual energy values over the best fit curve are related to islands with tertiary economic activities; values under the best fit curve are related to islands with primary economic activities.

The use of energy storage units plays an important role in HRES optimisation, improving the performance of the entire system and resulting in an increase in RES penetration and a reduction of the effects of natural intermittence of renewable resources. The kind of energy storage system preferred is related to the size of the system or, more specifically, to the size of energy demand. Electrochemical batteries are associated with small and medium systems, while pumped storage seems to be suitable for large systems.

At least 20 optimisation models or methodologies were identified, of which HOMER software stands out, used in 30% of the cases. These optimisation tools were applied either to specific stages of the optimisation or to the whole process, which demonstrates that there is no simple way to address the optimisation problem. In any case, and considering the factors emphasising sustainability, the authors of the current study recommend considering a multi-objective analysis approach which at least considers economic and environmental factors. It is important to point out that, while a wide range of cases were reviewed, new technologies, optimisation methodologies, and associated tools continue to emerge. Among them, Demand-Side Management stands out, which involves strategic actions that change consumer behaviours in order to reduce energy operating costs and/or energy consumption. Another important consideration is the significant progress that green hydrogen generation has achieved in recent years; by harnessing surplus energy, this is becoming a great opportunity to improve both the backup systems on HRES as well as the energy management strategies.

This review has demonstrated the feasibility of implementing HRES on islands, taking advantage of their specific geographic and climatic conditions. The proposed and/or implemented HRES reviewed offer an island the possibility of reducing its dependence on imported fossil fuels while also decreasing pollutant emission and favouring sustainable development.

**Appendix A**

Studied islands with detailed characteristics (grouped by country).

Note: B:Battery, BD:Biodiesel, BG:Biogas, BM:Biomass, CSP:Concentrated Solar Power, D:Diesel, F:Flywheel, G:Geothermal, H:Hydrogen, Hy:Hydro, LA:Lead Acid, Li:Lithium-ion, NaS:Sodium Sulfur, NG:Natural Gas, NiCd:Nickel Cadmium, PSS:Pumped Storage, RFB:Redox-flow Battery, S:Solar, Th:Thermal, Ti:Tidal, W:Wind, Wa:Waste, Wv:Wave. N/S:Not Specified.

Island	Pop.	Energy Demand [MWh/year]	Optimisation Methodology	Energy Source	Storage	Reference
Rapa Nui	7,750	9,900	ISOPROFIT	W,D	N/S	Faúndez, 2017
Astypalaia	1,334	6,250	Toy model	W,S,Hy,B, Wv,G	PS	Chalakatevaki et al., 2017
Corvo	425	884	RenewIsland+H2RES	W,Hy	PS	Duić et al., 2008
Malta	409,259	2,885,976	H2RES	W,S	H	Krajačić et al., 2008
Mljet	1,088	4,632.8	H2RES	W,S		
Porto Santo	5,482	24,400	N/S	W,S		
Terceira	56,437	231,004	H2RES	W,G,D		
Crete	632,674	3,383,201	Model	W	PS	Katsaprakakis, 2016
Rhodes	115,490	789,168		W	PS	
Samos	32,977	168,862		W	PS	
Kastelorizo	492	3,510		W,S	B	
Mykines	20	0.157	Techno economic model	W	H	Enevoldsen & Sovacool, 2016
Hvar	11,459	45,933	ENERGYPLAN	W,S	B	Bačelić Medić et al., 2013
Tac	400	19.71	HOMER	W,D	B	Stevens et al., 2001
Lesbos	85,410	300,000	MOEA+GA	W,Hy,D	PS	Papaefthymiou & Papathanassiou, 2014
Isla Grande	720	N/S	N/S	S,D	B	Aguirre-Mendoza et al., 2019
Reunion	837,900	2,545,000	TIMES-REUNION	W,S,Hy,Wa, G,Wv,BM	N/S	Selose et al., 2018
Miyako	55,914	N/S	GA	W,S,D	B	Senjyu et al., 2007
Kume	8,713	N/S				
Tokashiki	697	N/S				
Eigg	83	321.55	HOMER	W,S,Hy,D	B	Chmiel & Bhattacharyya, 2015
Agios Efstratios	270	1,223	HOMER	W,S,D	RFB	Thomas et al., 2016
Malé	133,412	108,000	HOMER/DEFINITE	W,S,D	B	van Alphen et al., 2007
Fehendhoo	245	365				
Uligamu	435	649.7				
Nolhivaranfaru	650	1,095				
Hanimaadhoo	1,009	2,792.25				
Kimmen	123,723	254,452	N/S	W,S	N/S	H.-Y. Liu & Wu, 2010

Near Hong Kong (unidentified)	N/S	N/S	HOMER	W,S	B	Ma et al., 2014
Thassos	13,770	70,400	MCDA+REGIME	W,S,BM	N/S	Mourmouris & Potolias, 2013
Awaji	157,000	3,176,388	Self Sufficiency Ratio	W,S	N/S	Sakaguchi & Tabata, 2015
Santay	230	36.5	HOMER	S,Hy,D	B	Lata-García et al., 2017
St. Martin	8,000	N/S	HOMER	W,S,BG,D	B	Mazumder et al., 2014
Ouessant	846	N/S	Linear Programming	W,S,Ti	B	Mohammed et al., 2016
Christmas	2,072	N/S	HOMER	W,S,D	B	Orhan et al., 2014
Kangaroo	4,417	N/S				
Flinders	700	3,704.166	FL-GWO	W,S,Ti,D	Li	El-Bidairi et al., 2018
Ometepe	32,727	10,000	N/A	N/S	PS	Meza et al., 2019
Fournoi	1,459	5,315	Method Algorithm	W,Hy	PS	Bertsiou et al., 2018
Kavaratti	11,210	12,730	HOMER+DigSILENT	W,S,D	LA	Singh et al., 2017
Anafi	423	1,277	ESA	W,S,D	B	Tzanes et al., 2017
Tioman	3,314	9,500	HOMER	W,S,Hy,D	B	Basir Khan et al., 2015
Yong Shu	500	45,400	HOMER	W,S,D	H,B,F	Ye et al., 2017
Skiros	2,994	16,207	EpsilonProfessional+Exergetic Analysis	W,CSP	NaS	Petrakopoulou et al., 2016
Deokjeok	1,402	10,283	Linear Programming+HOMER	W,S,D	B	Shin et al., 2015
Man-Jae-Do	N/S	242.635	Techno-economic model	W,S,D	B	Ahadi et al., 2016
Sang-Tae-Do	N/S	257.016				
Yeong-San-Do	N/S	168.118				
Dok-Do	N/S	403.883				
Woo-I-Do	N/S	653.09				
Jang-Do	N/S	211.298				
Jung-Ma-Do	N/S	85.42				
Ha-Tae-Do	N/S	428.463				
Utsira	218	246	TRNSYS+HYDROGEMS	W	H,NiCd	Ulleberg et al., 2010
Ventotene	708	N/S	TRNSYS+HYDROGEMS	W,S,Wv	H	Corsini et al., 2009
Hainan	8,600,000	12,000,000	HOMER	W,S,Hy,NG	N/S	Ye et al., 2012
Korčula	15,522	46,060	ENERGYPLAN	W,S	B	Dorotić et al., 2019
Karpathos-Kasos	7,310	42,199.199	Software	W,Hy	PS	Katsaprakakis et al., 2012
Cozumel	79,535	261,000	HOMER+RETScreen	W,S,D	N/S	Mendoza-Vizcaino et al., 2016
São Vicente	74,031	57,000	H2RES	W,Hy,Th	PS	Segurado et al., 2011

Canarias	2,120,000	8,223,000	Mesap-PlaNet+REMIX	W,S,CSP,Hy,G,Wv,BM	PS,FFB,H	Gils & Simon, 2017
Pulau Ubin	200	N/S	TRNSYS	S,CSP,BM	H	Chua et al., 2014
Mykonos	10,134	43,612	N/S	W,S,D	N/S	Economou, 2010
Salina	2,504	10,859.5	TRNSYS	W,S	N/S	Andaloro et al., 2012
Wang-An/Jian-Jun-Ou	3,289	6,400	EnergyPLAN	W,S,Wv,BM	N/S	Yue et al., 2016
Lençóis	390	72,889	N/S	W,S,D	B	Ribeiro et al., 2012
Vis	3,617	13,158	HOMER	S	B,H	Pfeifer et al., 2017
El Hierro	11,178	45,000	MILP	W,Hy,D	PS	Pezic & Cedrés, 2013
Oahu	976,372	7,561,000	N/S	W,S,D	N/S	Schuerger et al., 2013
Prince Edward	142,907	2,000,000	GA	W,S,BM	Li	Hall & Swingler, 2018
Perhentian	2,000	N/S	N/S	W,S,D	B	Darus et al., 2009
Gökceada	8,766	N/S	HOMER	W,S,D	B	Demiroren & Yilmaz, 2010
Gadeokdo	3,800	12,390	HOMER	W,S	B	Park & Kwon, 2016

## References

- Aguirre-Mendoza, A. M., Díaz-Mendoza, C., & Pasqualino, J. (2019). Renewable energy potential analysis in non-interconnected islands. Case study: Isla Grande, Corales del Rosario Archipelago, Colombia. *Ecological Engineering*, 130, 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.020>
- Ahadi, A., Kang, S.-K., & Lee, J.-H. (2016). A novel approach for optimal combinations of wind, PV, and energy storage system in diesel-free isolated communities. *Applied Energy*, 170, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.110>
- Andaloro, A. P. F., Salomone, R., Andaloro, L., Briguglio, N., & Sparacia, S. (2012). Alternative energy scenarios for small islands: A case study from Salina Island (Aeolian Islands, Southern Italy). *Renewable Energy*, 47, 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.021>
- Bačelić Medić, Z., Čosić, B., & Duić, N. (2013). Sustainability of remote communities: 100% renewable island of Hvar. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(4), 041806. <https://doi.org/10.1063/1.4813000>
- Bahramara, S., Moghaddam, M. P., & Haghifam, M. R. (2016). Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 609–620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.039>
- Basir Khan, M. R., Jidin, R., Pasupuleti, J., & Shaaya, S. A. (2015). Optimal combination of solar, wind, micro-hydro and diesel systems based on actual seasonal load profiles for a resort island in the South China Sea. *Energy*, 82, 80–97. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.072>
- Bertsiou, M., Feloni, E., Karpouzou, D., & Baltas, E. (2018). Water management and electricity output of a Hybrid Renewable Energy System (HRES) in Fournoi Island in Aegean Sea. *Renewable Energy*, 118, 790–798. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.078>

- Blechinger, P., Cader, C., Bertheau, P., Huyskens, H., Seguin, R., & Breyer, C. (2016). Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands. *Energy Policy*, 98, 674–687. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.043>
- Brito, M. C., Lobato, K., Nunes, P., & Serra, F. (2014). Sustainable energy systems in an imaginary island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 229–242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.008>
- Chalakatevaki, M., Stamou, P., Karali, S., Daniil, V., Dimitriadis, P., Tzouka, K., Iliopoulou, T., Koutsoyiannis, D., Papanicolaou, P., & Mamassis, N. (2017). Creating the electric energy mix in a non-connected island. *Energy Procedia*, 125, 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.089>
- Chmiel, Z., & Bhattacharyya, S. C. (2015). Analysis of off-grid electricity system at Isle of Eigg (Scotland): Lessons for developing countries. *Renewable Energy*, 81, 578–588. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.061>
- Chua, K. J., Yang, W. M., Er, S. S., & Ho, C. A. (2014). Sustainable energy systems for a remote island community. *Applied Energy*, 113, 1752–1763. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.030>
- Corsini, A., Rispoli, F., Gamberale, M., & Tortora, E. (2009). Assessment of H<sub>2</sub>- and H<sub>2</sub>O-based renewable energy-buffering systems in minor islands. *Renewable Energy*, 34(1), 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.005>
- Darus, Z., Hashim, N. A., Manan, S. N. A., Rahman, M. A. A., Matilud, K. N. A., & Karim, O. A. (2009). The development of hybrid integrated renewable energy system (wind and solar) for sustainable living at Perhentian Island, Malaysia. *European Journal of Social Sciences*, 9(4), 557–563.
- Demiroren, A., & Yilmaz, U. (2010). Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy sources in Gökceada, Turkey: An island example. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.030>
- Dorotić, H., Doračić, B., Dobravec, V., Pukšec, T., Krajačić, G., & Duić, N. (2019). Integration of transport and energy sectors in island communities with 100% intermittent renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.033>
- Drouineau, M., Assoumou, E., Mazauric, V., & Maïzi, N. (2015). Increasing shares of intermittent sources in Reunion Island: Impacts on the future reliability of power supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.024>
- Duić, N., Krajačić, G., & da Graça Carvalho, M. (2008). RenewIslands methodology for sustainable energy and resource planning for islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1032–1062. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.015>
- Economou, A. (2010). Renewable energy resources and sustainable development in Mykonos (Greece). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(5), 1496–1501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.008>

- El-Bidairi, K. S., Duc Nguyen, H., Jayasinghe, S. D. G., Mahmoud, T. S., & Penesis, I. (2018). A hybrid energy management and battery size optimization for standalone microgrids: A case study for Flinders Island, Australia. *Energy Conversion and Management*, 175, 192–212. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.076>
- Enevoldsen, P., & Sovacool, B. K. (2016). Integrating power systems for remote island energy supply: Lessons from Mykines, Faroe Islands. *Renewable Energy*, 85, 642–648. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.065>
- Faúndez, P. (2017). Renewable energy in the equilibrium mix of electricity supply sources. *Energy Economics*, 67, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.07.015>
- Gils, H. C., & Simon, S. (2017). Carbon neutral archipelago – 100% renewable energy supply for the Canary Islands. *Applied Energy*, 188, 342–355. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.023>
- Graham, V. A., & Hollands, K. G. T. (1990). A method to generate synthetic hourly solar radiation globally. *Solar Energy*, 44(6), 333–341. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90137-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90137-2)
- Hall, M., & Swingler, A. (2018). Initial perspective on a 100% renewable electricity supply for Prince Edward Island. *International Journal of Environmental Studies*, 75(1), 135–153. <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1395246>
- International Energy Agency. (2019). *SDG7: Data and projections*. Reports. <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections>
- International Energy Agency. (2018). *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion - 2018 Highlights*. International Energy Agency & OECD.
- Ioannidis, A., & Chalvatzis, K. J. (2017). Energy supply sustainability for island nations: A study on 8 global islands. *Energy Procedia*, 142, 3028–3034. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.440>
- Kaldellis, J. K., Gkikaki, A., Kaldelli, E., & Kapsali, M. (2012). Investigating the energy autonomy of very small non-interconnected islands: A case study: Agathonisi, Greece. *Energy for Sustainable Development*, 16(4), 476–485. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.08.002>
- Katsaprakakis, D. A. (2016). Hybrid power plants in non-interconnected insular systems. *Applied Energy*, 164, 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.085>
- Katsaprakakis, D. A., Christakis, D. G., Pavlopoylos, K., Stamataki, S., Dimitrelou, I., Stefanakis, I., & Spanos, P. (2012). Introduction of a wind powered pumped storage system in the isolated insular power system of Karpathos–Kasos. *Applied Energy*, 97, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.069>
- Kennedy, N., Miao, C., Wu, Q., Wang, Y., Ji, J., & Roskilly, T. (2017). Optimal hybrid power system using renewables and hydrogen for an isolated island in the UK. *Energy Procedia*, 105, 1388–1393. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.517>
- Kougias, I., Szabó, S., Nikitas, A., & Theodossiou, N. (2019). Sustainable energy modelling of non-interconnected Mediterranean islands. *Renewable Energy*, 133, 930–940. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.090>
- Krajačić, G., Martins, R., Busuttill, A., Duić, N., & da Graça Carvalho, M. (2008). Hydrogen as an energy vector in the islands' energy supply. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(4), 1091–1103. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.025>

- Kuang, Y., Zhang, Y., Zhou, B., Li, C., Cao, Y., Li, L., & Zeng, L. (2016). A review of renewable energy utilization in islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>
- Lata-García, J., Reyes-López, C., Jurado, F., Fernández-Ramírez, Luis. M., & Sánchez, H. (2017). Sizing optimization of a small hydro/photovoltaic hybrid system for electricity generation in Santay Island, Ecuador by two methods. *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. <https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229539>
- Lin, J.-H., Wu, Y.-K., & Lin, H.-J. (2016). Successful experience of renewable energy development in several offshore islands. *Energy Procedia*, 100, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.137>
- Liu, H., & Qu, S. (2014). The optimal capacity and economic analysis of micro-grid on island. *OCEANS 2014 – TAIPEI*. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964426>
- Liu, H.-Y., & Wu, S.-D. (2010). An assessment on the planning and construction of an island renewable energy system – A case study of Kinmen Island. *Renewable Energy*, 35(12), 2723–2731. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.021>
- Liu, Y., Yu, S., Zhu, Y., Wang, D., & Liu, J. (2018). Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.063>
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2014). A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island. *Applied Energy*, 121, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.090>
- Mahesh, A., & Sandhu, K. S. (2015). Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1135–1147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.008>
- Manwell, J. F. (2004). Hybrid energy systems. In C. J. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of energy* (pp. 215–229). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00360-0>
- Mazumder, P., Jamil, M. H., Das, C. K., & Matin, M. A. (2014). Hybrid energy optimization: An ultimate solution to the power crisis of St. Martin Island, Bangladesh. *2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 363–368. <https://doi.org/10.1109/IFOST.2014.6991141>
- Mendoza-Vizcaino, J., Sumper, A., Sudria-Andreu, A., & Ramirez, J. M. (2016). Renewable technologies for generation systems in islands and their application to Cozumel Island, Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 348–361. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.014>
- Meza, C. G., Zuluaga Rodríguez, C., D'Aquino, C. A., Amado, N. B., Rodrigues, A., & Sauer, I. L. (2019). Toward a 100% renewable island: A case study of Ometepe's energy mix. *Renewable Energy*, 132, 628–648. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.124>
- Mohammed, O. H., Amirat, Y., Benbouzid, M., Haddad, S., & Feld, G. (2016). Optimal sizing and energy management of hybrid wind/tidal/PV power generation system for remote areas: Application to the Ouessant French Island. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 4205–4210. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793976>

- Mourmouris, J. C., & Potolias, C. (2013). A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece. *Energy Policy*, 52, 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.074>
- Orhan, T., Shafiullah, G. M., Stojcevski, A., & Oo, A. (2014). A feasibility study on microgrid for various Islands in Australia. *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966604>
- Papaefthymiou, S. V., & Papathanassiou, S. A. (2014). Optimum sizing of wind-pumped-storage hybrid power stations in island systems. *Renewable Energy*, 64, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.047>
- Papaefthymiou, S. V., Lakiotis, V. G., Margaris, I. D., & Papathanassiou, S. A. (2015). Dynamic analysis of island systems with wind-pumped-storage hybrid power stations. *Renewable Energy*, 74, 544–554. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.062>
- Park, E., & Kwon, S. J. (2016). Towards a sustainable island: Independent optimal renewable power generation systems at Gadeokdo Island in South Korea. *Sustainable Cities and Society*, 23, 114–118. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.017>
- Petrakopoulou, F., Robinson, A., & Loizidou, M. (2016). Simulation and evaluation of a hybrid concentrating-solar and wind power plant for energy autonomy on islands. *Renewable Energy*, 96(A), 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.030>
- Pezic, M., & Cedrés, V. M. (2013). Unit commitment in fully renewable, hydro-wind energy systems. *2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. <https://doi.org/10.1109/EEM.2013.6607331>
- Pfeifer, A., Bošković, F., Dobravec, V., Matak, N., Krajačić, G., Duić, N., & Pukšec, T. (2017). Building smart energy systems on Croatian islands by increasing integration of renewable energy sources and electric vehicles. *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977401>
- Ribeiro, L. A. de S., Saavedra, O. R., Lima, S. L., de Matos, J. G., & Bonan, G. (2012). Making isolated renewable energy systems more reliable. *Renewable Energy*, 45, 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.014>
- Sakaguchi, T., & Tabata, T. (2015). 100% electric power potential of PV, wind power, and biomass energy in Awaji island Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1156–1165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.056>
- Schuerger, M., Johal, H., Roose, L., Matsuura, M., & Piwko, R. (2013). Catching some rays: Variable generation integration on the island of Oahu. *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(6), 33–44. <https://doi.org/10.1109/MPE.2013.2277998>
- Segurado, R., Krajačić, G., Duić, N., & Alves, L. (2011). Increasing the penetration of renewable energy resources in S. Vicente, Cape Verde. *Applied Energy*, 88(2), 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.005>
- Selosse, S., Garabedian, S., Ricci, O., & Maïzi, N. (2018). The renewable energy revolution of Reunion Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.013>

