



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

BIOLAND3 - Metodología para el dimensionamiento,
gestión y control ambiental de vertederos de residuos
sólidos urbanos.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Suarez Romero, Patricio

Tutor/a: Rodrigo Clavero, María Elena

Director/a Experimental: ROMERO HERNANDEZ, CLAUDIA PATRICIA

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Trabajo Fin de Máster

BIOLAND3 - Metodología para el dimensionamiento, gestión y control ambiental de vertederos de residuos sólidos urbanos

Intensificación: *ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS*

Autor:

PATRICIO SUÁREZ ROMERO

Tutora:

MARÍA ELENA RODRIGO CLAVERO

Directora experimental:

CLAUDIA PATRICIA ROMERO HERNÁNDEZ

JUNIO 2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: BIOLAND3 - Metodología para el dimensionamiento, gestión y control ambiental de vertederos de residuos sólidos urbanos

Título del TFM en inglés: BIOLAND3 - A methodology for dimensioning, managing and environmental monitoring of urban solid waste landfills

Título del TFM en valenciano: BIOLAND3 – Metodologia per al dimensionament, la gestió i el control ambiental d'abocadors de residus sòlids urbans

Alumno: Patricio Suárez Romero

Tutor: María Elena Rodrigo Clavero

Director experimental: Claudia Patricia Romero Hernández

Fecha de Lectura:

Resumen

En español

El depósito en vertedero es actualmente la técnica de eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU) más utilizada: se estima que alrededor del 40-45% de los RSU generados se depositan en vertedero, tras su paso por una planta de tratamiento.

El control ambiental de un vertedero es fundamental para garantizar el equilibrio de los ecosistemas y la protección del medio ambiente. Desde esta perspectiva, los vertederos representan una de las mayores fuentes potenciales de contaminación medioambiental. Un mal diseño y gestión de estas infraestructuras puede comprometer la calidad del suelo y del agua subterránea debido a posibles fugas de lixiviados y emisión de gases, así como efectos indirectos sobre el territorio que lo rodea.

La selección del área de emplazamiento de un vertedero y su dimensionamiento representan un importante problema a tratar por las autoridades encargadas de su gestión, debido a que, en muchas ocasiones, los vertederos existentes se encuentran cerca de su capacidad máxima. Como consecuencia, en los últimos años se ha observado un incremento en la demanda de sitios adecuados para el emplazamiento de vertederos.

Otro aspecto importante a considerar acerca de los vertederos es la producción y captación del biogás resultante de la descomposición anaerobia de la materia orgánica presente en los residuos. Los componentes mayoritarios del biogás son el metano y el dióxido de carbono. En función de la riqueza en metano del biogás, este se puede considerar de alto valor y utilidad para la producción eléctrica, pudiendo constituir una nueva fuente de energía renovable, gracias a su alto poder calorífico.

Por todo lo anterior, es de suma importancia que estos emplazamientos tengan un diseño acorde a las necesidades de la población, siempre respetando el medio ambiente. En la fase de diseño de un nuevo vertedero, resulta fundamental disponer de herramientas de análisis y

modelación que permitan conocer con exactitud la cantidad de residuos que un vertedero recibirá y las condiciones físicas a las que los residuos estarán sometidos a lo largo de su vida útil.

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster (TFM) es establecer una metodología (BIOLAND3) que permita optimizar el diseño y la operación de vertederos de RSU. Dicha metodología deberá de ser capaz de lograr lo siguiente:

1. Estimar la cantidad de residuos que se producirán durante el periodo de operación del vertedero, en función de la población a la que dé servicio la infraestructura.
2. Calcular la máxima producción de biogás en condiciones óptimas de operación.
3. Llevar a cabo un monitoreo constante del estado ambiental del territorio donde se lleve a cabo la construcción del vertedero.

La primera parte de la metodología BIOLAND3 corresponde al cálculo de la producción de residuos futura, el cual se realizará a través de la combinación de tres elementos: (i) el concepto de “carga de población”, el cual engloba en un único parámetro los tres factores principales que definen la carga demográfica real de un territorio y que afectan a la producción de residuos (la población fija, la población no residente y la población asociada al turismo); (ii) una simulación estadística de la población que residirá en el área de estudio en los próximos años, basada en el método clásico de componentes y (iii) la proyección futura de la a tasa unitaria de generación de residuos.

La segunda parte de la metodología corresponde a la aplicación del modelo BIOLEACH, un modelo de gestión para vertederos de tipo biorreactor que permite estimar la producción conjunta de lixiviados y biogás en base a una adaptación de la ecuación de balance hídrico.