- Senjyu, T., Hayashi, D., Yona, A., Urasaki, N., & Funabashi, T. (2007). Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy. *Renewable Energy*, 32(11), 1917–1933. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.09.003>
- Shin, Y., Koo, W. Y., Kim, T. H., Jung, S., & Kim, H. (2015). Capacity design and operation planning of a hybrid PV–wind–battery–diesel power generation system in the case of Deokjeok Island. *Applied Thermal Engineering*, 89, 514–525. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.043>
- Siddaiah, R., & Saini, R. P. (2016). A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 376–396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.281>
- Singh, G., Baredar, P., Singh, A., & Kurup, D. (2017). Optimal sizing and location of PV, wind and battery storage for electrification to an island: A case study of Kavaratti, Lakshadweep. *Journal of Energy Storage*, 12, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.04.003>
- Sinha, S., & Chandel, S. S. (2014). Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 192–205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.035>
- Stevens, N. E., Castillo, J., Baring-Gould, I., & Lagos, W. (2001). *Isla Tac power system first year status report: October 2000 through October 2001* [Doc. TR-Tac-11-2001]. Wireless Energy. [http://www.bergey.com/wp-content/uploads/2012/01/Final\\_Tac\\_Report\\_1\\_Yr.pdf](http://www.bergey.com/wp-content/uploads/2012/01/Final_Tac_Report_1_Yr.pdf)
- Thomas, D., Deblecker, O., & Ioakimidis, C. S. (2016). Optimal design and techno-economic analysis of an autonomous small isolated microgrid aiming at high RES penetration. *Energy*, 116(Part 1), 364–379. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.119>
- Tzanes, G. T., Zafirakis, D., Papapostolou, C., Kavadias, K., & Kaldellis, J. K. (2017). PHAROS: An integrated planning tool for meeting the energy and water needs of remote islands using RES-based hybrid solutions. *Energy Procedia*, 142, 2586–2591. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.196>
- Ulleberg, Ø., Nakken, T., & Eté, A. (2010). The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(5), 1841–1852. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.077>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development* (A/RES/70/1). <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
- van Alphen, K., van Sark, W. G. J. H. M., & Hekkert, M. P. (2007). Renewable energy technologies in the Maldives— Determining the potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1650–1674. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.02.001>
- Ye, B., Tang, J., & Lu, Q. (2012). Feasibility analysis of renewable energy powered tourism island—Hainan, China. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(6), 063127. <https://doi.org/10.1063/1.4767836>

*James Morales Lassalle, Dante Figueroa Martínez, & Luis Vergara Fernández*

- Ye, B., Zhang, K., Jiang, J., Miao, L., & Li, J. (2017). Towards a 90% renewable energy future: A case study of an island in the South China Sea. *Energy Conversion and Management*, *142*, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.038>
- Yue, C.-D., Chen, C.-S., & Lee, Y.-C. (2016). Integration of optimal combinations of renewable energy sources into the energy supply of Wang-An Island. *Renewable Energy*, *86*, 930–942. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.073>



## 5.2 A super linear power law for the energy consumption of islands

### A superlinear power law for the energy consumption of islands

James Morales

Doctoral Program in Energy, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. jmoralesl@udec.cl

Dante Figueroa

Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. dantefigueroa@udec.cl

Mauricio A. Figueroa

Departamento de Español, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. mafigueroa@udec.cl

Leonardo E. Figueroa

CI<sup>2</sup>MA and Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile. lfiguero@ing-mat.udec.cl

More than 10% of the world's population lives on islands. Hence, establishing a relationship between the energy consumption and the population of islands could lead to better decisions in public policy issues related to energy efficiency and sustainability impacting a large proportion of the world's inhabitants. Here we present a relationship between the annual electricity consumption of islands and their population. By considering 51 administratively dependent, energy-isolated islands from around the world bar polar regions, we show that this relationship follows a power law, with a slope close to 1.12 ( $R^2 = 0.91$ ); i.e., superlinear. This result is robust and independent of how we choose to sample our island data. This slope is significantly different from the ones for 160 world countries ( $0.86$ ,  $R^2 = 0.43$ ) and for 14 Small Islands Developed States ( $0.83$ ,  $R^2 = 0.73$ ), both sublinear. We also calculate the slope for 182 islands of just one country (Maldives), finding a slope close to the one obtained in the case of world's islands ( $1.06$ ,  $R^2 = 0.88$ ; i.e., superlinear).

Energy consumption, Islands, Power law

#### Introduction

Islands are complex systems where demographic, social, economical, cultural, geographical, and political issues usually interact at small spatial scales ([1],[2][3]). They are prominent cases of isolated areas, regions that meet some of the following characteristics: they lie at large distances from population centres, suffer from inconvenient transportation links and, from an energy point of view, often lack access to utility grids and are highly dependent on imported (fossil) energy [4]. According to [5], presently over 740 million people live in islands, i.e., approximately 10% of the world population. This implies that an adequate assessment of the energy consumption of islands may impact a large part of the world's humanity.

Island power systems usually depend heavily on imported fuels for energy generation, with the foreseeable economic and environmental consequences [6]. In order to curb environmental risks related to conventional electricity generation (diesel), reduce the cost of energy, and provide greater reliability to the energy system, some islands are grid-connected to the mainland, but in most cases, this is economically unfeasible due the cost of undersea cables [7].

The relationship between energy consumption and population for some specific geographic entities—other than islands—has been largely discussed in other studies. Some examples are the comparison of the consumption between rural and urban zones [8], the energy consumption and the urban form [9], energy intensity use and urban features, population density and purchasing power parity [10], total energy consumption and population density in megacities [11], population versus consumption in countries and on a global scale [12], and socio-economic characteristics and population in cities [13]. But, to the best of our knowledge, no results have been presented specifically for islands and their geographic constraints.

On this issue, a paramount question is whether islands follow some power law between energy consumption and population, as countries do [14], and, if the answer is yes, whether the relation is sublinearly-, linearly-, or superlinearly-scaled. Such knowledge is likely to have important consequences for policy-makers' decisions on investments in power systems.

This study analyses the relationship between population and annual energy consumption of non-politically independent, non-interconnected islands around the world. This entails the computation of correlation coefficients and linear regression analyses in order to quantify the goodness of the relationship. We also compare the case of islands with that of other political entities: countries, on the one hand, and Small Islands Developing States (SIDS) [15], on the other, and discuss differences and similarities.

## Materials and methods

### Selection criteria

It is necessary to determine which kind of islands will be considered in this study, as there are cases of islands electrically connected to a mainland (such as Manhattan), or that are big enough to be independent political entities (such as Australia, or the SIDS: Cyprus, New Zealand, Cuba, among others). We restrict the scope of this study to islands that meet the following criteria:

(i) Each island's population must be at least one hundred, but no more than one million inhabitants. The lower limit was set to grant that a community exists, perhaps with schools and other public services, requiring a rather continuous supply of energy. Concerning the upper limit, it was assumed that large enough populations can develop political influence and some level of self-determination to a degree that may alter the 'natural' requirement of energy of an island.

(ii) Only administratively dependent territories or subdivisions from a sovereign state are considered. This excludes countries that are islands themselves. Again, the aim is to look for the 'natural' relationship between energy consumption and population, largely uninfluenced by the additional fiscal and political capabilities at the disposal of sovereign states.

(iii) Only energy-isolated islands are considered. Islands interconnected with main grids, or islands connected to other islands, are not included. The idea is to avoid the 'contamination' of the island energy data with that of the mainland.

(iv) The information about the energy consumption of the island has to have been published on or after 2015. If a power law describes well the relation between the energy consumption of islands and their population, it is possible that the parameters of this power law may be time dependent. The purpose here is to limit the time span of the data, to guarantee that we get an adequate snapshot of the system. This also

means that, when comparing with the cases of other political entities, we need to consider the same time window for their data.

Other kind of islands, such as SIDS, will be evaluated separately, as will countries, except for the countries classified as SIDS.

### Data sources

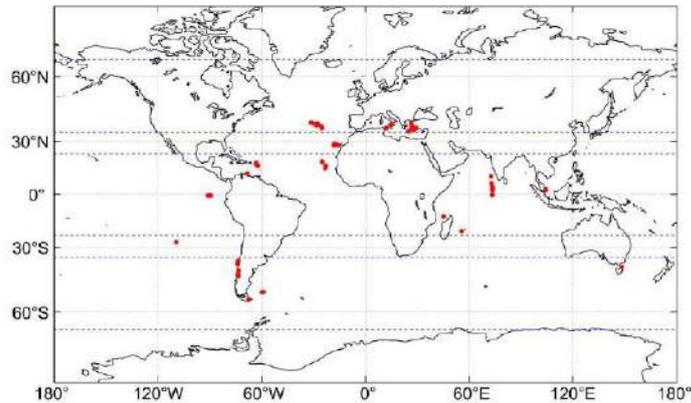
The annual energy consumption data of islands was obtained from published papers, from open documents generated by the corresponding governments and, in the case of the Chilean islands, by direct inquiries with the authorities.

The number of islands with published data varies significantly among countries. Usually, this number is five or less, but for Maldives we could find data for some 200 islands. This poses the problem of how to choose an adequate number of islands per country, and how to select them, because including them all would introduce a bias toward small, tropical islands. In our case the country having the largest number of islands with published data, after Maldives, is Chile, with 7 islands. Therefore, we selected also 7 islands of Maldives, always including, because of its relative large population, the one containing the Maldives capital, the other six being selected one from each population sextile of the rest of islands.

Following the above criteria, we produced a dataset comprising 51 islands, scattered on the three major oceans of the world. The collected data and its sources may be found at Supplementary Table 2.

On the other hand, the data for 160 countries and 14 SIDS was obtained from the World Factbook of the American Central Intelligence Agency [16]. Other islands, political entities that are not SIDS, were considered as countries (e.g., the United Kingdom, Japan, and Taiwan).

Figure (1) shows the geographical distribution of these 51 islands. Of them, 35 lie on the Northern Hemisphere and 16 on the Southern Hemisphere; 22 lie on the tropical regions, 6 on subtropical regions, and 23 in temperate regions. None of these islands lies on polar regions.



*Figure 1. Geographical distribution of the 51 islands included in this study. Zonal lines delimit tropical, subtropical, and temperate climate zones*

### Power relationship for islands

A log-log representation of the energy consumption of all islands, as a function of their population, shows a robust power law (see Figure 2), suggesting that there is a positive linear relationship between the population of islands and their energy consumption. Following Shapiro–Wilk tests to confirm the normality of the distributions of both the logarithmic population of the islands ( $W(51) = .973$ ,  $p = .307$ ) and their logarithmic energy consumption ( $W(51) = .983$ ,  $p = .650$ ), a Pearson's product-moment correlation coefficient was calculated and showed that there is a statistically significant direct correlation between the variables ( $r(49) = .953$ ,  $p < .001$ ).

$\epsilon$ , of 1.120 in the logarithmic energy consumption of an island. The analysis also showed that the latitude of the islands does not have a significant effect on their logarithmic energy consumption ( $a = -0.186$ ,  $b = 0.004$ ,  $t(49) = 1.225$ ,  $p = .227$ ).

An  $\epsilon$  around 1.12 expresses a superlinearly-scaled relation. It would mean that islands show an increased productivity per capita resulting from more social interactions [9]. This seems reasonable for islands, as in their case the extreme geographic constraints should prevent economies of scale.

## Comparison with energy consumption of other political entities

### Countries

We performed a similar analysis for the energy consumption of the already mentioned 160 countries. In this case the number of inhabitants goes from the tens of thousands up to several hundreds of millions.

A simple linear regression model was built to evaluate whether the logarithmic population of countries can predict their logarithmic energy consumption. Results showed that the logarithmic population is able to explain a statistically significant proportion of the variance of the countries' logarithmic energy consumption ( $R^2_{\text{adjusted}} = .433$ ,  $F(1, 158) = 122.3$ ,  $p < .001$ ), and that the logarithmic population is able to predict the logarithmic energy consumption ( $a = 1.096$ ,  $b = .860$ ,  $t(158) = 11.059$ ,  $p < .001$ ). The value of the slope,  $\epsilon$ , suggests that for each unit increase in the logarithmic population there is an increase of .860 in the logarithmic energy consumption of a country.

Figure 3 shows the energy consumption of 160 countries, ordered by population, and the best fit for the power law. Some countries that deviate to some extent from the fitted regression line are highlighted.



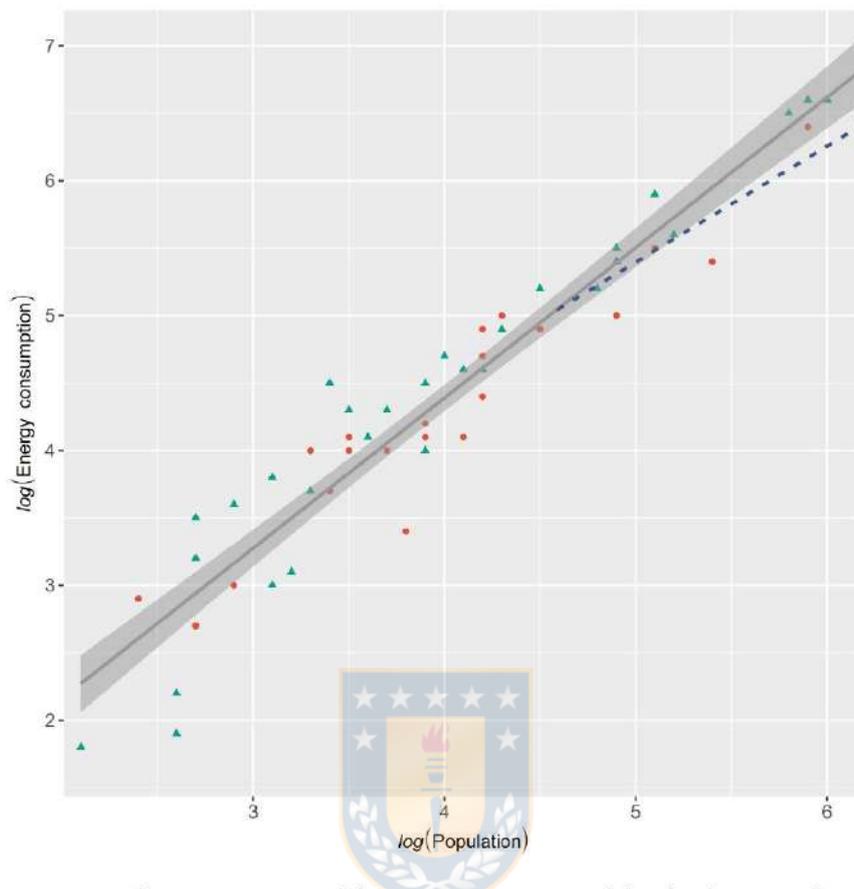


Figure 2. Log-log representation of the energy consumption of the islands against their population, with an adjusted linear regression line showing 95% confidence intervals. Islands represented as circles correspond to tropical climates, while islands represented with triangles correspond to subtropical and temperate climates. The dashed line shows a regression line for the data from countries, to be discussed below.

In order to further investigate this relationship, and the potential effect of the absolute latitude of the islands, a multiple linear regression analysis was conducted, which revealed that the logarithmic population of islands is able to explain a statistically significant proportion of the variance of the islands' logarithmic energy consumption ( $R^2_{\text{adjusted}} = .908$ ,  $F(2, 48) = 246.7$ ,  $p < .001$ ), and that the logarithmic population was capable of predicting the logarithmic energy consumption ( $a = -0.186$ ,  $b = 1.120$ ,  $t(48) = 22.204$ ,  $p < .001$ , with **a** is the intercept and **b** or  $\epsilon$  the slope). The value of the slope suggests that for each increase of a unit in logarithmic population there is an increase,

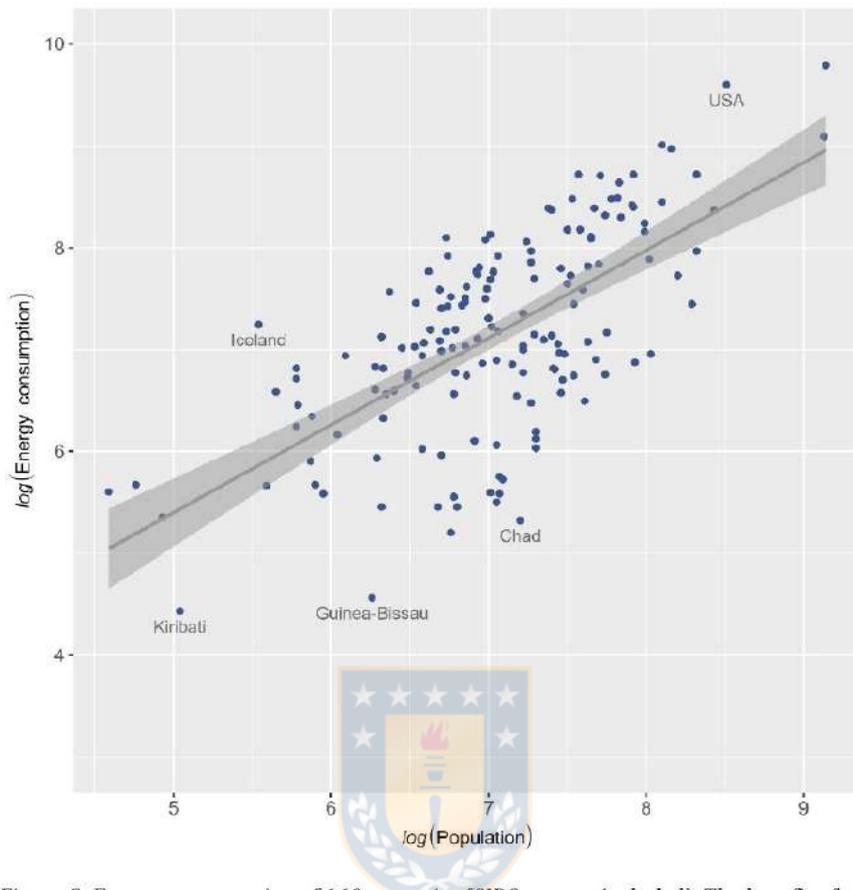


Figure 3. Energy consumption of 160 countries (SIDS are not included). The best fit of a linear regression of a power law is shown in black.

Note that, unlike islands, countries display a slope,  $\epsilon = 0.86$ , smaller than 1. This result is coherent with the study [14], which considers all countries (i.e., without excluding countries that are themselves islands), and fitted a power law with  $\epsilon = 0.75$ .

In order to emphasise the different population-energy consumption relations of islands and countries, we included the fitted power law for countries in our figure for islands (see Figure 2; the dashed line represents the case of countries). The contrast between the fitted power law for countries and for islands is quite clear.

## SIDS

For SIDS the logarithms of both the islands' population and of their energy consumption are normally distributed, with a statistically significant Pearson product-moment correlation coefficient ( $r(12) = .867, p < .001$ ). A simple linear regression analysis showed that the logarithm of the population is able to predict the logarithmic energy consumption with statistical significance ( $a = 3.087, b = .829, t(12) = 6.039, p < .001$ ). The exponent of the fitted power law is 0.829. The adjusted coefficient of determination  $R^2_{\text{adjusted}}$  is 0.732; i.e. the logarithm of the population significantly predicts a 73.2% of the variability of the logarithm of the energy consumption ( $F(1, 12) = 36.470, p < .001$ ).

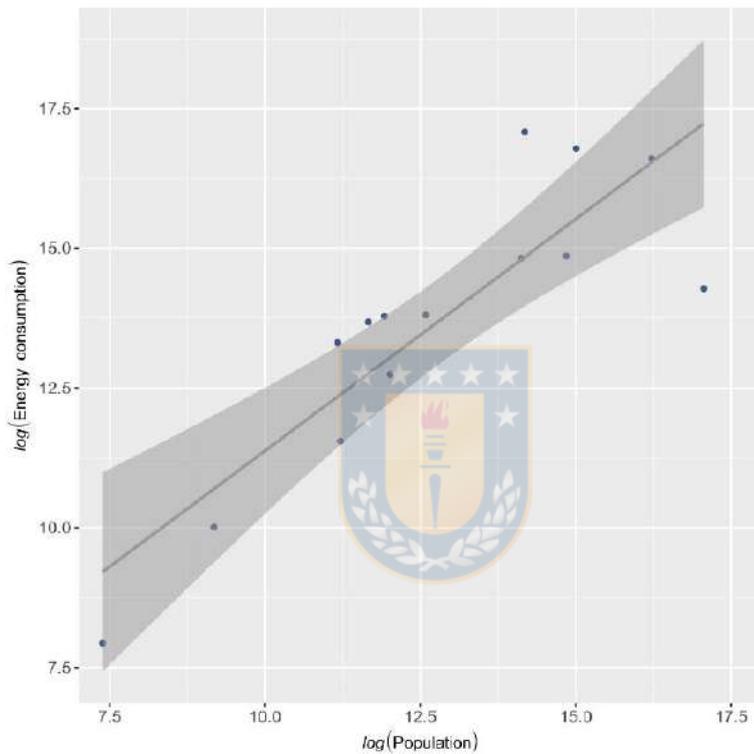


Figure 4. Energy consumption of SIDS. The best fit of a linear regression of a power law is shown in black.

### Islands from a single country

Considering islands of just one country could eliminate political and perhaps also cultural differences that may exist among islands of different countries. Bearing in mind this, it seems advisable to analyse if the islands of just one country follow a power law, and if yes, what is the exponent of the power law.

We have analysed 182 islands of Maldives, all lying on a relatively small area, whose populations range from 107 inhabitants in B. Fehendhoo island to 127,079 inhabitants in the capital Malé. The population-energy consumption relation of these islands does indeed follow a power law, with an exponent  $\epsilon = 1.060$  (i.e., smaller than the  $\epsilon = 1.1$  for the generality of islands) and  $R_{\text{adjusted}}^2 = 0.882$ .

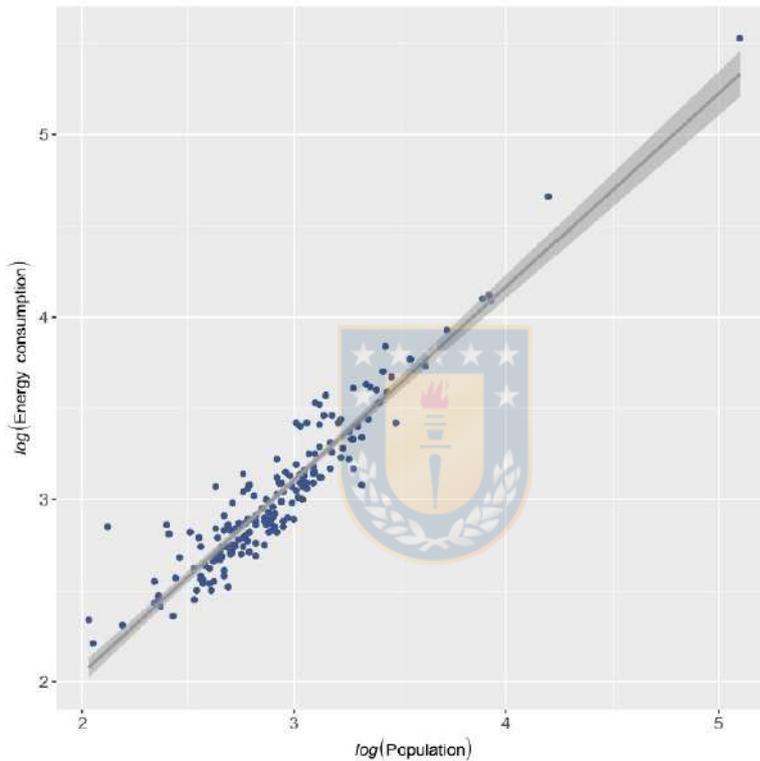


Figure 5. Energy consumption of 182 islands of Maldives, including its capital, Malé. The best fit of a linear regression of a power law is shown in black.

## A summary table

We summarise our results in Table 1.

*Table 1. Summary table of the energy power law for several political entities*

<i>Political entity</i>	<i>N</i>	<i><math>\epsilon</math></i>	<i>R<sup>2</sup></i>
World islands	51	1.120	0.908
Maldives Islands	182	1.060	0.882
SIDS	14	0.829	0.732
World countries	160	0.860	0.433

## Discussion

Even though reliable energy information could not be obtained for very many islands, the fact that our result for our sample of world islands ( $\epsilon = 1.120$ ) is rather close to the case of the 182 electrified islands of just one country, Maldives ( $\epsilon = 1.060$ ), and the fact that both are rather separated from countries ( $\epsilon = 0.860$ ) and SIDS ( $\epsilon = 0.829$ ) grant confidence in that these results are consistent and reliable.

Having established that the population-energy consumption relation of islands follows a higher power law than that of countries and SIDS, the question arises about its causes.

One possible cause for this difference is that the relative isolation of islands, as compared with countries, makes them less efficient in energy transport and in final consumption of energy by their inhabitants. Another plausible reason is that, due to their population density, countries (and possibly also SIDS) have developed economies of scale that islands cannot attain; this argument has been invoked for explaining differences between urban and rural sectors and even among urban areas with different development levels [8], [9].

A third possibility is that the population on islands tends to concentrate along their borders, which favours a chain-like (one-dimensional) energy distribution grid, in contrast with a more web-like (higher- and possibly fractal-dimensional) one for countries. This could affect the efficiency of the energy distribution.

One should be wary of overrepresenting islands from some countries to the detriment of others. For example, Chile has about 50 inhabited islands, the Philippines about 2000, and, as mentioned before, Maldives has at least 182. That is the reason that we restrict the number of islands from any particular country to 7. In the case of Maldives, we set up a Montecarlo process for testing many particular choices of these 7 islands and found no significant effect on the slope of the power-law for the 51 world islands sample.

There are several aspects of this subject that were not addressed in this study. We could show that the latitude of the island is not significantly relevant for its energy

consumption (compared with its population, at least). But one may wonder whether the political system of the country is important, for example. Or, in the case of SIDS, whether those states that are comprised of several islands behave differently from the one-island states. Evaluating all these possibilities lies beyond the scope of this study but provides a basis for further studies.

Another aspect that should be considered in successor studies is the influence that different economic activities on the islands may have on the relationship between population and annual energy consumption. Many islands have a highly developed tourism industry, for example, which adds an important effect in terms of floating population—not considered in the population statistics here—and energy consumption. On the other hand, there are islands that maintain basically subsistence activities which in turn would imply a lower relative electricity consumption.

## Conclusions

This paper presents a relationship between population and annual energy consumption of isolated (non-interconnected) islands around the world, suggesting a power law relationship with a slope of 1.120, and an  $R^2_{\text{adjusted}}$  of 0.908. This relation is significant, and each of the two variables, in logarithmic form, follows a normal distribution. The results indicate a super-linear relationship, that could be caused by inefficiencies inherent to islands, particularly in terms of electricity transmission, population dispersion or economies of scale.

An analysis of a large number of islands of just one country (Maldives) gives a slope of 1.060, rather close to the case of islands around the world.

The slopes found for islands of the world in general and of Maldives differ significantly from the corresponding slopes for countries (0.860) and for SIDS (0.829). In this regard, values lower than one are attributable to economies of scale and higher energy efficiency standards.

These results provide a basis for future studies addressing the relationship between the population and the energy consumption of islands, which should involve economic and political variables, and could enable better decisions in public policy issues oriented to the energetic efficiency and sustainability of island communities.

## Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

## Appendix

Table 2. Analysed islands. The atoll prefixes of Maldives' islands are: Sh.=Shaviyani, GDh.=Gaafu Dhaalu, M.=Meemu, K.=Kaafu.

Island	Country	Pop	Area [km <sup>2</sup> ]	Consumption [MWh/year]	Ref
Flinders	Australia	800	1367.0	3704	[17]
Ascención	Chile	1454	620.0	1332	* [18]
Mocha	Chile	419	48.0	167	* [18]
Rapa Nui	Chile	7750	163.6	10604	* [18]
Santa María	Chile	1260	30.0	898	* [18]
Toto	Chile	130	1.8	60	* [18]
Navarino	Chile	1834	2473.0	4836	* [18]
Tabón	Chile	374	8.6	84	* [18]
Isabela	Ecuador	2344	4588.0	4550	[19] [20]
San Cristóbal	Ecuador	7199	558.0	14410	[19] [20]
Santa Cruz	Ecuador	15701	986.0	27890	[19] [20]
Mayotte	France	256500	376.0	262000	[21] [22]
Reunion	France	837900	2512.0	2545000	[23]
Astypalaia	Greece	1334	114.1	6250	[24]
Crete	Greece	632674	8336.0	3383201	[25]
Kastelorizo	Greece	492	12.0	3510	[25]
Samos	Greece	32977	477.0	168862	[25]
Lesbos	Greece	85330	1632.0	297928	[26]
Rhodes	Greece	115490	1400.0	816604	[26]
Kavaratti	India	11221	4.2	12730	[27]
Pantelleria	Italy	7665	83.0	31067	[28]
Salina	Italy	2598	26.1	34482	[29]
Tioman	Malaysia	3314	131.0	9500	[30]
Sh. Goidhoo	Maldives	520	1.0	552	[31]
GDh. Fuvahmulah	Maldives	8579	4.9	12267	[31]
M. Veyvah	Maldives	254	0.4	724	[31]
K. Malé	Maldives	127079	1.9	336961	[31]
M. Kolhufushi	Maldives	748	0.6	999	[31]

GDh. Fuvahmulah	Maldives	8579	4.9	12267	[31]
K. Hulhumalé	Maldives	15769	2.0	46035	[31]
Bonaire	Netherlands	19549	288.0	103400	[32] [33]
Saba	Netherlands	1947	13.0	9376	[32] [33]
St. Eustatius	Netherlands	3193	21.0	13700	[32] [33]
Corvo	Portugal	467	6.3	1562	[34] [35]
Santa Maria	Portugal	5500	97.2	19480	[34] [35]
São Miguel	Portugal	147228	759.4	411120	[34] [35]
Terceira	Portugal	56437	382.0	176450	[34] [35]
Pico	Portugal	13645	444.8	41630	[34] [35]
Graciosa	Portugal	4391	60.8	12720	[34] [35]
Faial	Portugal	14532	173.0	43780	[34] [35]
El Hierro	Spain	10679	269.0	45037	[36] [37]
Gran Canaria	Spain	843158	1560.0	3649971	[37] [38]
La Gomera	Spain	20976	369.8	77125	[39]
La Palma	Spain	81350	708.3	278700	[39]
Tenerife	Spain	894636	2034.4	3696506	[39]
Anguilla	UK	16086	91.0	88560	[40]
Montserrat	UK	5215	102.0	10890	[41]
East Falkland	UK	3398	12173.0	17670	[42] [43]
Sal	Cape Verde	33747	216.0	73817	[44] [45]
Maio	Cape Verde	6980	269.0	2708	[44] [45]
São Vicente	Cape Verde	81014	227.0	92266	[44] [45]

\* Data about energy consumption for Chilean islands was obtained from direct consultation with the Chilean Ministry of Energy.

## References

- [1] P. Petridis, M. Fischer-Kowalski, S.J. Singh, D. Noll, The role of science in sustainability transitions: Citizen science, transformative research, and experiences from Samothraki island, Greece, *Island Studies Journal*. 12 (2017) 115–134. <https://doi.org/10.24043/isj.8>.
- [2] E. Figueroa, E. Rotarou, Tourism as the development driver of Easter Island: The key role of resident perceptions, *Island Studies Journal*. 11 (2016) 245–264. <https://islandstudies.ca/sites/default/files/ISJ-11-1-O-Figueroa-Rotarou.pdf> (accessed July 15, 2021).

- [3] E. Clark, Island Development, in: R. Kitchin, N. Thrift (Eds.), *International Encyclopedia of Human Geography*, Elsevier, Oxford, 2009: pp. 607–610.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00849-X>.
- [4] Y. Liu, S. Yu, Y. Zhu, D. Wang, J. Liu, Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82 (2018) 460–470.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.063>.
- [5] Y. Kuang, Y. Zhang, B. Zhou, C. Li, Y. Cao, L. Li, L. Zeng, A review of renewable energy utilization in islands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 59 (2016) 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>.
- [6] A. Ioannidis, K.J. Chalvatzis, Energy Supply Sustainability For Island Nations: A Study on 8 Global Islands, *Energy Procedia*. 142 (2017) 3028–3034.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.440>.
- [7] A.M. Aguirre-Mendoza, C. Díaz-Mendoza, J. Pasqualino, Renewable energy potential analysis in non-interconnected islands. Case study: Isla Grande, Corales del Rosario Archipelago, Colombia, *Ecological Engineering*. 130 (2019) 252–262.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.020>.
- [8] H. Arbabi, M. Mayfield, Urban and Rural—Population and Energy Consumption Dynamics in Local Authorities within England and Wales, *Buildings*. 6 (2016) 34.  
<https://doi.org/10.3390/buildings6030034>.
- [9] B. Osorio, N. McCullen, I. Walker, D. Coley, Understanding the Relationship between Energy Consumption and Urban Form, *ATHENS JOURNAL OF SCIENCES*. 4 (2017) 115–142. <https://doi.org/10.30958/ajs.4-2-3>.
- [10] Y. Bettignies, J. Meirelles, G. Fernandez, F. Meinherz, P. Hoekman, P. Bouillard, A. Athanassiadis, The Scale-Dependent Behaviour of Cities: A Cross-Cities Multiscale Driver Analysis of Urban Energy Use, *Sustainability*. 11 (2019) 3246.  
<https://doi.org/10.3390/su11123246>.
- [11] A. Facchini, C. Kennedy, I. Stewart, R. Mele, The energy metabolism of megacities, *Applied Energy*. 186 (2017) 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.025>.
- [12] J.P. DeLong, O. Burger, Socio-Economic Instability and the Scaling of Energy Use with Population Size, *PLOS ONE*. 10 (2015) e0130547.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130547>.
- [13] L.M.A. Bettencourt, The Origins of Scaling in Cities, *Science*. 340 (2013) 1438.  
<https://doi.org/10.1126/science.1235823>.
- [14] M. Hamilton, O. Burger, R. Walker, Human Ecology, in: *Metabolic Ecology: A Scaling Approach*, First Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

- [27] POWERMIN, 24x7 power for all Lakshadweep islands, (2016) 74.  
[https://powermin.gov.in/sites/default/files/uploads/joint\\_initiative\\_of\\_govt\\_of\\_india\\_and\\_lakshadweep.pdf](https://powermin.gov.in/sites/default/files/uploads/joint_initiative_of_govt_of_india_and_lakshadweep.pdf) (accessed January 17, 2020).
- [28] C.E.F.E. Islands, Agenda per la transizione energetica: Isola di Pantelleria, (2020).  
[https://euislands.eu/sites/default/files/PR111040\\_CETA\\_Pantelleria\\_102020.pdf](https://euislands.eu/sites/default/files/PR111040_CETA_Pantelleria_102020.pdf) (accessed May 26, 2021).
- [29] C.E.F.E. Islands, Agenda per la transizione energetica: Isola di Salina, (2019).  
[https://iris.enea.it/retrieve/handle/20.500.12079/54803/7255/CETA\\_Salina.pdf](https://iris.enea.it/retrieve/handle/20.500.12079/54803/7255/CETA_Salina.pdf) (accessed June 7, 2021).
- [30] M.R. Basir Khan, R. Jidin, J. Pasupuleti, S.A. Shaaya, Optimal combination of solar, wind, micro-hydro and diesel systems based on actual seasonal load profiles for a resort island in the South China Sea, *Energy*. 82 (2015) 80–97.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.072>.
- [31] Ministry of Environment and Energy, Island Electricity Data Book 2018, (2018)  
<https://www.environment.gov.mv/v2/wp-content/files/publications/20181105-pub-island-electricity-data-book-2018.pdf> (accessed January 17, 2020).
- [32] F. Schellemen, B. van Weijsten, Renewable Energy Future for the Dutch Caribbean Islands Bonaire, St. Eustatius and Saba, Schelleman & VanWeijsten Sustainable energy Consultancy, (2016) <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-776649> (accessed January 17, 2020).
- [33] StatLine, StatLine - Caribisch Nederland; bevolking; geslacht, leeftijd, burgerlijke staat,  
<https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83698NED/table?ts=1578654405815> (accessed January 17, 2020).
- [34] I. Melo, J.P. Neto Torres, C.A. Ferreira Fernandes, R.A. Marques Lameirinhas, Sustainability economic study of the islands of the Azores archipelago using photovoltaic panels, wind energy and storage system, *Renewables: Wind, Water, and Solar*. 7 (2020) 4. <https://doi.org/10.1186/s40807-020-00061-8>.
- [35] PORTDATA, População residente: Total e por grandes grupos etários.  
<https://www.pordata.pt/Municipios/Popula%C3%A7%C3%A3o+residente+total+e+por+grandes+grupos+et%C3%A1rios-390> (accessed January 17, 2020).
- [36] R. Godina, E.M.G. Rodrigues, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalão, Sustainable Energy System of El Hierro Island, *Renewable Energy and Power Quality Journal*. (2015) 46–50. <https://doi.org/10.24084/repqj13.232>.
- [37] INE, Población por islas y sexo. (2020).  
<https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2910> (accessed January 17, 2020).

- [15] UN, About Small Island Developing States Office of the High Representative for the Least Developed Countries, Landlocked Developing Countries and Small Island Developing States, Small Island Developing States. (2021). <https://www.un.org/ohrrls/content/about-small-island-developing-states> (accessed August 4, 2021).
- [16] Download the World Factbook 2018 — Central Intelligence Agency, (n.d.). <https://www.cia.gov/library/publications/download/download-2018/index.html> (accessed January 17, 2020).
- [17] K.S. El-Bidairi, H. Duc Nguyen, S.D.G. Jayasinghe, T.S. Mahmoud, I. Penesis, A hybrid energy management and battery size optimization for standalone microgrids: A case study for Flinders Island, Australia, *Energy Conversion and Management*. 175 (2018) 192–212. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.076>.
- [18] INE, Censo 2017 Chile - Nivel de manzanas y entidades, (2017). <https://www.censo2017.cl/> (accessed January 17, 2020).
- [19] O.R. Llerena-Pizarro, R.P. Micena, C.E. Tuna, J.L. Silveira, Electricity sector in the Galapagos Islands: Current status, renewable sources, and hybrid power generation system proposal, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 108 (2019) 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.043>.
- [20] INEC, Análisis de resultados definitivos Censo de Población y Vivienda Galápagos, (2015).
- [21] G. Notton, Importance of islands in renewable energy production and storage, The situation of the French islands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 47 (2015) 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.053>.
- [22] Insee, Insee Analyses, Mayotte: 256.000 habitants a Mayotte en 2017. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3284395> (accessed January 17, 2020).
- [23] S. Selosse, S. Garabedian, O. Ricci, N. Maïzi, The renewable energy revolution of reunion island, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 89 (2018) 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.013>.
- [24] M. Chalakatevaki, P. Stamou, S. Karali, V. Daniil, P. Dimitriadis, K. Tzouka, T. Iliopoulou, D. Koutsoyiannis, P. Papanicolaou, and Nikos Mamassis, Creating the electric energy mix in a non-connected island, *Energy Procedia*. 125 (2017) 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.089>.
- [25] D.A. Katsaprakakis, Hybrid power plants in non-interconnected insular systems, *Applied Energy*. 164 (2016) 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.085>.
- [26] I. Kougias, S. Szabó, A. Nikitas, N. Theodossiou, Sustainable energy modelling of non-interconnected Mediterranean islands, *Renewable Energy*. 133 (2019) 930–940. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.090>.

[38] P. Cabrera, H. Lund, J.A. Carta, Smart renewable energy penetration strategies on islands: The case of Gran Canaria, *Energy*. 162 (2018) 421–443.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.020>.

[39] S. Suárez, Perspectives of marine renewable energies in the Canary Islands, in: *Las Palmas de Gran Canaria*, 2019. [http://www.een-canarias.org/wp-content/uploads/2019/05/1.-Perspectivas-de-las-EERR-marinas-en-Canarias\\_Salvador-Su%C3%A1rez.pdf](http://www.een-canarias.org/wp-content/uploads/2019/05/1.-Perspectivas-de-las-EERR-marinas-en-Canarias_Salvador-Su%C3%A1rez.pdf) (accessed October 22, 2020).

[40] V. Healey, L. Beshilas, K. Coney, G. Jackson, Energy Snapshot - Anguilla, (2020).  
<https://www.osti.gov/biblio/1659893>.

[41] V. Healey, L. Beshilas, K. Coney, G. Jackson, Energy Snapshot - Anguilla, (2020).  
<https://www.osti.gov/biblio/1659893>.

[42] Worldometer, Falkland Islands Electricity Statistics - Worldometer.  
<https://www.worldometers.info/electricity/falkland-islands-malvinas-electricity/> (accessed January 17, 2020).

[43] Falkland Islands Government, Census Report, (2016)  
[https://falklandstimeline.files.wordpress.com/2018/01/falkland\\_islands\\_census\\_2016\\_-\\_report\\_without\\_data\\_tables.pdf](https://falklandstimeline.files.wordpress.com/2018/01/falkland_islands_census_2016_-_report_without_data_tables.pdf) (accessed January 17, 2020).

[44] INE Cabo Verde, Anuario Estadístico Cabo Verde, (2015) [https://ine.cv/wp-content/uploads/2017/02/anuario-estadistico\\_cv-2015.pdf](https://ine.cv/wp-content/uploads/2017/02/anuario-estadistico_cv-2015.pdf) (accessed January 17, 2020)

[45] INE Cabo Verde, Estadísticas do Ambiente 2016, (2018). <http://ine.cv/wp-content/uploads/2018/06/estatisticas-do-ambiente-2016.pdf?noppphdjmopphdba> (accessed July 30, 2020).



## 5.3 Developing an insular energy isolation index: the case of Chile

### Developing an insular energy isolation index: the case of Chile

James Morales

Doctoral Program in Energies, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile.

Dante Figueroa

Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile.

#### **Introduction**

We live in an era where decision-makers face the overwhelming flux of available information that, in some cases, exceeds their processing capacities (Roetzel, 2019). This large amount of data implies the necessity of considering complicated synthesis and filtering processes, in order to obtain useful information. Composite indicators allow us to interpret the information by using a single figure, instead of identifying common trends across many separate indicators (Jin et al., 2021). On the other hand, composite indicators allow us to link to and communicate with different stakeholders that otherwise would not be reachable (Soto & Schuschny, 2009).

Generally speaking, the use of indicators -of any kind- has a long development, in very different disciplines, becoming a strong information decision makers (Singh et al., 2012), because they capture complex and multidimensional phenomena in a simple and understandable way (Saltelli, 2007). Similarly, Schuschny y Soto (2009), in their "Methodology guide for the design of composite indicators for sustainable development", remarks the use of indicators due to their synthesis capacity. This becomes of particular relevance when addressing the complex and multidimensional issue of energetic poverty. Several studies show how the access (or the lack of) energy services is critical for the social development of human populations (Pelz & Urpelainen, 2020; CEPAL, 2009). One of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) is to "ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all", particularly in the poorer countries (United Nations, 2021). Energy access gaps are tightly associated with isolation and/or to the territorial vulnerability of a human population (Calvo et al., 2020).

Liu et al (2018) define four criteria that determine if some geographic unit (not necessarily an island) can be considered as isolated: (i) appreciable distance to a large population centers; (ii) restricted access to a electric network; (iii) high dependency of imported fuels; (iv) transport difficulties (interconnectivity). In spite that other elements may be relevant to the definition of isolation, these four characteristics are easily recognizable in the case of islands, and at least two of them (ii and iii) are directly related to energy access gaps.

Several authors have indicated that the most critical aspects affecting the social and economical development of islands are related with availability of energy generation (or fuel dependence), potable water supply, treatment of residuos and the transport (Aguirre-Mendoza

et al., 2019; Chen et al., 2007; van Alphen et al., 2007). The islands are prominent cases of isolated areas, led by their inherent geographical characteristics (Morales et al., 2021) and therefore a natural vulnerability to energy isolation.

In this study we propose the Island Energy Isolation Index (IEII), that allows (i) to capture the level of energetic isolation that affects the insular communities, (ii) taking into account the multidimensionality of the situation, (iii) identifying common trends among the geographic units, and (iv) establishes a ranking based on the indicator. Concretely, we define the energy isolation as the “the lack of access to a set of energy sources and/or services, caused by the inherent territorial conditions of an island.”

This study consists of three main parts: Firstly, the selected sample of 58 Chilean islands is described; the indicator will be applied to this sample. Secondly, the antecedents conducting to the designing of the indicator are presented, plus the definition and weighing of its variables, and a robustness analysis for the indicator. Thirdly, the indicator is applied to the sample of 58 Chilean islands, and the results are analysed.

In the final part of this document the significance and limitations of the composite indicator are discussed, and some recommendations for its improvement are given.

## Materials and methods

### Study area

The document “Boletín Informativo: Territorio insular chileno”. Tipología, superficie y número de unidades” (Errázuriz & Rioseco, 1983) provides a working definition for “island”, and uses it for establishing the number of Chilean islands as at least 5900. Only some tens of them have permanent human settlements, however, mainly in the Región de los Lagos, in the southern part of the country.

For defining the set of islands that are considered in this study we use the QGIS Geographic Information System. All Chilean islands with permanent human settlements are considered, if they satisfy the following criteria:

- There is at least one medical center in the island
- There is at least one educational center (for example a school) in the island
- The island is under no special legal or administrative status (as is the case for Rapa Nui and Juan Fernandez archipelago)
- The island is not under military administration (as is the case for Quiriquina and Dawson islands)

Following these criteria, 58 islands were selected, all of them lying between Región del Biobío (36°46'22"S) and Región de Magallanes (41°28'18"S). Figure 1 shows the 58 islands.

In order to generate a database with information related to the selected islands, an exhaustive process of consultation with state agencies was carried out, regarding information on generation systems, capacity, energy consumption and imported fuel for electric generation. The information was received through “Portal Transparencia”, a Chilean State platform for

consulting public information ([www.portaltransparencia.cl](http://www.portaltransparencia.cl)). Additionally, from the 2017 Chilean census (INE, 2018), information regarding the inhabitants of each island, as well as their distribution in the respective geographic unit was collected.

Part of the information collected is shown in the Appendix.

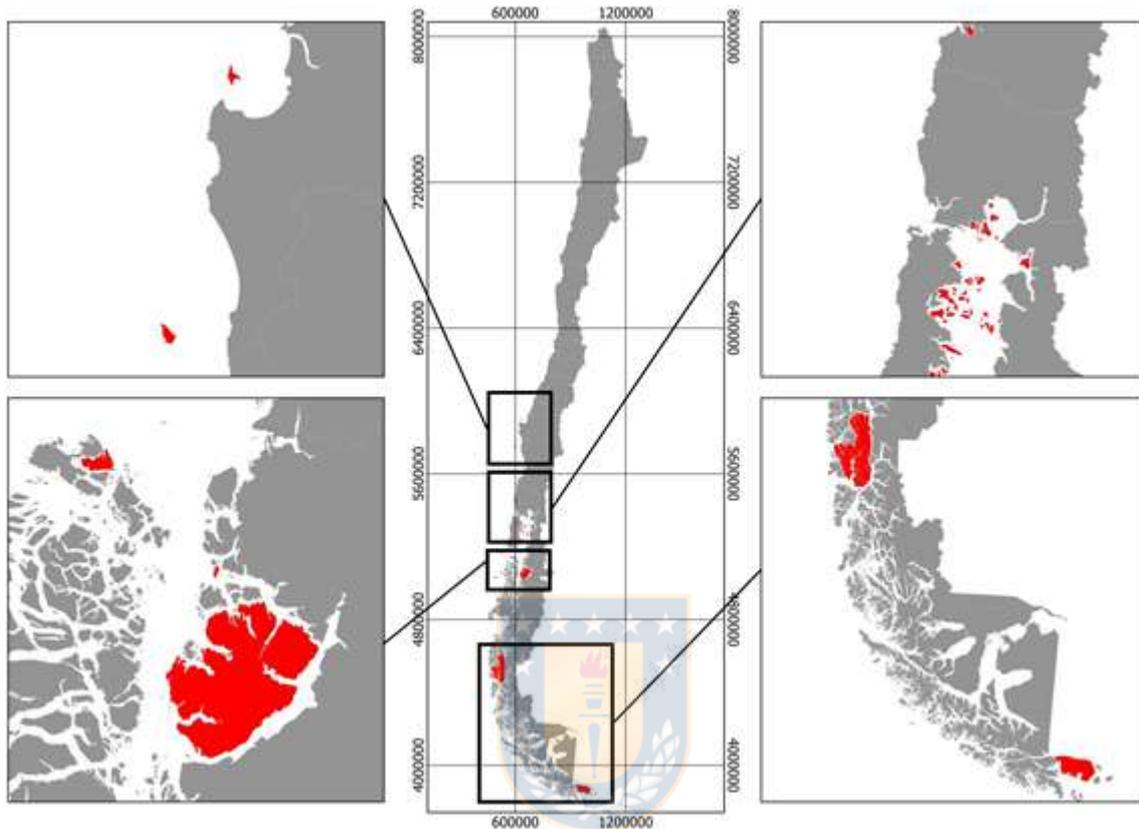


Figure 1. General map of the selected islands.

### Definition of the IEII variables

As it was previously specified, the elements that compose the index are multidimensional. Four general dimensions were considered:

- Electricity: involves the access to electric supply.
- Fuels: involves the access to fuels and the dependence of their importation for electrical generation.
- Territorial isolation: this considers structural (geographic) elements and access to basic services.
- Renewable potential: this considers the renewable energy potential, mainly wind and solar energy.

These categories are splitted in subcategories, where the indicators are introduced. The indicators are the variables that will be considered. A description of them follows:

- Territorial isolation (A1): This parameter is directly obtained from the territorial isolation index developed by the Departamento de Estudios y Evaluación de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo de Chile (Carvajal et al., 2012). In this study isolation is defined as:

$$\text{Isolation Index} = 2 \times \text{integration degree} - \text{structural geographic conditions}$$

where the integration degree considers indicators for access to educational and health services and providers of goods and services. The structural geographic conditions describe the distances (in travel hours) from the study location to urban or political centers. In this way the index may assume values from -1 to 2. The maximal possible isolation has the value -1, and 2 means the maximal possible integration. This indicator is applied to the geographic entity "location", that may consist of Urban Zones and/or Rural Zones. As it is possible that in an island several Urban Zones and several Rural Zones coexist, we calculated a weighted average for each island, where the weights are the populations of each Zone. The information on the population of the islands was obtained from the Chilean "Instituto Nacional de Estadísticas", INE (INE, 2018).

- Availability of liquid fuels (C1): This indicator describes the access of communities to distribution services of liquid fuels. Briano and Herrera (2018) classify this access in three categories: (i) Without access, (ii) with access but to prices over the national average, and (iii) with access, with a price equal or lower than the national average. Values of -1, 0, and 1 will be associated to these categories, respectively. As an island can have several communities, a weighted average is calculated, using the population of every community as the weight factor. In this form, the initial discret index for every community becomes a continuous one for islands.
- Availability of Liquefied Petroleum Gas (LPG) (C2): This indicator describes the availability of LPG in the insular communities. Applying the methodology of Briano and Herrera (2018) to our case leads to just two possibilities: with access to LPG, with a higher cost than the average value in Chile, or with access with a cost equal or lower than this average cost. The rationale of this methodology is to assume that some communities do not use this fuel just because its cost is much higher than alternative fuels, such as firewood, a resource very abundant in rural zones in the study area. In this way, for each community this indicator can assume just the values 0 or 1, with weighted values for islands with several communities.
- Availability of electricity (E1): This indicator describes the access to electric energy generated by a centralized network. This indicator assumes the values 0 and 1 for the cases without and with a centralized generation system. The value 1 is also used in the case that the island is interconnected with other electric systems. In this methodology, the own generation using mini Diesel generators is not considered "available electricity".

- Distance from the nearest electric substation (E2): The distribution of the electric energy in a zone depends on the existence of distribution substations along the country. The farther a community lies from a subsystem, higher is its energetic isolation. This information is obtained from geographic data of the national network and its substations provided by the Chilean “Comisión Nacional de Energía” (CNE, 2021). The unit of measure is km, from the nearest point of the island to the electric substation.
- Dependence on fuels for local electricity generation (E3): This index allows to quantify the degree of dependence of the islands on the fuel necessary for electric generation. The unit of measure is liters of fuel per capita, for an island as a whole.
- Wind speed (R1): A territory (island, in our case) with a low renewable energy potential can be considered more energetically isolated than other territory having a large renewable potential. This can be quantified taking into account some physical variable of the resource. The National Renewable Energy Laboratory (NREL), in the USA, uses a “wind classes” scale, determined by the mean wind power density on each territory. This scale can be obtained from the annual mean of the wind speed (Burdett and van Treuren, 2014). In the case of Chile, the necessary wind data can be obtained from the Explorador Eólico, of the Ministerio de Energía de Chile (MINENERGIA, 2021a).
- Horizontal global irradiance (R2): Similarly to the case of wind energy, Právělie et al.(2019) recommend a classification for the solar energy potential, based on an annual average of the horizontal global irradiance. In the case of Chile, this information can be obtained from the Explorador Solar, of the Ministerio de Energía de Chile (MINENERGIA, 2021b).

## Composite Indicator Design

The aim of the composite indicator is to have a simple, unidimensional representation of a multidimensional problem. This indicator can be qualitative or quantitative.

El método escogido para la construcción del índice de aislamiento tomará como base la metodología presentada en “Handbook on Constructing Composite Indicator” elaborado por la Organización para Cooperación y Desarrollo Económicos (OECD, 2008), junto con “Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible”, elaborado por (Soto & Schuschny, 2009) , para la CEPAL.

The design of the IEII follows the methodology presented in “Handbook on Constructing Composite Indicator”, from the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, 2008), and the “Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible” (Soto and Schuschny, 2009) for CEPAL.

Composite indicators, whose definition is somehow subjective, have to be confronted with the opinion of specialists of its area. This means that their design has to consider several methodological elements, such as selection of the relevant data, imputation of the missing

values, normalization of the variables (as often their units of measure are different), weighting of the indicators, uncertainty analysis, and an adequate visualization of the results.

### **Weighting of the variables**

After the selection of the variables and the definition of the methodology for the data selection, the weighting of the variables of the indicator is to be done, one of the most critical steps of the indicator's design. After the comparison of several methodologies for this process, participative weighting methods, also known as "budget allocation processes" (BAP) were selected. In these processes, experts of several thematic areas are asked to provide some amount of "points" to the variables set that conform the composed indicator.

In order to carry out this process a survey based on Delphi methodology will be presented to the experts. All experts are invited to answer several questions, in an iterative process oriented to a convergence of the different criteria (Reguant-Álvarez & Torrado-Fonseca, 2016). Each process step has to be analyzed and presented to the experts, in such a way that the learning of one iteration will be used as input in the next one.

It should be mentioned that other weighting methods exist, which are more statistical in their formulation. In our case, however, we are applying the indicator to a particular sample of islands. That means that using a statistical methodology would introduce some difficulties when applied to other, distinct samples of territorial units. Hence, the weighting based on experts' criteria is not only simple, but also necessary.

### **Robustness analysis**

As the design of a composite indicator implies some subjective decisional elements, such as the definition of the variables and their weighting, it is necessary to analyze the robustness of these assumptions. A sensitivity analysis has to be done, in order to evaluate how the final result is associated with the different variabilities of the assumptions. In other words, the idea is to quantify how the indicator depends on the variables that conform it (OECD, 2008). Combining analysis of uncertainty and sensibility can help to determine the robustness of the indicator.

In our case, the uncertainty will be evaluated taking into account three uncertainty factors for the IEAI generation:

1. Normalization
2. Selection of the indicators
3. Weighting by the experts

### **Selection of the normalization method**

Generally speaking, the variables that compose a composite indicator have different units of measure, not comparable from each other (for example km, \$, liters, etc). This is the reason why a normalization of the variables is necessary before the variables' aggregation process.

The idea is to avoid artificial results that arise just because of scale issues (Soto & Schuschny, 2009). Some normalization methods are:

### Standardization (or z-scores)

For each variable it is possible to compute the mean and standard deviation over the sample units (islands). In this way, for each individual indicator  $x_{qi}$  (with  $x_{qi}$  the value of the indicator  $q$ , for the island  $i$ ), the average across the islands (in our case)  $\bar{x}_{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{qi}$  and the standard deviation across islands  $\sigma_{q} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{qi} - \bar{x}_{q})^2}$  are calculated. The normalisation formula is:

$$I_{qi} = \frac{x_{qi} - \bar{x}_{q}}{\sigma_{q}}$$

so that all  $I_{qi}$  have similar dispersion across islands.

### Rescaling (or min-max)

In this case the maximal range of the values that each variable can assume is considered. The objective is to transform the values of the variables to the range [0,1]. Each indicator  $x_{qi}$  for a generic island  $i$  is transformed in:

$$I_{qi} = \frac{x_{qi} - \min_i(x_q)}{\max_i(x_q) - \min_i(x_q)}$$

$\min_i(x_q)$  y  $\max_i(x_q)$  are the minimum and maximum values for each indicator  $q$ , for all islands.

The calculation of the composite indicator will be carried out by linear aggregation of the weighted sum of the normalized values obtained, as follow:

$$CI_i = \sum_q^Q w_q I_{qi}$$

$CI_i$  is the composite indicator IEI for each island, and  $0 < w_q < 1$ .

The output variable to analyse in the uncertainty and sensitivity analysis will be  $Y = Rank(CI_i)$ , the rank of the island  $i$  regarding the ordered values of the composite indicator  $CI_i$ .

The analysis will be conducted by a simple Monte Carlo experiment, in order to explore all the uncertainty sources simultaneously and to capture all possible interrelation effects of the input factors.

### Uncertainty analysis

Each variability factor will be called  $X_k$ , with  $k = 1,2,3$ , because three factors will be evaluated: the weighting scheme, the normalization method, and inclusion/exclusion of one indicator at a time. Then, for each variability factor a discrete random variable will be associated, in order to perform tests of possible alternatives through an experiment that uses a Monte-Carlo schema. In this way,  $X_1 = normalisation$  will assume values following the standardisation or rescaling methods;  $X_2 = weighting\ scheme$  will vary depending on the weightings defined by

each expert, and  $X_3 = inclusion/exclusion$  will exclude one of the eight indicator's variables per time, the remaining weightings being proportionally redistributed.

Be  $\zeta \in [0,1]$  a random number that will determine which option, for each factor, will be considered in every iteration. If  $m$  are respective options for each factor, the probability that some option be chosen is determined by

$\zeta$	$X_k$
Si $\zeta \in [0, \frac{1}{m})$	$X_k = Opción 1$
Si $\zeta \in [\frac{1}{m}, \frac{2}{m})$	$X_k = Opción 2$
...	...
Si $\zeta \in [\frac{m-1}{m}, 1)$	$X_k = Opción m$

As only three variability factors will be evaluated, every Monte Carlo iteration has to consider three random numbers, in this case chosen from an uniform probability function.

Ten thousand iterations will be carried out for the Monte Carlo experiment. In each case a final result  $Y = Rank(CI_i)$  will be obtained. The results will be evaluated together in order to determine the uncertainty degree of the island ranking, based on the chosen variability factors.



### Sensitivity analysis

The sensitivity analysis will be based on the use of the variance, both independently for each variability factor as for the interactions that may arise among the variability factors. In this way, the variance associated to the sensitivity of the model (i.e. the output value of  $Y = Rank(CI_i)$ ) is determined as

$$V_k = V_{X_k}(E_{X_{-k}}(Y|X_k))$$

This equation indicates that the factor  $X_k$  will be fixed and will assume a specified value  $x_k^*$ . Then the mean of the output variable  $Y$  is calculated considering all other factors (but without the fixed one,  $x_k^*$ ). If  $V_k$  results zero, it means that the factor  $X_k$  does not contribute to the value of  $Y$ . This approach can be extended to all factors, in all the possible combinations.

Finally, a sensitivity indicator can be calculated as

$$S_k = \frac{V_{X_k}(E_{X_{-k}}(Y|X_k))}{V(Y)} = \frac{V_k}{V(Y)}$$

More information about the calculations may be found in OECD, (2008) It should be noted that the expression  $S_k$  allows to obtain just the "first order" sensitivity, i.e. assuming that there is no interaction among the factors and that, if the contribution of all factors to the total variance

is added, the result would be 1. As, in general, this does not occur, some approximation has to be used. In this study we use the approximation of Saltelli (2002), as is described in OECD, (2008). The final form, that considers both first and higher orders due to interactions among the values assumed by the variability factors is

$$S_{Tk} = \frac{V(Y) - V_{X_{-k}}(E_{X_k}(Y|X_{-k}))}{V(Y)} = \frac{E_{X_{-k}}(V_{X_k}(Y|X_{-k}))}{V(Y)}$$

### Reference parameterization

As mentioned, for the design of the IEII we will focus on three uncertainty sources: the weighting scheme, the normalisation method, and the inclusion/exclusion of one indicator at the time. Por carrying out the sensitivity and uncertainty analyses, however, it is necessary to establish reference parameters that allow to evaluate the robustness of the model. Here the reference values for the uncertainty will be:

- For the weighting scheme, the average of the weightings by the experts, obtained with the Delphi survey method, will be used.
- The normalization method will use rescaling.
- The IEII will be evaluated excluding one indicator at a time, and redistributing the weightings, if corresponds.



## Results

### Results of the Delphi survey

La consulta tuvo dos iteraciones y permitieron obtener la apreciación de los expertos respecto de la prioridad que debieran tener cada uno de los indicadores que forman el índice. En la Tabla 2 se aprecian los resultados finales del proceso de consulta.

The Delphi survey was carried out through a survey to 7 experts, all associated with disciplines related to energy. We will not provide the identification of the experts, but their expertise disciplines: Environmental sciences, engineering sciences, anthropology, sociology and geography. The process consisted of two rounds, and its results can be seen in Table 1.

Table 1. Answers of the 7 experts to the Delphi survey

Indicator	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Expert 6	Expert 7	Mean
E1	20	10	15	20	15	30	15	17.9
E2	10	5	10	10	10	10	10	9.3
E3	3	10	10	5	10	2	10	7.1
C1	5	10	10	10	25	5	5	10.0
C2	2	10	10	5	5	8	10	7.1
A1	40	25	30	20	20	10	35	25.7
R1	7	15	7.5	15	10	25	7.5	12.4
R2	13	15	7.5	15	5	10	7.5	10.4

### Sensitivity analysis results

Figure 2 shows the uncertainty analysis applied to the islands ranking, taking as a base one reference configuration for the IEII. The islands are sorted following their ranking obtained with this configuration. The boxplot schema allows to assess the uncertainty degree in the ranking, after 10000 iterations with the Monte Carlo procedure. The red horizontal lines show the median of each island, and the superior and inferior limits of each box indicate the 5th and 95th percentile, respectively. The ends of the dashed lines indicate the minimum and maximum values for each island.

It is observed that islands lying near both extremes of the ranking tend to maintain their position in the ranking, independently of the parameters that are kept constant in the composite indicator. Quihua, for example, shows a variation of just 1 position, always remaining in the first or second position of the ranking. A similar case is observed in the case of Queullín, but on the last positions of the ranking. If, generally speaking, the median of the islands in the ranking tends to coincide with the reference ranking, it is remarkable what occurs with the islands in intermediate positions of the ranking. Las Huichas, Coldita, or Magdalena,

for example, show a large variability, which means that the factors selection can significantly affect the position of the islands in the ranking.

In order to quantify the effect of considering some specific parameter in the indicator's design, it is necessary to analyze the explained variance of each factor of the indicator, and how they determine its position in the islands' ranking. Figure 3 shows the first order variance explained by each factor. It is observed that a large part of the variance is associated to non-additive effects, i.e. to the interaction itself of the factors that conform the indicator. A possible explanation of this result is that the variables that conform the index may be correlated, in which case the same characteristic would be represented in several indicators, with a feedback effect on the final result. In fact, Figure 4 shows that, on average, about 80% of the variance is not explained by the first order sensitivity. Some cases with much lower percentages are Chelín and Coldita islands, where this variance decreases to 50% and 40%, respectively.

Finally Figure 5 shows the total effect of the variance, including the proper interactions of the factors that determine the composite indicator. It is observed that the addition of the variance is larger than 1, pointing out a strong interaction effect.



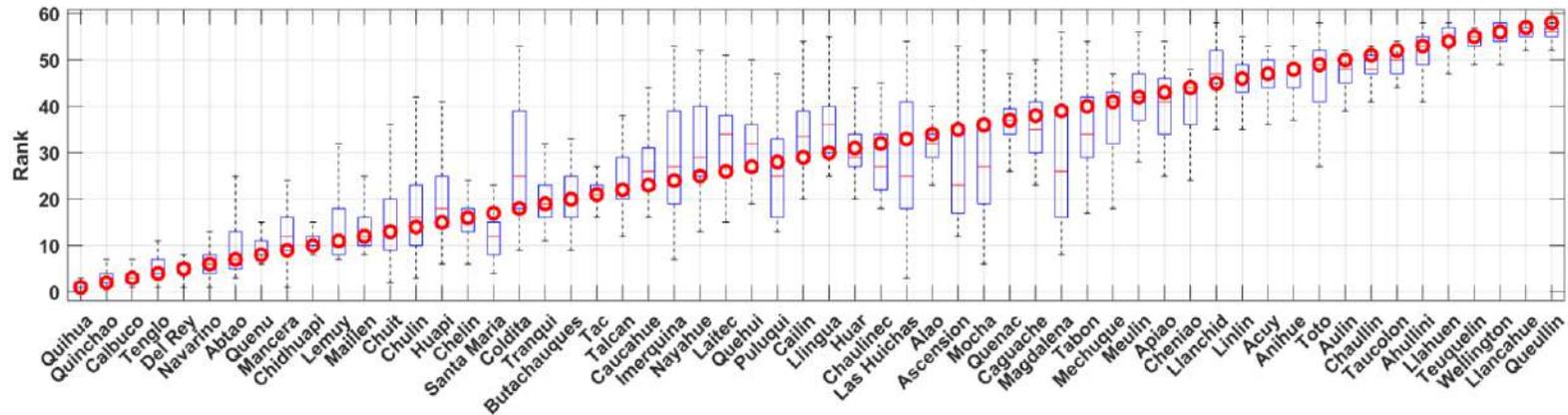


Figure 2. The boxplot shows the island ranking according to a reference setting of IEII (red circle), with median (red line) and the corresponding 5th and 95th percentiles (box limits). Outliers are marked as red crosses. The uncertainty input factors were normalization method, inclusion/exclusion of an individual indicator, and weighting scheme. The islands are ordered according to the reference setting of IEII.

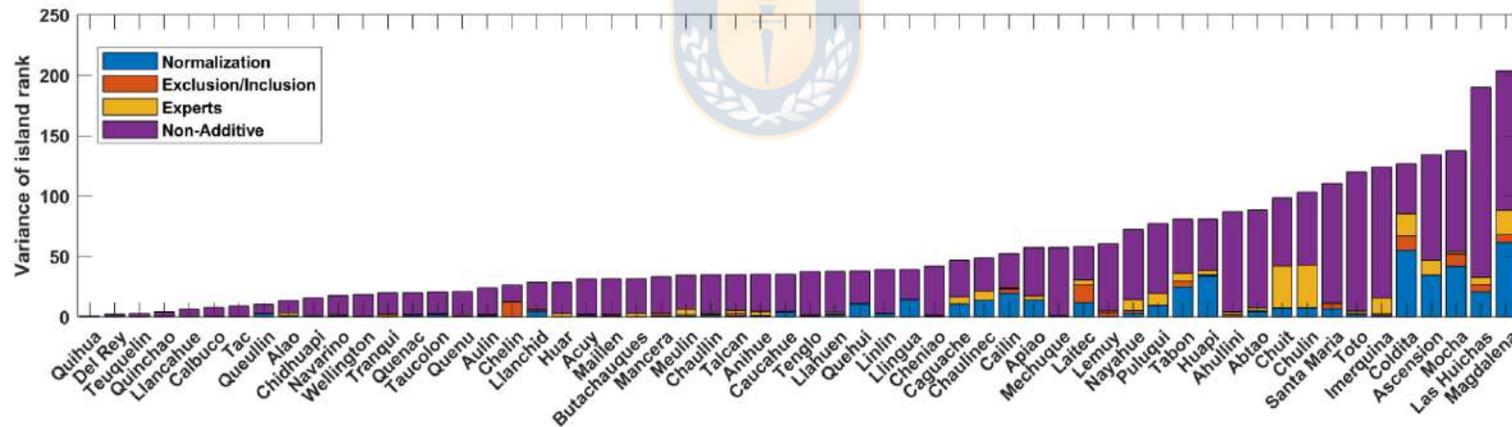


Figure 3. Results based on first-order indices. Decomposition of islands variance according to the first-order conditional variances. Non-additive, Experts and Normalization, are the most influential input factors. The part of the variance that is not explained by the first-order indices is noted as non-additive. Islands are ordered in ascending order of total variance.

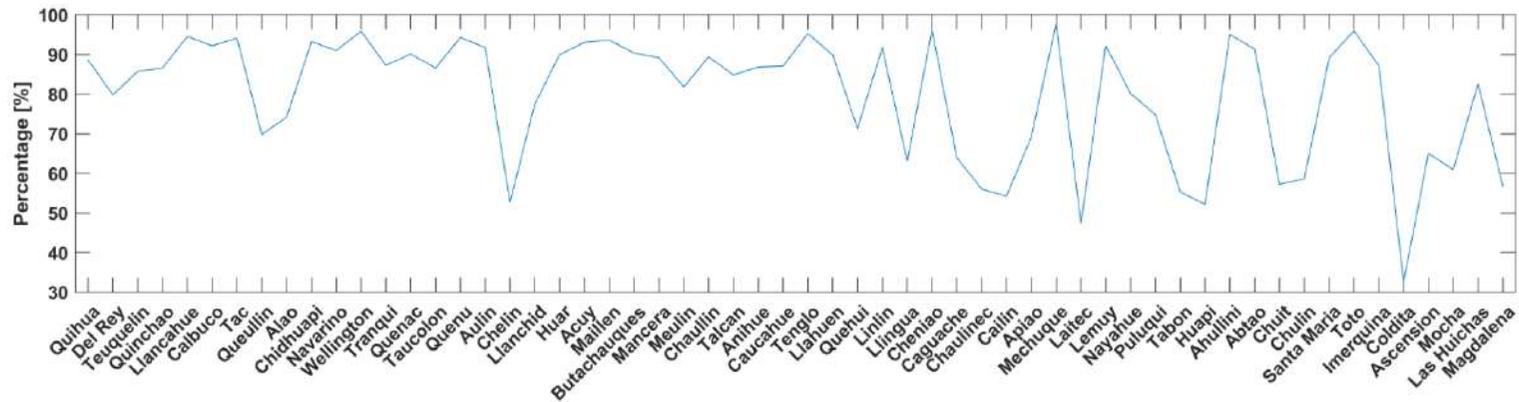


Figure 4. Percentage of variance not explained by first order sensitivity index.

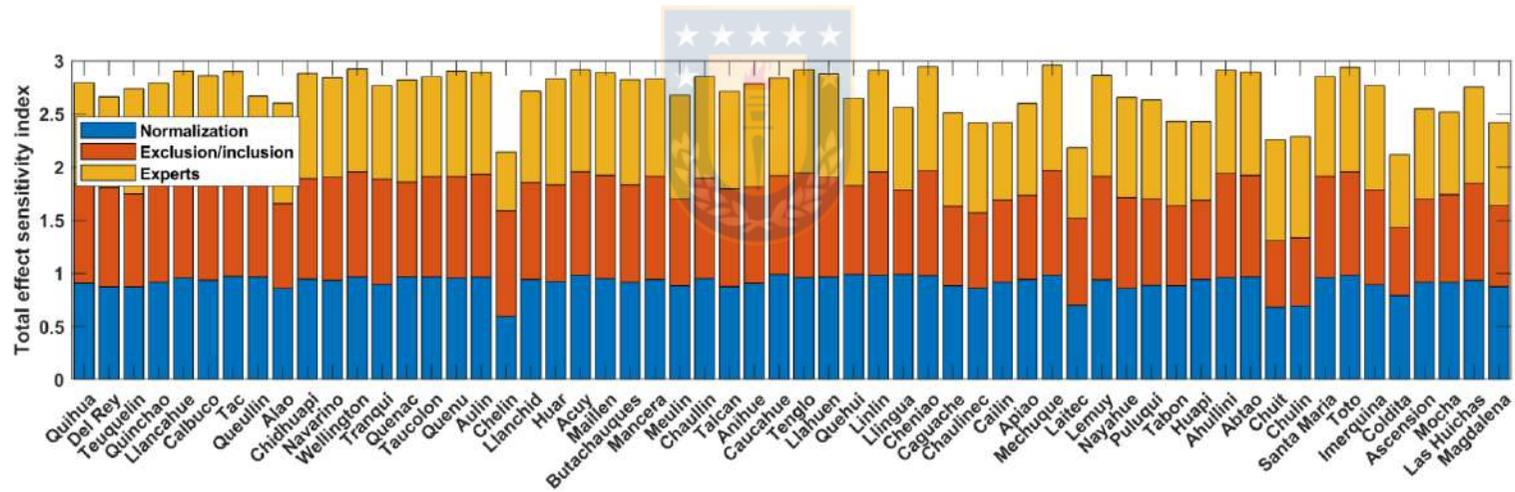


Figure 5. Total effect sensitivity indices for the variance of each island rank. The total effect sensitivity indices concentrate on one single term for all the interactions involving each input factor. The indices add up to a number greater than 1 due to the interactions which seem to exist among the identified influential factors.

## Calculation of the IEII

Figure 6 shows the result of the Island Energy Isolation Index for 58 populated Chilean islands. Lower values indicate a higher degree of energetic isolation, whereas green tones indicate a larger access to energetic services and a lesser effect of territorial isolation. Table 2 lists the index values for each island.

The index values indicate that islands lying near to the eastern border of Chiloé and south of Puerto Montt have the largest IEII values. On the other hand, islands in the internal zone of the Mar Interior de Chiloé have values smaller than 0.50. Other cases, such as Llanquid, Llancahué and Llanquén, in spite of lying near to the western coast of the commune of Hualaihué and Chaitén, have values in the range 0.22-0.29. This could be caused by a small population density compared to Chiloé and to Puerto Montt.

Islands lying further to the south of Chile (boxes C and D, Figure X) show index values particularly small, with the exception of Navarino, on the southernmost part of the country. Even though these cases are very near to the continent, these Chilean zones are particularly isolated, in such a way that indicators such as “territorial isolation”, “distance to a substation” and “dependence of fuels for generation” strongly penalize the IEII. Navarino island is an exception, because, as the southernmost permanently populated territory of Chile, has a particular political and strategic importance, forcing the Chilean authorities to provide access to energetic services there.

Table 2. Calculated IEII for Chilean islands and the corresponding ranking

Rank	Island	IEII	Rank	Island	IEII	Rank	Island	IEII
1	Quihua	0.76	21	Tac	0.52	41	Mechuque	0.43
2	Quinchao	0.74	22	Talcan	0.51	42	Meulín	0.42
3	Calbuco	0.71	23	Caucahue	0.51	43	Apiao	0.42
4	Tenglo	0.68	24	Imerquiña	0.50	44	Chenio	0.41
5	Del Rey	0.67	25	Nayahue	0.49	45	Llanquid	0.40
6	Navarino	0.65	26	Laitec	0.49	46	Linlín	0.40
7	Abtao	0.59	27	Quehui	0.49	47	Acuy	0.39
8	Quenu	0.58	28	Puluqui	0.49	48	Añihue	0.39
9	Mancera	0.58	29	Cailín	0.49	49	Toto	0.39
10	Chidhuapi	0.58	30	Llingua	0.48	50	Aulin	0.39
11	Lemuy	0.57	31	Huar	0.48	51	Chauillín	0.39
12	Maillén	0.57	32	Chaulinec	0.47	52	Taucolón	0.38
13	Chuit	0.57	33	Huichas	0.47	53	Ahullini	0.31

<b>14</b>	Chulín	0.57	<b>34</b>	Alao	0.47	<b>54</b>	Llahuen	0.29
<b>15</b>	Huapi	0.56	<b>35</b>	Ascensión	0.46	<b>55</b>	Teuquelín	0.28
<b>16</b>	Chelín	0.55	<b>36</b>	Mocha	0.45	<b>56</b>	Wellington	0.26
<b>17</b>	Santa María	0.55	<b>37</b>	Quenac	0.44	<b>57</b>	Llancahué	0.25
<b>18</b>	Coldita	0.53	<b>38</b>	Caguache	0.44	<b>58</b>	Queullín	0.22
<b>19</b>	Tranqui	0.53	<b>39</b>	Magdalena	0.43			
<b>20</b>	Butachauques	0.52	<b>40</b>	Tabón	0.43			



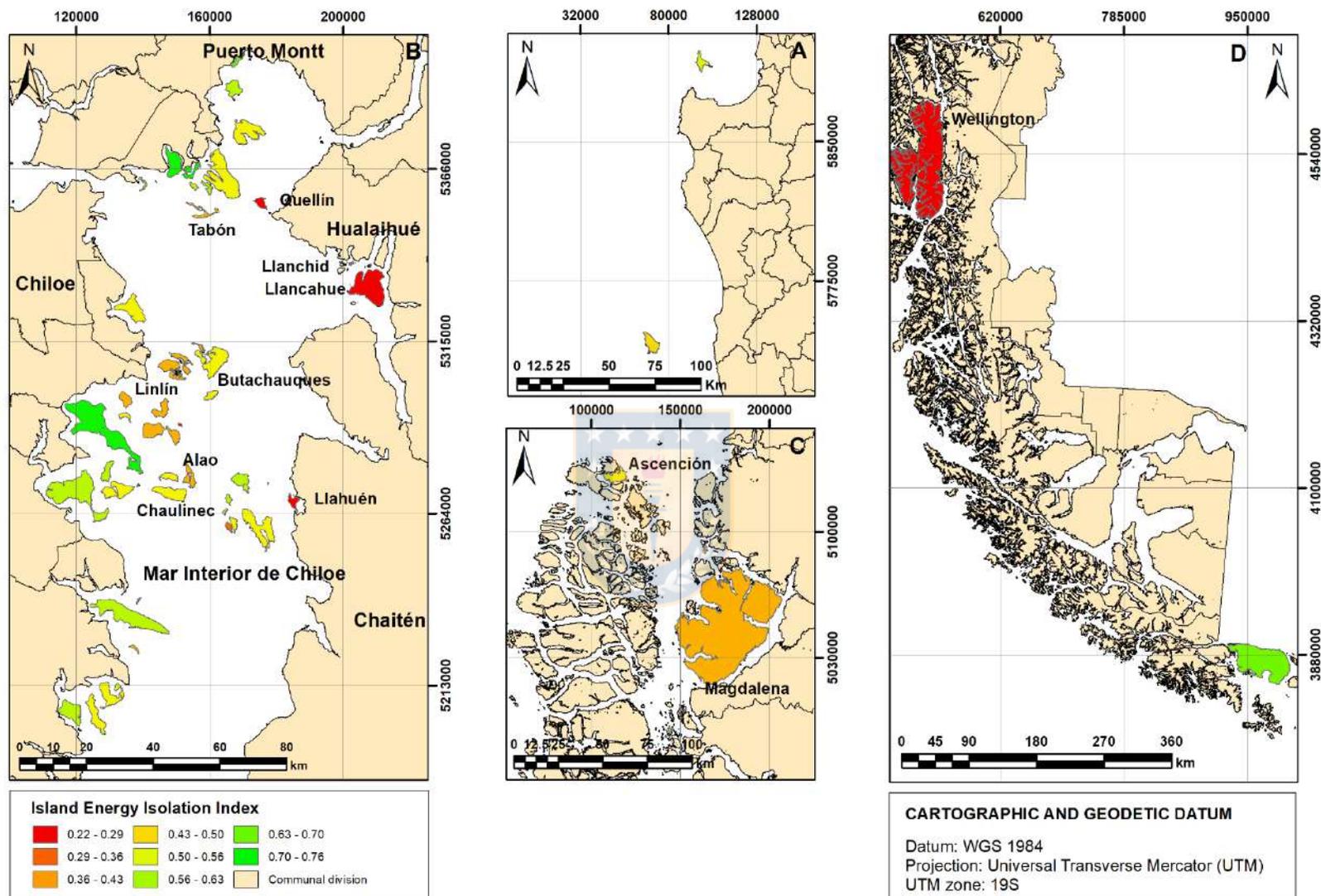


Figure 6. Calculated Island Energy Isolation Index for 58 Chilean islands. The latitudinal limits of the boxes are: **A** ( 36°51'14"S 73°30'34"W - 38°35'39"S 73°45'13"W), **B** ( 41°26'16"S 72°46'11"O - 43°20'16"S 73°17'56"W), **C** ( 43°39'36"S 73°28'32"W - 45°24'19"S 73°42'12"W), **D** ( 48°22'26"S 74°26'11"W - 55°50'07"S 67°11'38"W)

## Discussion and limitations

The information represented by the IEII is of particular interest for the development of integration and electrification policies of isolated zones, identifying those territorial units that present a larger shortage in the access to energetic services. Decision makers can use this instrument as a relevant input for the optimization of the distribution of available resources, for diminishing the effect of territorial conditions that are intrinsic to insular units.

The results indicate that the presented model has a lack of the robustness necessary for an adequate use. The sensitivity analysis shows a strong uncertainty component, respect to the parameters that determine the index. Some elements that could be conditioning the index are:

- High correlation among the variables: In order to consider several approaches that may describe the energetic isolation level of islands, a number of indicators were considered, which could possibly be related. In such a case, it may occur that the same characteristic contributes to two or more indicators, multiplying its effect in the final index value (and also its position in the island ranking). Corresponds, then, to revise the indicators that conform the index, and maintain just the ones presenting the smaller interrelation, ideally without eliminating any of the four proposed categories. This process could be carried out in association with the survey to the experts, in order to improve the index architecture.
- Agreement of the experts' criteria: One result of the Delphi process was the high disparity of criteria among the consulted experts. For example, even if the weighting average for the seven experts for the indicator Territorial Isolation was 0.257, the standard deviation of the sample was 0.102, which shows a large degree of disagreement on the criteria. Given the differences of the importance of each indicator, to choose one or another weighting can determine important differences. In order to avoid this effect, it is necessary to improve the query Delhi process, involving the experts already from the initial steps of the design, and carrying out a larger number of iterations of the survey processes in order to obtain a convergent opinion concerning the weighting.
- To analyze the interactive effect of the factors for the cases of islands having larger uncertainties. This can be done analysing the effect that a couple of fixed factors have on the index value (and on the ranking) for some island. In this way it could be possible to verify if the variability of the result is caused by a factor or by one of the options in this factor. In the second case these elements should be removed from the ones available for evaluating the model.

## Conclusions

In this study the design for an index has been proposed, in order to quantify the lack of access to energetic sources and services, taking into account the territorial conditions intrinsic to islands. A sample of 58 Chilean islands was evaluated and then was classified after its isolation degree.

The Island Energy Isolation Index included multidimensional elements, which can represent the islands' condition, in terms of access to electricity and to fuels, of territorial isolation, and of renewable energy potential.

A step of the process considered the recollection of opinions from experts belonging to different disciplines, in order to discuss the weighting for the indicator's variables. Although this process allowed us to obtain an average weighting -used as reference for the subsequent sensibility and uncertainty analysis- the experts' criteria were not convergent for all the variables, which will force us to include more iterations of the survey process, in order to obtain a larger degree of agreement.

The calculated values of the IEII allowed us to identify groups of islands having common characteristics. For example, high values of IEII were associated with islands near to the eastern coast of Chiloé, but those concentrated in the Mar Interior de Chile showed significantly lower values. These antecedents are particularly useful for decision takers, for issues related to public policies for development of isolated zones.

Finally, it is important to emphasize that the uncertainty and the sensibility analysis of the IEII show that this indicator is not robust enough. The factors that conform the indicator have a large level of interaction among themselves, which implies that the decisional contribution of one parameter on another could be enhanced, affecting the island ranking and the conclusions derived by these results. One recommendation is to involve the experts already during the first stages of the process, in order to guarantee a stronger architecture for IEII, and to have a high level of agreement during the weighting stage.

## Appendix

Table 3. Data from studies islands

Island	Inhabitants	Imported fuels [L] for electric generation	Location
Abtao	268	-	41°47'43"S 73°17'55"W
Acuy	51	17759	42°55'17"S 73°25'41"W
Ahullini	40	-	42°44'23"S 73°04'57"W
Alao	293	82502	42°35'42"S 73°17'35"W
Añihue	161	34000	42°20'07"S 73°14'47"W
Apiao	621	53950	42°36'15"S 73°12'41"W
Ascensión	1454	527238	43°53'00"S 73°44'00"W
Aulin	76	26400	42°15'25"S 73°09'35"W
Butachauques	506	84000	42°17'37"S 73°06'00"W
Caguache	309	47526	42°30'02"S 73°16'08"W

Cailín	220	73820	43°09'25"S 73°34'08"W
Calbuco	9460	-	41°46'35"S 73°08'13"W
Caucahue	355	-	42°07'48"S 73°23'04"W
Chaulinec	151	55450	42°38'21"S 73°18'35"W
Chaulín	69	18650	43°02'35"S 73°26'58"W
Chelín	143	29340	42°34'48"S 73°30'15"W
Cheniao	91	57700	42°19'03"S 73°15'20"W
Chidhuapi	316	-	41°50'22"S 73°05'44"W
Chuit	93	16500	42°39'55"S 73°04'47"W
Chulín	89	17200	42°36'58"S 73°01'48"W
Coldita	101	18940	43°11'59"S 73°42'41"W
Del Rey	444	-	39°54'33"S 73°17'05"W
Huapi	292	-	40°13'33"S 72°22'44"W
Huar	988	-	41°41'26"S 72°57'25"W
Imerquiña	12	2880	42°41'46"S 73°05'38"W
Laitec	309	55450	43°12'54"S 73°36'38"W
Las Huichas	838	-	45°08'45"S 73°31'11"W
Lemuy	3739	-	42°38'37"S 73°38'52"W
Linlín	379	92594	42°23'28"S 73°25'48"W
Llahuen	25	0	42°40'29"S 72°51'28"W
Llancahué	84	0	42°07'31"S 72°32'15"W
Llanchid	34	4320	42°03'31"S 72°37'01"W
Llingua	250	45850	42°25'43"S 73°26'40"W
Magdalena	65	43200	44°33'39"S 73°05'43"W
Maillén	929	-	41°34'21"S 72°59'24"W
Mancera	41	-	39°53'29"S 73°23'32"W
Mechuque	302	76400	42°18'07"S 73°16'17"W
Meulín	488	62490	42°25'15"S 73°18'36"W
Mocha	406	65000	38°22'15"S 73°54'51"W
Navarino	55	-	55°05'00"S 67°40'00"W
Nayahue	64	15300	42°43'53"S 73°03'49"W
Puluqui	2302	-	41°48'29"S 73° 2'24"W
Quehui	608	85650	42°36'59"S 73°30'01"W
Quenac	312	50800	42°27'00"S 73°27'18"W
Quenu	124	20400	41°49'37"S 73°09'02"W
Queullín	157	0	41°52'50"S 72°54'49"W
Quihua	1807	-	41°45'36"S 73°13'00"W
Quinchao	7889	-	42°28'06"S 73°30'51"W
Santa María	1173	311440	37°03'00"S 73°31'00"W
Tabón	374	47600	41°54'29"S 73°06'48"W
Tac	182	25855	42°23'10"S 73°07'26"W
Talcan	113	16080	42°42'19"S 73°01'14"W
Taucolón	42	21000	42°18'59"S 73°12'42"W
Tenglo	1359	-	41°29'54"S 72°58'22"W
Teuquelin	32	18935	42°27'41"S 73°14'42"W
Toto	130	42391	44°15'39"S 73°12'35"W
Tranqui	161	-	42°57'50"S 73°28'03"W
Wellington	100	117965	49°22'00"S 74°55'00"W

## References

- Aguirre-Mendoza, A. M., Díaz-Mendoza, C., & Pasqualino, J. (2019). Renewable energy potential analysis in non-interconnected islands. Case study: Isla Grande, Corales del Rosario Archipelago, Colombia. *Ecological Engineering*, 130, 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.020>
- Briano, V., & Herrera, R. (2018). *Evaluación del Acceso a Combustibles Líquidos y Gas Licuado en Zonas Aisladas del País* (Informe Final ID-584105-61-LE17). Ministerio de Energía.
- Burdett, T. A., & Van Treuren, K. W. (2014). Small-Scale Wind Turbines Optimized for Class 2 Wind: A Wind Siting Survey and Annual Energy Production Analysis. *Volume 3B: Oil and Gas Applications; Organic Rankine Cycle Power Systems; Supercritical CO2 Power Cycles; Wind Energy*, V03BT46A023. <https://doi.org/10.1115/GT2014-26243>
- Calvo, R., Amigo, C., Billi, M., Fleischmann, M., & Urquiza, A. (2020). *Vulnerabilidad energética territorial: Desigualdad más allá del hogar* (Documento de trabajo N.º 8). RedPE. [www.pobrezaenergetica.cl](http://www.pobrezaenergetica.cl)
- Carvajal, L., Poch, M., & Osorio, R. (2012). *Estudio Indentificación Localidades en Condiciones de Aislamiento 2012* (p. 242). SUBDERE. [http://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/zonas\\_aisladas2.pdf](http://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/zonas_aisladas2.pdf)
- CEPAL. (2009). *Contribución de los servicios energéticos a los Objetivos de Desarrollo del Milenio y la mitigación de la pobreza en América Latina y el Caribe* (p. 82). CEPAL. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3720/1/S2007029\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3720/1/S2007029_es.pdf)
- Chen, F., Duić, N., Manuel Alves, L., & da Graça Carvalho, M. (2007). Renewislands—Renewable energy solutions for islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1888-1902. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.009>
- CNE. (2021). *Geo Portal CNE*. Energía Maps. <https://energiamaps.cne.cl/>
- Errázuriz, A. M., & Rioseco, R. (1983). *Las Islas de Chile* (Territorio Insular Chileno. Tipología, superficie y número de unidades). Instituto de Geografía, Pontificia

Universidad Católica de Chile.

INE. (2018). *Censo 2017*. Entrega Final Censo 2017. <https://www.censo2017.cl/>

Jin, S., Zhang, Y., Wang, K., Zheng, C., & Song, L. (2021). Global environmental changes slow down the pace of globalization highlighted by a new composite indicator.

*Journal of Cleaner Production*, 318, 128538.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128538>

MINENERGIA. (2021a). *Explorador Eólico*. Explorador Eólico.

<http://eolico.minenergia.cl/inicio>

MINENERGIA. (2021b). *Explorador Solar*. Explorador Solar.

<https://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>

Morales, J., Figueroa, D., & Vergara, L. (2021). Optimisation of hybrid renewable energy systems on islands: A review. *Island Studies Journal*, 22.

<https://doi.org/10.24043/isj.167>

OECD (Ed.). (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD.

Pelz, S., & Urpelainen, J. (2020). Measuring and explaining household access to electrical energy services: Evidence from rural northern India. *Energy Policy*, 145, 111782.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111782>

Präválie, R., Patriche, C., & Bandoc, G. (2019). Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach. *Journal of Cleaner Production*, 209, 692-721.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.239>

Reguant-Álvarez, M., & Torrado-Fonseca, M. (2016). 14631-Text de l'article-28704-1-10-20160107.pdf. *Revista d'innovació i Recerca en Educació*, 9(1), 87-102.

Roetzel, P. G. (2019). Information overload in the information age: A review of the literature from business administration, business psychology, and related disciplines with a bibliometric approach and framework development. *Business Research*, 12(2), 479-522.

<https://doi.org/10.1007/s40685-018-0069-z>

Saltelli, A. (2002). Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices.

*Computer Physics Communications*, 145(2), 280-297. [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(02\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(02)00280-1)

Saltelli, A. (2007). Composite Indicators between Analysis and Advocacy. *Social Indicators Research*, 81(1), 65-77. <https://doi.org/10.1007/s11205-006-0024-9>

Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 15(1), 281-299. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>

Soto, H., & Schuschny, A. R. (2009). *Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible*.

United Nations. (2021). *Sustainable Development Goals*. United Nations Sustainable Development. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>

van Alphen, K., van Sark, W. G. J. H. M., & Hekkert, M. P. (2007). Renewable energy technologies in the Maldives—Determining the potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1650-1674. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.02.001>



## 6 Discusión

### **Optimización energética híbrida en islas**

A pesar de que se evidenció la idoneidad del uso de sistemas de generación híbridos, es importante señalar que no existe una metodología estándar o simple para abordar el problema. Uno de los elementos revisado, con menos antecedentes de respaldo, es el perfil de carga de las islas. En general esta información no se encuentra disponible, porque no existen las herramientas tecnológicas que permitan llevar el seguimiento en zonas aisladas. Algunos estudios han demostrado que los perfiles de consumo, al menos en términos de la “forma” de la curva, entre zonas urbanas y rurales no presentan tantas discrepancias, por lo que sería posible asignar un perfil de consumo típico a una unidad de consumo en una isla. Esto último sería una aproximación del tipo bottom-up, que luego podría escalarse hasta alcanzar algún proxy de la demanda anual. Por ejemplo, en la tesis desarrollada por Aziares, (2018) se comparó el consumo de un perfil de demanda conocido para una comunidad pesquera en isla Sandwip en Bangladesh (Bala & Siddique, 2009), con una curva de carga típica para un día de invierno en Santiago (Celedón & Cortez, s. f.), verificando que, guardando las proporciones de magnitud entre ambos perfiles de carga, su variabilidad diaria era muy similar. El enfoque bottom-up permitiría luego escalar el consumo hacia el resto de los habitantes de las islas (siempre considerando que los consumos comerciales, industrial y públicos quedarían igualmente representados por esta curva). En caso de no contar con información relativa al consumo eléctrico anual, podría utilizarse información relacionada con el combustible utilizado por el generador, junto con las características del generador, para contar con una aproximación que permita escalar el cálculo.

Otro elemento para considerar, orientado a mejorar la calidad del proceso de optimización, es caracterizar a la población de la isla. Esta caracterización podría incluir, por ejemplo, información de los tipos de consumo presentes en la isla (residencial, industrial, comercial, público). En algunos casos esta información se encuentra disponible en Chile, particularmente en islas que reciben un subsidio.

Otro aspecto relevante a considerar es el acceso a información del potencial renovable. En muchos casos no existe información local de las variables, o bien no es lo suficientemente robusta como para hacer una estimación confiable. En la Figura 16 se aprecia como en el caso del recurso eólico, la mayoría de la data es proveniente de instrumentos adecuados (aunque no necesariamente data medida en el lugar).

Cabe señalar que a partir de la revisión no se advirtió el uso de modelos meteorológicos de mesoescala, como Weather Research Forecasting (WRF) o Mesoscale Atmospheric Simulation System (MASS), de lo que se desprende que su uso no se encuentra masificado en la comunidad y, por ende, una potencial mejora en los procesos de optimización.

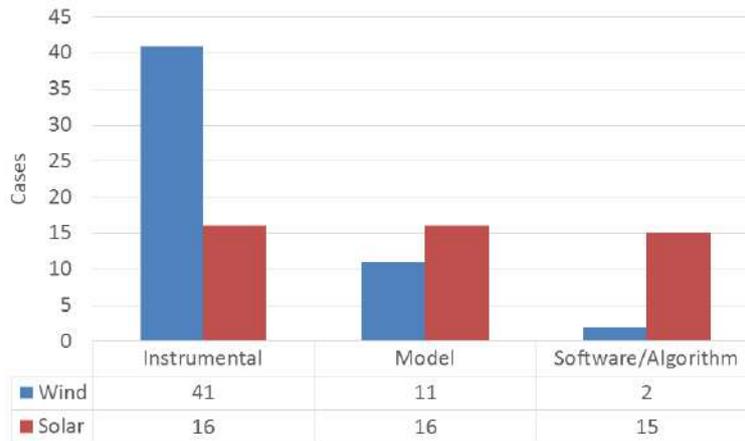


Figura 16. Origen de los datos de potencial renovable a partir del estudio de Morales et al., (2021).

Algunos aspectos que no fueron considerados en el estudio son los efectos territoriales y sociales que dan lugar, una vez que se satisfacen brechas de acceso a la energía, por ejemplo, a través de la implementación de un sistema híbrido. En este sentido, en el trabajo de Aravena, (2016), se analiza el proceso de electrificación que vivió la isla Tac (en el archipiélago de Chiloé) a partir del año 2000. La isla pasó de no tener acceso a electricidad, a contar con un suministro permanente las 24 horas, mediante la implementación de un sistema de generación híbrido eólico-diésel. Más allá de los beneficios evidentes que se producen al contar con este servicio (algunos de los cuales fueron indicados en la introducción de este trabajo), ocurrió un proceso de transformación social que llevó a los habitantes a adquirir una gran cantidad de electrodomésticos que, a la vez, aumentaron considerablemente la demanda del sistema. Como consecuencia, se hizo necesaria la implementación de sistemas de generación diésel con mayor capacidad, desplazando la fuente de energía eólica. Este tipo de antecedentes ejemplifica que la electrificación de zonas aisladas involucra otros aspectos de transformación cultural, social y territorial. Aspectos que es el alcance de este estudio no consideró.

Por otro lado, una característica común en islas de Chile (y no tanto en el resto de los casos del mundo evaluados) es la fuerte presencia de subsidios al consumo eléctrico. En muchas islas chilenas se produce la subvención parcial del consumo, hasta un límite arbitrario, a menudo cercano a los 100kWh al mes, a partir del cual la tarifa sube considerablemente. Independientemente de los efectos de distorsión de mercado que este tipo de subsidios pudiera tener, se podría hipotetizar que la demanda de los habitantes se limite a este umbral, dando una falsa señal de eficiencia o ahorro energético. Este tipo de variables debiera ser abordada con el objetivo de evaluar su efecto real en procesos de optimización energética.

### **Relación de potencia entre habitantes y consumo eléctrico preeliminar**

En la revisión de sistemas de generación híbridos en islas (en Morales et al., (2021)) se planteó, de manera preliminar, que las islas compartían características comunes, particularmente ligadas al grado de aislamiento que estas presentan. Se mencionó, además, que las condiciones de aislamiento inherentes a estas entidades geográficas a menudo tienen un efecto considerable en términos del acceso de sus habitantes a servicios energéticos. Sin embargo, este primer acercamiento fue más bien cualitativo. Las islas presentan

características (relacionadas a la energía) que las distinguen de otros tipos de entidades, y se hace necesario cuantificarlo de alguna manera. En esta primera publicación se discutió el elemento de relación de potencia entre población y consumo eléctrico, aunque no se profundizó en la significancia de esta. De cualquier manera, cabe destacar que se hipotetizó sobre una posible relación entre la diferencia del valor del consumo eléctrico y la curva de regresión ajustada.

En la Figura 17 se presentan los residuales entre la demanda y los valores del ajuste. Se aprecia que islas con valores negativos están asociados con consumos bajo lo esperado, que a su vez se relaciona principalmente con islas que presentan actividades económicas primarias o incluso de subsistencia. Por ejemplo, la economía de isla Mykines está relacionada principalmente con turismo de bajo impacto y ganadería ovina. De manera similar, la economía de isla Tac, se basa en la pesca. Casos similares se identifican en Santay, Lençóis, Ometepe, Sao Vicente y Malé. Incluso en isla Hainan, con una población sustancialmente mayor (aproximadamente 8.6 millones al 2010), su actividad económica se relaciona principalmente con la agricultura, con una incipiente actividad industrial (al momento en que se realizó el estudio que se incluyó en el paper).

En contraste, valores residuales positivos están relacionados con actividades económicas secundarias y terciarias, particularmente manufactura y turismo, por ejemplo, en Awaji, Karpathos-Kasos y Yong-Shu.

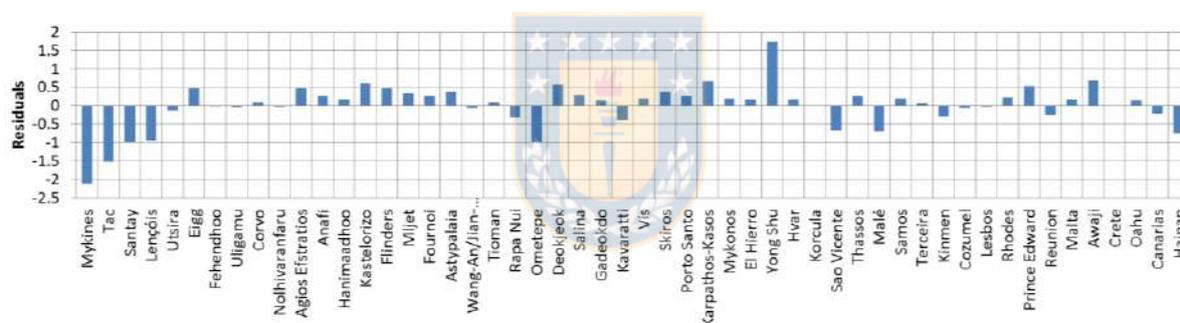


Figura 17. Residuos entre demanda real y ajustada, ordenadas por número de habitantes en islas.

### Ley de potencia entre habitantes de islas y consumo eléctrico

Este tema fue profundizado en la segunda publicación presentada, demostrando efectivamente que esta relación era significativa, sus variables se distribuyen de manera normal, y los resultados no eran dependientes de la latitud de las islas. Ahora bien, es de esperar que efectivamente exista una relación entre ambas variables, pero el hecho de que el exponente de la relación potencial sea mayor que 1 (y verificada su significancia estadística), podría indicar una característica particular de estas entidades geográficas. En ese estudio se incluyeron todas las islas del set de datos, sin discriminar si estas se encontraban interconectadas al continente, ni su forma de gobierno.

Se exploró entonces más a fondo esta relación, pero esta vez restringiendo los grupos de datos, determinando que efectivamente existía una relación de potencia, de característica super-lineal, esto es, con exponente superior a 1. El trabajo establece una posible línea de investigación que profundice en los aspectos determinantes del valor del exponente, y por

qué se diferencia de manera tan significativa con el caso de países o pequeños estados insulares en desarrollo (o SIDS).

En este sentido, se desprenden dos posibilidades de continuación de la investigación: una respecto de posibles explicaciones al valor del exponente de la relación, así como la diferencia con otras entidades, y en segundo lugar las propias implicancias que esta relación pudiera tener en términos de disponer de información para la toma de decisiones en políticas públicas orientadas a la eficiencia energética.

En última instancia, ambas razones podrías estar relacionadas, por ejemplo, si la explicación para este índice pudiese ser:

- Aspectos de ineficiencia en el transporte de la electricidad desde el punto de generación hasta el consumo final por parte de los habitantes.
- La densidad poblacional, lo que se relaciona a su vez con economías de escala. En este sentido, es esperable que los habitantes de las islas se encuentren dispersos en distintos asentamientos, abarcando grandes extensiones de territorio. Esto tiene, entre otras consecuencias, la propiciación de deseconomías de escala. En su contraparte, los países y posiblemente las SIDS, han desarrollado mayores grados de desarrollo, logrando que los asentamientos humanos de mayor densidad concentren gran parte del consumo eléctrico. Argumentos similares, aunque enfocados en la diferencia entre zonas urbanas y rurales han sido discutidos en (Arbabi & Mayfield, 2016; Bettencourt, 2013; Bettignies et al., 2019; Osorio et al., 2017).
- Una tercera posibilidad, más bien geométrica, toma elementos de las otras dos ya descritas. Se plantea la posibilidad de que la población de las islas se concentre en los bordes de la misma, lo que implicaría un sistema de transmisión eléctrica lineal, con mayores pérdidas que un sistema a partir de un entramado tipo red.

Es importante también tener en consideración la muestra de islas con las cual se trabajará. En el paper se establece, por ejemplo, que existen países que pudieran estar sobrerrepresentados al tener una cantidad considerablemente mayor de islas que sus pares. Sin ir más lejos, esta tesis considera una muestra de 58 islas para diseñar el Índice de Aislamiento Energético Insular (incluso serían al menos 63 si se considera aquellas no fueron consideradas por los criterios de exclusión, como Rapa Nui o Juan Fernández), Maldivas tiene unas 182, Grecia otras decenas y así, mientras que la mayoría de los países tienen solo algunas islas con asentamientos permanentes. Por esta razón, el tipo de muestra sobre la cual se analice la relación de potencia debe ser diseñado con mucho cuidado. En el paper se menciona que, para el caso particular de Maldivas, se realizó un experimento de Monte Carlo para evaluar qué tan importante es el efecto de la sobrerrepresentación de un país (de hecho, el hecho de que la pertenencia a un país es un elemento determinante a la hora de calcular la relación entre ambas variables, es a su vez, un supuesto). Los resultados mostraron que, al tomar submuestras aleatorias de 7 islas maldivas, no variaba de manera significativa ni el exponente de la relación de potencia, ni el coeficiente de determinación.

Futuros desarrollos sobre esta línea de investigación debieran abordar el posible efecto de los sistemas de gobierno (y su grado de autonomía de gobiernos centrales, por ejemplo) en

el valor del exponente, aspectos demográficos como la densidad población o la distribución de los asentamientos, la presencia de subsidios, actividades económicas, además de analizar el caso de SIDS conformadas por diversas islas, o incluso el caso de islas interconectadas con sistemas energéticos centralizados.

### **Índice de Aislamiento Energético Insular**

El análisis de robustez del IEAI muestra una fuerte componente de incerteza, particularmente en islas que mantienen posiciones (en el ranking) intermedias. De igual manera se muestra un alto grado de sensibilidad del índice frente a diferentes valores que puedan tomar los parámetros que lo conforman. Esta situación sugiere que debe realizarse una revisión tanto sobre las variables que componen al indicador compuesto, como al proceso de ponderación de los mismos. En el primer caso, sería conveniente aplicar alguna metodología que permita verificar ortogonalidad entre las variables que interactúan como la aplicación de Análisis de Componente Principales que, aplicado a este contexto, tendría por objetivo que la mayor cantidad de variabilidad del sistema sea explicada por el mínimo número de componentes posibles (Uriel Jimenez, 1995).

Por otro lado, ante una eventual revisión del diseño del índice, es recomendable fortalecer el trabajo colaborativo con expertos, incluyéndose desde fases más tempranas del proceso. Como resultado, sería esperable un mayor refinamiento en las variables que serán consideradas en el índice, evitando la inclusión, por ejemplo, de indicadores repetitivos o que puedan presentar un alto grado de correlación. De igual manera, se recomienda extender el proceso de consulta, las iteraciones que hagan falta para lograr el consenso de los expertos en términos del peso relativo que cada componente del índice tendrá.

De cualquier forma, y con los resguardos que se mencionan en el párrafo anterior, se destaca la capacidad del índice de reunir en un solo valor, aspectos multidimensionales del aislamiento energético, permitiendo un primer acercamiento concreto de un índice específicamente desarrollado para islas. A continuación, se discuten algunos resultados de los valores obtenidos para cada indicador, de la muestra de 58 islas chilenas.

- Respecto de la distancia a subestaciones de distribución eléctrica (Figura 8), el panorama es relativamente similar para la gran mayoría de las islas, siendo la excepción un pequeño grupo de islas que se encuentran al sur de Puerto Montt, las cuales, por cierto, se encuentran justamente interconectadas al sistema centralizado. Lo anterior es justamente un argumento a favor de que la distancia a estos centros de distribución eléctrica determina la posibilidad de interconexión a una red eléctrica más robusta, propiciando condiciones de aislamiento energético. Finalmente, Navarino es la excepción al resto de las islas, al encontrarse directamente en la población una planta de generación térmica que abastece las necesidades de la población de manera continua.
- Respecto de la importación de combustibles líquidos para generación eléctrica per cápita (Figura 9) destacan las islas que se encuentran dentro del Mar interior de Chiloé, con valores que van entre 142-500 L/per cápita. Otras zonas con valores altos de dependencia de combustibles importados son Isla Santa María, Magdalena, Ascensión, Las Huichas, Toto, Navarino y particularmente Wellington. Este último caso es considerablemente mayor a todas las islas. Según consulta directa a las autoridades, se señala que el consumo eléctrico de la isla, dada sus condiciones de

aislamiento territorial e inaccesibilidad, está completamente subvencionado, lo que en principio estaría generando una distorsión respecto de la importación del combustible. Cabe señalar que este consumo es solo lo necesario para abastecer las necesidades de generación de las islas, por lo que si se considera la cantidad de combustibles importados para otros usos (como calefacción o automóviles) la cantidad podría aumentar considerablemente. Otro caso particular es el de isla Mocha, que presenta un consumo relativamente bajo de estos combustibles (87-142 L/per cápita) en comparación con isla Santa María, por ejemplo. Esto se produce porque la isla cuenta con reservas propias de gas natural, el cual, al menos hasta el momento en que se realizó este catastro, era aprovechado por un sistema de generación híbrido diesel-GN.

- El grado de acceso a combustibles líquidos (a través de estaciones de servicio) (Figura 10) es dispar dentro de las islas de la muestra en Chile. En la Región de los Lagos existe un alto grado de acceso al recurso, con precios cercanos al promedio nacional, especialmente en islas cercanas a la costa de Chiloé, e incluso en zonas más aisladas como el grupo Desertores. En la misma región, un grupo de islas al sur de Puerto Montt (Abtao, Tabón, Queillín y Puluqui) muestra valores muy opuestos, mostrando un acceso parcial al recurso, o simplemente sin acceso. Una situación similar experimenta las islas de la Región del Biobío (Mocha y Santa María), y hacia el sur con Ascensión, Magdalena, Toto, Las Huichas y Wellington, donde no tienen acceso a combustibles líquidos. Finalmente, Isla Navarino, a pesar de ser una zona extrema del país, presenta precios cercanos a la media nacional, posiblemente por su condición político-estratégica y su alta presencia de habitantes asociados a las fuerzas armadas.
- Se advierte un alto grado de aislamiento para el acceso al GLP (Figura 11). Solo algunas islas, principalmente conectadas al continente o cercanas a la costa este de Chiloé presentan acceso a este combustible a precios por debajo de la media nacional. La gran mayoría presenta costos sobre la media nacional. Es importante destacar al respecto, que la metodología establecida por Briano & Herrera, (2018) no considera efectivamente la posibilidad de aislamiento del recurso. Esto dada la forma en que el energético es distribuido en Chile, el cual usualmente es distribuido directamente en las casas del consumidor. El argumento es que siempre será posible adquirir GLP de esta manera, aunque en la práctica implique un sobreprecio que lo haga inmanejable. Esto se ve potenciado aún más, porque el combustible de reemplazo para el GLP es simplemente madera, de la cual se dispone a muy bajo costo (o gratis) hacia el sur del país.
- El índice de aislamiento territorial, desarrollado por (Carvajal et al., 2012) (Figura 12), demuestra un desempeño irregular en las islas. En la Región de Los Lagos, solo algunas islas, cercanas a la costa, muestran valores superiores a 0; islas que, en general, tienen un alto grado de interconexión con unidades administrativamente mayores, como Chiloé o Puerto Montt, mientras que el resto de las islas de la zona muestran altos grados de aislamiento territorial. En la Región de Aysén, tanto Ascensión como Magdalena presentan grados llamativamente superiores a 0, incluso por sobre otras islas cercanas al continente en Los Lagos. Por otro lado, tanto Las Huichas, Toto y Wellington presentan nuevamente altos grados de aislamiento territorial.
- A partir de los indicadores del IAEI es posible identificar que el potencial eólico y solar (Figura 13 y Figura 14) de las islas del sur del país se ve complementado, pudiendo

ser una alternativa realmente factible de ser explotada, pero siempre en conjunto con sistemas de respaldo. Por el momento no es recomendable prescindir completamente del uso de generadores diésel, dado los costos que implicaría su reemplazo, o su equivalente en sistemas de almacenamiento. Sin embargo, algunos avances en términos tecnológicos, pero principalmente político, como la política nacional de hidrógeno verde podrían dar lugar a formas más eficientes de almacenamiento energético, siendo un paso relevante hacia un futuro a mediano plazo donde la generación a base de combustibles fósiles pueda ser reducida a su mínima expresión.



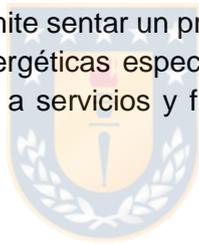
## 7 Conclusiones

- Los sistemas híbridos de generación eléctrica resultan ser una alternativa confiable, particularmente para zonas aisladas, como las islas. Su uso permite aumentar la seguridad del sistema, disminuir los riesgos propios del transporte de combustible y, a menudo, los costos finales de la energía. Otros aspectos medioambientales se ven beneficiados como la reducción de emisiones contaminantes (o de gases de efecto invernadero), el aprovechamiento de recursos naturales renovables de la isla y, en general, una mejora en la sustentabilidad ambiental de la isla.
- Chile ha desarrollado exitosos casos de implementación de sistemas híbridos, particularmente en el grupo Desertores, donde desde 2014 se implementó un sistema solar-eólico, con respaldo diésel, en las islas de Autení, Chuit, Chulín, Talcán, Nayahué, Imerquina y Llanquid, disminuyendo considerablemente sus condiciones de aislamiento energético.
- Algunas de las limitaciones más relevantes, a tener en consideración, en el proceso de optimización energética híbrida, es la falta de datos de entrada de perfil de demanda y potencial renovable disponible. En el primer caso, diversas metodologías pueden ser aplicadas, destacando aquellas del tipo bottom-up, las que pueden ser aplicadas considerando un perfil de carga de referencia, el cual puede ser escalado hasta alcanzar la demanda energética total de la isla. En el caso de las energías renovables, se identifica una mayor tendencia hacia los datos efectivamente medidos por instrumental in situ, particularmente en el caso eólico. Por el contrario, para el caso del recurso renovable solar, los antecedentes muestran que los modelos, incluso de escala global, tienen un desempeño razonable a la hora de ser considerados para optimizar un sistema híbrido.
- Se verificó que las variables “habitantes de una isla” y “Consumo eléctrico anual”, para una muestra de 51 islas alrededor del mundo, siguen una ley de potencia con exponente  $\epsilon = 1.12$  y un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.908$ . sugiriendo una relación super-lineal. Esta relación es estadísticamente significativa y sus variables, en forma logarítmica, se distribuyen normalmente. Este exponente es significativamente distinto a los obtenidos para el caso de países o SIDS. Se hipotetiza sobre los elementos que determinan esta relación, en particular las ineficiencias en la transmisión eléctrica, la distribución espacial de las comunidades, economías de escala o aspectos socio políticos. Estos resultados proveen una base para futuros estudios que aborden la relación entre la población y el consumo de energía en islas, pero esta vez involucrando aspectos económicos y políticos, y de esta maneja permitir mejores decisiones en políticas públicas orientadas a la eficiencia energética y la sustentabilidad de comunidades insulares.
- A partir de la revisión de antecedentes se determinó que el Índice de Aislamiento Energético Insular debe recoger la multidimensionalidad de la problemática de aislamiento energético. En este sentido, se establecieron las dimensiones de electricidad, combustibles, aislamiento territorial y potencial renovable. A su vez, estas dimensiones se dividieron en 8 indicadores: acceso a electricidad, distancia a

subestación más cercana, cantidad de combustibles importados per cápita para generación eléctrica, acceso a combustibles líquidos, acceso a GLP, aislamiento territorial, potencial eólico y potencial solar.

- Se desarrolló un proceso de consulta con metodología Delphi, para convergencia de criterios en el caso de ponderación de las variables del IAEI. Si bien las respuestas de los expertos presentan dispersión, los resultados permitieron establecer un peso relativo de referencia para las variables involucradas.
- A partir del análisis de robustez se verificó que los factores que determinan el IAEI inducen alta variabilidad en los resultados, particularmente si estos son analizados en términos de la generación de un Ranking de islas. Para mejorar la robustez del índice se recomienda involucrar a los expertos desde etapas tempranas del proceso, además de aumentar el número de iteraciones en favor de lograr consenso en sus respuestas.

En resumen, la presente tesis permite confirmar la idoneidad de implementar sistemas de generación híbrido en islas, de manera de favorecer la robustez de los sistemas, además de los beneficios ambientales propios del uso de recursos energético-renovables locales, como la disminución de los riesgos de transporte de combustibles y la disminución de emisiones contaminantes. Además, abre la posibilidad de desarrollar una línea de investigación en torno al estudio de la relación de potencia entre la demanda energética y la población de las islas. Finalmente, el desarrollo del IEAI permite sentar un precedente respecto de una herramienta que permita diagnosticar brechas energéticas específicamente diseñado para capturar las condiciones geográficas y de acceso a servicios y fuentes energéticas para comunidades insulares.



## 8 Referencias

- Aguirre-Mendoza, A. M., Díaz-Mendoza, C., & Pasqualino, J. (2019). Renewable energy potential analysis in non-interconnected islands. Case study: Isla Grande, Corales del Rosario Archipelago, Colombia. *Ecological Engineering*, 130, 252-262.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.020>
- Aravena, E. M. O. (2016). *ENERGÍA ELÉCTRICA EN ISLA TAC* [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile.
- Arbabi, H., & Mayfield, M. (2016). Urban and Rural—Population and Energy Consumption Dynamics in Local Authorities within England and Wales. *Buildings*, 6(3), 34.  
<https://doi.org/10.3390/buildings6030034>
- Arenas, F., Quense, J., & Salazar, A. (1999). El aislamiento como desafío para el ordenamiento territorial. El caso de las comunas de Chile 1. *Revista de geografía Norte Grande*, 26, 105-111.
- Aziaras, N. (2018). *Uso de energías renovables en isla Santa maría para reducir su dependencia de los combustibles fósiles* [Tesis]. Universidad de Concepción.
- Bala, B., & Siddique, S. A. (2009). Optimal design of a PV-diesel hybrid system for electrification of an isolated island—Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm. *Energy for Sustainable Development*, 13(3), 137-142.  
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2009.07.002>
- Bettencourt, L. M. A. (2013). The Origins of Scaling in Cities. *Science*, 340(6139), 1438.  
<https://doi.org/10.1126/science.1235823>
- Bettignies, Y., Meirelles, J., Fernandez, G., Meinherz, F., Hoekman, P., Bouillard, P., & Athanassiadis, A. (2019). The Scale-Dependent Behaviour of Cities: A Cross-Cities Multiscale Driver Analysis of Urban Energy Use. *Sustainability*, 11(12), 3246.  
<https://doi.org/10.3390/su11123246>
- Betzold, C. (2015). Adapting to climate change in small island developing states. *Climatic Change*, 133(3), 481-489. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1408-0>

Biobio Chile. (2021, agosto 4). *Vuelca embarcación que transportaba tambores con petróleo para generación eléctrica en isla Mocha.*

<https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2021/08/04/vuelca-embarcacion-que-transportaba-tambores-con-petroleo-para-generacion-electrica-en-isla-mocha.shtml>

Briano, V., & Herrera, R. (2018). *Evaluación del Acceso a Combustibles Líquidos y Gas Licuado en Zonas Aisladas del País* (Informe Final ID-584105-61-LE17). Ministerio de Energía.

Burdett, T. A., & Van Treuren, K. W. (2014). Small-Scale Wind Turbines Optimized for Class 2 Wind: A Wind Siting Survey and Annual Energy Production Analysis. *Volume 3B: Oil and Gas Applications; Organic Rankine Cycle Power Systems; Supercritical CO2 Power Cycles; Wind Energy*, V03BT46A023. <https://doi.org/10.1115/GT2014-26243>

Carvajal, L., Poch, M., & Osorio, R. (2012). *Estudio Identificación Localidades en Condiciones de Aislamiento 2012* (p. 242). SUBDERE.

[http://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/zonas\\_aisladas2.pdf](http://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/zonas_aisladas2.pdf)

Celedón, C., & Cortez, I. (s. f.). *¿Es suficiente la actual legislación sobre Net Metering para incentivar la generación distribuida en Chile?* Recuperado 30 de agosto de 2020, de <https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno13/netmet/NET%20METERING.htm>

CEPAL. (2009). *Contribución de los servicios energéticos a los Objetivos de Desarrollo del Milenio y la mitigación de la pobreza en América Latina y el Caribe* (p. 82). CEPAL.

[https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3720/1/S2007029\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3720/1/S2007029_es.pdf)

Chen, F., Duić, N., Manuel Alves, L., & da Graça Carvalho, M. (2007). Renewislands—Renewable energy solutions for islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1888-1902. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.009>

Clark, E. (2009). Island Development. En R. Kitchin & N. Thrift (Eds.), *International Encyclopedia of Human Geography* (pp. 607-610). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00849-X>

CNE. (2020). *Reporte Energético Financiero* (N.º 12; p. 16). Ministerio de Energía.

- [https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/05/RT\\_Financiero\\_v20201T.pdf](https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/05/RT_Financiero_v20201T.pdf)
- CNE. (2021). *Geo Portal CNE*. Energía Maps. <https://energiamaps.cne.cl/>
- CPC. (2019). *Judicialización de los proyectos de inversión del SEIA* (N.º 3; Observatorio de la productividad, p. 15). <http://www.cpc.cl/wp-content/uploads/2020/05/Informe-N%C2%B03-2S19-Judicializaci%C3%B3n-de-proyectos-de-inversi%C3%B3n.pdf>
- Decreto 30. Promulga el Acuerdo de París, adoptado en la vigésimo primera reunión de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 17 (2017). <http://bcn.cl/2iw6a>
- Dorotić, H., Doračić, B., Dobravec, V., Pukšec, T., Krajačić, G., & Duić, N. (2019). Integration of transport and energy sectors in island communities with 100% intermittent renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.033>
- El Mercurio. (2019, julio 28). Greenpeace por derrame de petróleo en Puerto Natales: «Las consecuencias pueden ser devastadoras» | Emol.com. *Emol*. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2019/07/28/956095/Greenpeace-por-derrame-de-petroleo-en-Puerto-Natales-Las-consecuencias-pueden-ser-devastadoras.html>
- Enevoldsen, P., & Sovacool, B. K. (2016). Integrating power systems for remote island energy supply: Lessons from Mykines, Faroe Islands. *Renewable Energy*, 85, 642-648. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.065>
- Figueroa, E., & Rotarou, E. (2016). Tourism as the development driver of Easter Island: The key role of resident perceptions. *Island Studies Journal*, 11, 245-264.
- Freudenberg, M. (2003). *Composite Indicators of Country Performance: A Critical Assessment* (OECD Science, Technology and Industry Working Papers N.º 2003/16; OECD Science, Technology and Industry Working Papers, Vol. 2003/16). <https://doi.org/10.1787/405566708255>
- Gils, H. C., & Simon, S. (2017). Carbon neutral archipelago – 100% renewable energy supply for the Canary Islands. *Applied Energy*, 188, 342-355.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.023>

INE. (2018). *Censo 2017*. Entrega Final Censo 2017. <https://www.censo2017.cl/>

Jacobs, R., Smith, P., & Goddard, M. (2004). Measuring performance: An examination of composite performance indicators. *Centre for Health Economics*, 29, 124.

Katsaprakakis, D. Al. (2016). Hybrid power plants in non-interconnected insular systems. *Applied Energy*, 164, 268-283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.085>

Kelman, I. (2017). How can island communities deal with environmental hazards and hazard drivers, including climate change? *Environmental Conservation*, 44(3), 244-253. <https://doi.org/10.1017/S0376892917000042>

Kennedy, N., Miao, C., Wu, Q., Wang, Y., Ji, J., & Roskilly, T. (2017). Optimal Hybrid Power System Using Renewables and Hydrogen for an Isolated Island in the UK. *Energy Procedia*, 105, 1388-1393. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.517>

Kuang, Y., Zhang, Y., Zhou, B., Li, C., Cao, Y., Li, L., & Zeng, L. (2016). A review of renewable energy utilization in islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>

Ley N° 20698. Propicia la ampliación de la matriz energética, mediante fuentes renovables no convencionales, (2013).

Ley N° 20928 Establece mecanismos de equidad en las tarifas de servicios eléctricos, (2016). <http://bcn.cl/2oizj>

Ley N° 21305. Sobre eficiencia energética, Pub. L. No. 21305 (2021).

[https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/publicacion\\_resolucion\\_exenta\\_n\\_deg16-2021.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/publicacion_resolucion_exenta_n_deg16-2021.pdf)

Lin, J.-H., Wu, Y.-K., & Lin, H.-J. (2016). Successful Experience of Renewable Energy Development in Several Offshore Islands. *Energy Procedia*, 100(Supplement C), 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.137>

Liu, H., & Qu, S. (2014). The optimal capacity and economic analysis of micro-grid on island. *OCEANS 2014 - TAIPEI*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964426>

- Liu, Y., Yu, S., Zhu, Y., Wang, D., & Liu, J. (2018). Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 460-470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.063>
- Mahesh, A., & Sandhu, K. S. (2015). Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1135-1147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.008>
- Meza, C. G., Zuluaga Rodríguez, C., D'Aquino, C. A., Amado, N. B., Rodrigues, A., & Sauer, I. L. (2019). Toward a 100% renewable island: A case study of Ometepe's energy mix. *Renewable Energy*, 132, 628-648. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.124>
- MINENERGIA. (2017). *ENERGÍA 2050: Política Energética de Chile* (p. 158). Ministerio de Energía. <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/611>
- MINENERGIA. (2019). *Mapa de vulnerabilidad energética* (p. 28). División de Acceso y Desarrollo Social. [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documento\\_de\\_metodologia\\_y\\_resultados\\_0.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documento_de_metodologia_y_resultados_0.pdf)
- MINENERGIA. (2020a). *Acuerdos de retiro de centrales termoeléctricas a carbón*. [https://energia.gob.cl/sites/default/files/decreto\\_exento\\_n\\_50.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/decreto_exento_n_50.pdf)
- MINENERGIA. (2020b). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde* (p. 33). Ministerio de Energía. [https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia\\_nacional\\_de\\_hidrogeno\\_verde\\_-\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf)
- MINENERGIA. (2021a). *Explorador Eólico*. Explorador Eólico. <http://eolico.minenergia.cl/inicio>
- MINENERGIA. (2021b). *Explorador Solar*. Explorador Solar. <https://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>
- Morales, J., Figueroa, D., & Vergara, L. (2021). Optimisation of hybrid renewable energy systems on islands: A review. *Island Studies Journal*, 22. <https://doi.org/10.24043/isj.167>

- Morales-Lassalle, J., Figueroa-Martínez, D., & Vergara-Fernández, L. (2021). Optimisation of hybrid renewable energy systems on islands: A review. *Island Studies Journal*, 22. <https://doi.org/10.24043/isj.167>
- OECD (Ed.). (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD.
- Osorio, B., McCullen, N., Walker, I., & Coley, D. (2017). Understanding the Relationship between Energy Consumption and Urban Form. *ATHENS JOURNAL OF SCIENCES*, 4(2), 115-142. <https://doi.org/10.30958/ajs.4-2-3>
- Pelz, S., & Urpelainen, J. (2020). Measuring and explaining household access to electrical energy services: Evidence from rural northern India. *Energy Policy*, 145, 111782. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111782>
- Petridis, P., Fischer-Kowalski, M., Singh, S. J., & Noll, D. (2017). The role of science in sustainability transitions: Citizen science, transformative research, and experiences from Samothraki island, Greece. *Island Studies Journal*, 12(1), 115-134. <https://doi.org/10.24043/isj.8>
- Prävälje, R., Patriche, C., & Bandoc, G. (2019). Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach. *Journal of Cleaner Production*, 209, 692-721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.239>
- Rampengan, M. M. F., Boedhihartono, A. K., Law, L., Gaillard, J. C., & Sayer, J. (2014). Capacities in Facing Natural Hazards: A Small Island Perspective. *International Journal of Disaster Risk Science*, 5(4), 247-264. <https://doi.org/10.1007/s13753-014-0031-4>
- Reguant-Álvarez, M., & Torrado-Fonseca, M. (2016). 14631-Text de l'article-28704-1-10-20160107.pdf. *Revista d'innovació i Recerca en Educació*, 9(1), 87-102.
- Rojas Zamorano, F., & Szlafsztein, C. F. (2019). Identificación del grado de aislamiento en territorios insulares: Caso de estudio en la provincia de Chiloé (Chile). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(2), 427-439. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n2.79755>

- Saltelli, A. (2002). Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications*, 145(2), 280-297. [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(02\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(02)00280-1)
- Segurado, R., Krajačić, G., Duić, N., & Alves, L. (2011). Increasing the penetration of renewable energy resources in S. Vicente, Cape Verde. *Applied Energy*, 88(2), 466-472. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.005>
- Siddaiah, R., & Saini, R. P. (2016). A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 376-396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.281>
- Stevens, N. E., Castillo, J., Baring-Gould, I., & Lagos, W. (2001). *Isla Tac Power System First Year Status Report: October 2000 through October 200*.
- Talukder, B., W. Hipel, K., & W. vanLoon, G. (2017). Developing Composite Indicators for Agricultural Sustainability Assessment: Effect of Normalization and Aggregation Techniques. *Resources*, 6(4), 66. <https://doi.org/10.3390/resources6040066>
- Thomas, D., Deblecker, O., & Ioakimidis, C. S. (2016). Optimal design and techno-economic analysis of an autonomous small isolated microgrid aiming at high RES penetration. *Energy*, 116, 364-379. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.119>
- Uriel Jimenez, E. (1995). *Análisis de datos series temporales y análisis multivariante* (1.<sup>a</sup> ed.). AC.
- Veron, S., Mouchet, M., Govaerts, R., Haevermans, T., & Pellens, R. (2019). Vulnerability to climate change of islands worldwide and its impact on the tree of life. *Scientific Reports*, 9(1), 14471. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51107-x>

## 9 Anexo

### 9.1 Islas consideradas en el estudio de la relación Habitantes – Consumo eléctrico Anual.

Island	Country	Population	Area [km2]	Energy Demand [MWh/year]
Flinders	Australia	800	1367.0	3704
Ascención	Chile	1454	620.0	1332
Mocha	Chile	419	48.0	167
Rapa Nui	Chile	7750	163.6	10604
Santa María	Chile	1260	30.0	898
Toto	Chile	130	1.8	60
Navarino	Chile	1834	2473.0	4836
Tabón	Chile	374	8.6	84
Isabela	Ecuador	2344	4588.0	4550
San Cristobal	Ecuador	7199	558.0	14410
Santa Cruz	Ecuador	15701	986.0	27890
Mayotte	France	256500	376.0	262000
Reunion	France	837900	2512.0	2545000
Astypalaia	Greece	1334	114.1	6250
Crete	Greece	632674	8336.0	3383201
Kastelorizo	Greece	492	12.0	3510
Lesbos	Greece	85330	1632.0	297928
Rhodes	Greece	115490	1400.0	816604
Samos	Greece	32977	477.0	168862
Kavaratti	India	11221	4.2	12730
Pantelleria	Italy	7665	83.0	31067
Salina	Italy	2598	26.1	34482
Tioman	Malasya	3314	131.0	9500
SH. Goidhoo	Maldives	520	1.0	552
GDH. Fuvahmulah	Maldives	8579	4.9	12267
M. Veyvah	Maldives	254	0.4	724
K. Malé	Maldives	127079	1.9	336961
M. Kolhufushi	Maldives	748	0.6	999
GDH. Fuvahmulah	Maldives	8579	4.9	12267
K. Hulhumalé	Maldives	15769	2.0	46035
Bonaire	Netherland	19549	288.0	103400
Saba	Netherland	1947	13.0	9376
St. Eustatius	Netherland	3193	21.0	13700
Corvo	Portugal	467	6.3	1562
Santa Maria	Portugal	5500	97.2	19480
Sao Miguel	Portugal	147228	759.4	411120
Terceira	Portugal	56437	382.0	176450
Pico	Portugal	13645	444.8	41630
Graciosa	Portugal	4391	60.8	12720
Faial	Portugal	14532	173.0	43780

El Hierro	Spain	10679	269.0	45037
Gran Canaria	Spain	843158	1560.0	3649971
La Gomera	Spain	20976	369.8	77125
La Palma	Spain	81350	708.3	278700
Tenerife	Spain	894636	2034.4	3696506
Anguilla	UK	16086	91.0	88560
Montserrat	UK	5215	102.0	10890
Flackland	UK	3398	12173.0	17670
Sal	Cape Verde	33747	216.0	73817
Maio	Cape Verde	6980	269.0	2708
Sao Vicente	Cape Verde	81014	227.0	92266

## 9.2 SIDS consideradas en el estudio de la relación Habitantes – Consumo eléctrico anual

Island	Population	Energy Demand [MWh/year]
Aruba	116576	117
Bahrain	1442659	1443
Barbados	293131	293
Bermuda	71176	71
Cuba	11116396	11116
Curaçao	150241	150
Dominica	74027	74
Jamaica	2812090	2812
Madagascar	25683610	25684
Mauritius	1364283	1364
Nauru	9692	10
Niue	1618	2
Puerto Rico	3294626	3295
st lucia	165510	166

## 9.3 Países considerados en el estudio de la relación Habitantes – Consumo eléctrico anual

Country	Population	Energy Demand [TWh/year]	Energy Demand [MWh/year]
Afghanistan	34940837	5.53	5526000
Albania	3057220	5.11	5110000
Algeria	42228429	66.00	66000000
Andorra	85708	0.22	221600
Angola	30355880	9.04	9036000

Argentina	44494502	129.00	129000000
Armenia	3038217	5.29	5291000
Australia	24992369	232.00	232000000
Austria	8793370	64.60	64600000
Azerbaijan	10046516	20.24	20240000
Bangladesh	159453001	53.65	53650000
Belarus	9527543	31.72	31720000
Belgium	11422068	84.00	84000000
Belize	385854	0.45	453000
Benin	11340504	1.14	1143000
Bhutan	766397	2.18	2184000
Bolivia	11306341	7.79	7785000
Bosnia and Herzegovina	3849891	11.87	11870000
Botswana	2249104	3.64	3636000
Brazil	209469333	524.00	524000000
Brunei	450565	3.77	3771000
Bulgaria	7057504	32.34	32340000
Burkina Faso	19742715	1.55	1551000
Burma	55622506	14.93	14930000
Burundi	11844520	0.38	382700
Cambodia	16449519	5.86	5857000
Cameroon	25640965	6.41	6411000
Canada	37058856	529.00	529000000
Central African Republic	5745062	0.16	159400
Chad	15833116	0.21	208600
Chile	18729160	72.00	72000000
China	1392730000	6167.00	6167000000
Colombia	49648685	69.00	69000000
Congo, Democratic Republic of the	85281024	7.43	7430000
Congo, Republic of the	5062021	0.91	912000
Costa Rica	4987142	9.81	9812000
Cote d'Ivoire	26260582	6.25	6245000
Croatia	4270480	15.93	15930000
Czech Republic	10625695	59.00	59000000
Denmark	5809502	33.02	33020000
Djibouti	884017	0.38	377100
Ecuador	16498502	22.68	22680000
Egypt	98423595	175.00	175000000
El Salvador	6187271	5.93	5928000
Equatorial Guinea	797457	0.47	465000
Eritrea	5970646	0.35	353900
Estonia	1244288	8.80	8795000
Eswatini	1087200	1.43	1431000
Ethiopia	108386391	9.06	9062000

Finland	5537364	82.79	82790000
France	66987244	441.00	441000000
Gabon	2119036	2.07	2071000
Gambia, The	2092731	0.28	282800
Georgia	4926087	12.37	12370000
Germany	82927922	529.00	529000000
Ghana	28102471	9.36	9363000
Greece	10761523	56.89	56890000
Greenland	57691	0.47	468000
Guatemala	16581273	10.10	10100000
Guinea	11855411	0.56	556100
Guinea-Bissau	1833247	0.04	36270
Guyana	740685	0.79	790100
Honduras	9182766	7.22	7220000
Hong Kong	7213338	41.84	41840000
Hungary	9825704	39.37	39370000
Iceland	343518	17.68	17680000
India	1352617328	1243.00	1243000000
Indonesia	267663435	235.00	235000000
Iran	81800269	261.00	261000000
Iraq	40194216	38.46	38460000
Ireland	5068050	25.68	25680000
Israel	8424904	55.00	55000000
Italy	60431283	303.00	303000000
Japan	126529100	1020.00	1020000000
Jordan	10458413	16.82	16820000
Kazakhstan	18744548	94.23	94230000
Kenya	48397527	7.86	7863000
Kiribati	109367	0.03	26970
Korea, North	25381085	13.89	13890000
Korea, South	51418097	507.60	507600000
Kosovo	1907592	3.96	3957000
Kuwait	4137309	59.00	59000000
Kyrgyzstan	5849296	10.52	10520000
Laos	7234171	5.47	5471000
Latvia	1923559	6.80	6798000
Lebanon	6100075	15.71	15710000
Lesotho	1962461	0.85	847300
Liberia	4809768	0.28	279000
Libya	6754507	27.30	27300000
Liechtenstein	38547	0.39	393600
Lithuania	2793284	10.50	10500000
Luxembourg	605764	6.48	6475000
Macau	606340	5.08	5077000
Macedonia	2118945	6.42	6420000

Malawi	19842560	1.32	1321000
Malaysia	31528585	153.00	153000000
Mali	18429893	2.98	2982000
Mauritania	3840429	1.06	1059000
Mexico	126190788	279.00	279000000
Moldova	3437720	4.40	4400000
Mongolia	3103428	5.93	5932000
Montenegro	614249	2.81	2808000
Morocco	34314130	28.25	28250000
Mozambique	27233789	11.57	11570000
Namibia	2533224	3.89	3891000
Nepal	29717587	4.98	4983000
Netherlands	17231017	116.00	116000000
New Zealand	4885500	39.00	39000000
Nicaragua	6085213	3.59	3590000
Niger	19866231	1.07	1065000
Nigeria	195874740	28.00	28000000
Norway	5314336	126.00	126000000
Oman	3494116	28.92	28920000
Pakistan	207862518	92.33	92330000
Panama	3800644	8.71	8708000
Paraguay	7025763	10.90	10900000
Peru	31331228	44.61	44610000
Philippines	105893381	78.30	78300000
Poland	37978548	150.00	150000000
Portugal	10281762	49.00	49000000
Qatar	2363569	37.24	37240000
Romania	19473936	50.00	50000000
Russia	144478050	929.00	929000000
Rwanda	12187400	0.53	527300
Saudi Arabia	33699947	300.00	300000000
Senegal	15020945	3.50	3497000
Serbia	7078110	29.81	29810000
Sierra Leone	6312212	0.28	279000
Slovakia	5445040	26.64	26640000
Slovenia	2102126	13.40	13400000
Somalia	11259029	0.32	315300
South Africa	55380210	207.10	207100000
South Sudan	10204581	0.39	391800
Spain	46723749	243.00	243000000
Sri Lanka	22576592	12.67	12670000
Sudan	43120843	12.12	12120000
Suriname	597927	1.75	1750000
Sweden	10183175	134.00	134000000
Switzerland	8292809	58.46	58460000

Syria	19454263	14.16	14160000
Taiwan	23780000	248.00	248000000
Tajikistan	8604882	12.96	12960000
Tanzania	55451343	5.68	5682000
Thailand	69428524	200.00	200000000
Togo	8176449	1.26	1261000
Tunisia	11516189	15.27	15270000
Turkey	82319724	252.00	252000000
Turkmenistan	5411012	15.09	15090000
Uganda	40853749	3.11	3106000
Ukraine	44622516	122.00	122000000
United Arab Emirates	9630959	119.00	119000000
United Kingdom	66488991	307.00	307000000
United States	327167434	3971.00	3971000000
Uruguay	3369299	10.77	10770000
Uzbekistan	32955400	54.00	54000000
Venezuela	28870195	63.00	63000000
Vietnam	97040334	143.20	143200000
Yemen	28667230	3.68	3681000
Zambia	16445079	11.04	11040000
Zimbabwe	14030368	7.12	7118000

#### 9.4 Islas Maldivas, como parte del estudio de la relación Habitantes – Consumo eléctrico anual

Island	Population	Energy Demand [MWh/year]
ADH. Dhangethi	827	1322.3
ADH. Dhigurah	608	1149.9
ADH. Dhihdhoo	156	202.8
ADH. Fenfushi	836	1067.2
ADH. Hangaameedhoo	501	674.7
ADH. Kunburudhoo	462	554.8
ADH. Maamingili	2315	4156.8
ADH. Mahibadhoo	2075	2179.6
ADH. Mandhoo	363	361.2
ADH. Omadhoo	886	703.5
R. Alifushi	1808	1667.5
R. AnGolhitheemu	400	349.5
HA. Baraah	1091	1001.4
SH. Bilehffahi	506	499.6
AA. Bodufolhudhoo	607	777.8
DH. Bandidhoo	813	715.3
DH. Hulhudheli	719	759.6

DH. Kudahuvadhoo	2443	4016.1
DH. Maaenboodhoo	622	658.6
DH. Meedhoo	958	1339.3
DH. Rinbudhoo	278	373.1
B. Dharavandhoo	839	1646.6
HA. Dhidhdhoo	2745	3932.4
K. Dhiffushi	1024	1562.5
B. Dhonfanu	369	359.4
R. Dhuvaafaru	3018	2653.3
B. Eydhafushi	2626	5035.4
F. Bileiydhoo	767	860.3
F. Dharan boodhoo	403	316.2
F. Feeali	864	974.9
F. Magoodhoo	562	728.6
F. Nilandhoo	1658	2738
R. Fainu	322	659.5
SH. Feevah	660	764.8
B. Fehendhoo	107	216.8
AA. Feridhoo	437	616.8
SH. Feydhoo	741	735.5
HA. Filladhoo	576	548.8
HDH. Finey	414	354
SH. Foakaidhoo	1360	1308.7
N. Fodhdhoo	228	282.8
B. Fulhadhoo	220	270.1
SH. Funadhoo	2099	1197.4
GA. Dhaandhoo	1106	1297.1
GA. Dhevvadhoo	597	588.3
GA. Gemanafushi	1233	1428.2
GA. Kanduhulhudhoo	530	568.3
GA. Kolamaafushi	979	1183.4
GA. Kondey	220	351.3
GA. Maamendhoo	1138	1159.8
GA. Nilandhoo	592	742.5
GA. Vilingili	2900	4665.6
K. Gaafaru	1061	1390.7
GDH. Faresmaathodaa	1059	1016.8
GDH. Fiyoari	825	657.4
GDH. Gadhdhoo	1489	2045.1
GDH. Hoandehdoo	796	914.7
GDH. Madaveli	1259	3380.6
GDH. Nadella	725	558.6
GDH. Rathafandhoo	553	607.8
GDH. Thinadhoo	5268	8434.7
GDH. Vaadhoo	741	723.9

GDH. Fuvahmulah	8579	12266.9
SH. Goidhoo	520	551.5
B. Goidhoo	548	742.1
K. Gulhi	893	1098.1
K. Guraidhoo	1605	2645.6
HDH. Hanimaadhoo	1920	4112.8
N. HenBadhoo	497	510.7
AA. Himandhoo	703	897.9
K. Himmafushi	1308	2598.2
LH. Hinnavaru	2490	3359.4
HDH. Hirimaradhoo	336	283.9
B. Hithaadhoo	718	786.9
HA. Hoarafushi	1826	2342
N. Holhudhoo	1682	1902.3
R. Hulhudhuffaarau	1137	1219.2
K. Hulhumalé	15769	46034.9
K. Huraa	1142	2648.1
HA. Ihavandhoo	2254	2754.6
R. InGuraidhoo	1223	1219.4
R. Innamaadhoo	570	1378
K. Kaashidhoo	1865	2152
B. Kamadhoo	471	678
SH. KanDitheemu	1101	1171.1
HA. Kelaa	1063	1233.5
N. KenDhikulhudhoo	1331	1311.1
B. Kendhoo	868	976
B. Kihaadhoo	364	378.7
R. Kinolhas	473	376.9
SH. Komandoo	1112	1358.2
N. Kudafari	480	551.6
B. Kudarikilu	429	493.2
HDH. Kulhudhuffushi	8224	13111.2
HDH. Kumundhoo	892	766.3
LH. Kurendhoo	1230	1516.6
HDH. KurinBi	456	492.9
L. Dhanbidhoo	569	621.8
L. Fonadhoo	2203	4226.4
L. Gan	3543	5864
L. Hithadhoo	1011	773.6
L. Isdhoo	944	797.8
L. Kalhaidhoo	467	814.7
L. Kunahandhoo	657	490.8
L. Maabaidhoo	650	1043.3
L. Maamendhoo	898	765.7
L. Maavah	1270	1788.2

L. Mundoo	236	258.3
N. Landhoo	668	817
SH. Lhaimagu	613	770.2
N. Lhohi	611	512.7
M. Dhiggaru	982	963.2
M. Kolhufushi	748	998.7
M. Maduvvari	369	349.4
M. Mulah	1264	1407.6
M. Muli	862	1230.7
M. Naalaafushi	426	1164.6
M. Raimandhoo	113	160.5
M. Veyvah	254	723.6
N. Maafaru	616	1202.1
K. Maafushi	2692	6881.8
R. Maakurathu	801	670.2
N. Maalhendhoo	667	577.2
B. Maalhos	485	717.1
AA. Maalhos	426	688.3
HA. Maarandhoo	668	577.2
SH. MaaunGoodho	792	796.3
R. Maduvvari	1479	1473.9
N. Magoodhoo	258	639.1
HDH. Makunudhoo	1235	1389.9
K. Malé	127079	336961
N. Manadhoo	1408	3708
SH.Maroshi	443	526.1
AA. Mathiveri	578	1088.7
R. Meedhoo	1661	1707.7
N. Miladhoo	809	836
SH. Milandhoo	1889	2137
HA. Mulhadhoo	231	291.9
HA. Muraidhoo	464	411.4
LH. Naifaru	4141	5346.8
SH. Narudhoo	490	334.094
HDH. Naivaadhoo	416	457.6
HDH. Nellaidhoo	860	1228.6
HDH. Neykurendhoo	750	656.3
HDH. Nolvivaramu	1889	1492.2
HDH. Nolvivaranfaru	1030	1132.7
SH. Noomaraa	343	319.4
LH. Olhuvelifushi	519	688.3
AA. Rasdhoo	1065	2497.1
R. Rasgetheemu	509	557
R. Rasmaadhoo	512	508.2
TH. Buruni	339	417.2

TH. Dhiyamigili	562	497
TH. Gaadhiffushi	270	229.4
TH. Guraidhoo	1317	3345.7
TH. Hirilandhoo	1033	2650.2
TH. Kandoodhoo	430	506.2
TH. Kinbidhoo	783	739
TH. Madifushi	821	822.4
TH. Omadhoo	455	478.5
TH. Thimarafushi	1167	1778.3
TH. Vandhoo	290	480.5
TH. Veymandoo	1119	1457.3
TH. Vilufushi	1097	1209.9
HA. Thakandhoo	355	611
AA. Thoddoo	1320	1941.4
B. Thulhaadhoo	1505	1827.1
K. Thulusdhoo	1388	2881.6
HA. Thuraakunu	417	479.6
AA. Ukulhas	918	1398.3
HA. Uligamu	380	435.8
R. UnGoofaaru	1503	2904.8
HA. Utheemu	593	633.5
V. Felidhoo	516	948.9
V. Fulidhoo	360	553.5
V. Keyodhoo	657	730.6
V. Thinadhoo	132	705.4
R. Vaadhoo	397	419.9
HDH. Vaikaradhoo	785	772.9
HA. Vashafaru	449	464.8
N. Velidhoo	1987	2529.9
K. Villimalé	7790	12499.4

## 9.3 Encuesta Delphi 1ra Ronda

### Consulta a expertos para la creación del Índice de Aislamiento Energético Insular

El siguiente documento tiene como objeto consensuar las opiniones de expertos en el área de Energía y Sustentabilidad, respecto a elementos que permitan diagnosticar el nivel de aislamiento energético en islas, a través de un indicador compuesto.

Para esto, se ha definido el aislamiento energético insular como: **la carencia en el acceso a un conjunto de fuentes y/o servicios energéticos, propiciado por las condiciones territoriales inherentes a una isla.**

En el contexto de este trabajo se reconocen 4 dimensiones (categorías) que intervienen en la problemática: Electricidad, Combustibles, Aislamiento Territorial y Potencial Energético Renovable. En la siguiente figura se presentan las 4 dimensiones (categorías), acompañados de los indicadores que se han definido para cada una de ellas.

Categoría	Sub-categoría	Indicador
Electricidad	Acceso al suministro eléctrico	Disponibilidad de electricidad
		Distancia a Subestación de distribución más cercana
Combustibles	Dependencia de combustibles importados para generación eléctrica	Cantidad de combustibles importados per cápita para generación eléctrica
	Combustibles Líquidos	Disponibilidad de combustibles líquidos
	GLP	Disponibilidad de GLP
Aislamiento Territorial	Aislamiento Territorial	Aislamiento Territorial
Potencial Renovable	Potencial eólico	Velocidad del viento
	Potencial solar	Irradiancia Global Horizontal

Cabe señalar que los indicadores fueron seleccionados, considerando que deben recoger una realidad local. Por lo mismo, se diseñaron en base a variables que pueden ser calculadas al nivel geográfico insular.

El proceso de consulta consta de dos rondas, en las que se le solicitará indicar el orden de importancia de los elementos en cuestión, para la creación del índice. Se le solicita completar la planilla Excel, adjunta a este correo, siguiendo las instrucciones de cada caso.

Una síntesis de los resultados de la primera ronda de consulta será informada conjuntamente a la entrega del cuestionario de la segunda ronda, de manera de compartir aquellos elementos en los que existió consenso o disenso. En cada pregunta existe la posibilidad de que exprese sus comentarios, si así lo estima conveniente.