En la tercera parte, se utiliza el índice ambiental WEI que permite realizar un análisis ambiental de los usos de suelo del territorio basado en información que pueda ser integrada en un sistema de información geográfica, con el objetivo de determinar el impacto ambiental de medidas, acciones o políticas implementadas sobre el territorio, en este caso la construcción y gestión de un vertedero de RSU.

En valenciano

El dipòsit en abocador és actualment la tècnica d'eliminació de residus sòlids urbans (RSU) més utilitzada: s'estima que al voltant del 40-45% dels RSU generats es dipositen a l'abocador, després del pas per una planta de tractament.

El control ambiental d'un abocador és fonamental per garantir l'equilibri dels ecosistemes i la protecció del medi ambient. Des d'aquesta perspectiva, els abocadors representen una de les fonts potencials més grans de contaminació mediambiental. Un mal disseny i gestió d'aquestes infraestructures poden comprometre la qualitat del sòl i de l'aigua subterrània a causa de possibles fuites de lixiviats i emissió de gasos, així com efectes indirectes sobre el territori que l'envolta.

La selecció de l'àrea d'emplaçament d'un abocador i el seu dimensionament representen un problema que han de gestionar les autoritats encarregades de la seva gestió, ja que, moltes vegades, els abocadors existents són a prop de la capacitat màxima. Com a conseqüència, els darrers anys s'ha observat un increment en la demanda de llocs adequats per a l'emplaçament d'abocadors.

Un altre aspecte important a considerar als abocadors és la producció i captació del biogàs resultant de la descomposició anaeròbia de la matèria orgànica present als residus. Els components majoritaris del biogàs són el metà i el diòxid de carboni i poden constituir una nova font d'energia renovable. En funció de la riquesa en metà del biogàs, aquest gas es considera d'alt valor i utilitat per a la producció elèctrica gràcies al seu alt poder calorífic.

Per tot això, és molt important que aquests emplaçaments tinguin un disseny d'acord amb les necessitats de la població i respectant el medi ambient. A la fase de disseny d'un nou abocador, resulta fonamental disposar d'eines d'anàlisi i modelació que permetin conèixer amb exactitud la quantitat de residus que un rebedor rebrà i les condicions físiques a què els residus estaran sotmesos al llarg de la seva vida útil .

L'objectiu d'aquest treball final de màster (TFM) és establir una metodologia (BIOLAND3) que permeti optimitzar el disseny i l'operació d'abocadors de RSU. Aquesta metodologia haurà de ser capaç d'aconseguir el següent:

1. Estimar la quantitat de residus que es produiran durant el període d'operació de l'abocador, en funció de la població a qui serveixi la infraestructura.
2. Calculeu la màxima producció de biogàs en condicions òptimes d'operació.
3. Dur a terme una monitorització constant de l'estat ambiental del territori on es dugui a terme la construcció de l'abocador.

La primera part de la metodologia BIOLAND3 correspon al càlcul de la producció de residus futura, el qual es realitzarà a través de la combinació de tres elements: (i) el concepte de "càrrega de població", el qual engloba en un únic paràmetre els tres factors principals que defineixen la càrrega demogràfica real d'un territori i que afecten la producció de residus (la població fixa, la població no resident i la població associada al turisme); (ii) una simulació estadística de la població que residirà a l'àrea d'estudi en els propers anys, basada en el mètode clàssic de components i (iii) la projecció futura de la taxa unitària de generació de residus.

La segona part de la metodologia correspon a l'aplicació del model BIOLEACH, un model de gestió per abocadors de tipus bioreactor que permet estimar la producció conjunta de lixiviats i biogàs basant-se en una adaptació de l'equació de balanç hídric.

A la tercera part, s'utilitza l'índex ambiental WEI que permet fer una anàlisi dels usos de sòl del territori basat en informació que es pugui integrar en un sistema d'informació geogràfica, amb l'objectiu de determinar l'impacte ambiental de mesures, accions o polítiques implementades sobre el territori, en aquest cas la construcció i la gestió d'un abocador de RSU.

En inglés

Landfilling is currently the most widely used municipal solid waste (MSW) disposal technique: it is estimated that around 40-45% of generated MSW is landfilled after passing through a treatment plant.

An adequate environmental control of a landfill is essential to guarantee the integrity of the ecosystems and the protection of the environment. From this perspective, landfills represent one of the largest potential sources of environmental pollution. A poor design and management strategy of these infrastructures can compromise the quality of the soil and groundwater that surround it due to possible leachate leaks and gas emissions, as well as indirect effects on the surrounding territory.

Finding suitable MSW disposal sites of adequate size represents an important problem to be managed by the authorities in charge of its management, due to the fact that, on many occasions, the existing landfills are close to their maximum capacity. As a consequence, in recent years there has been an increase in the demand of suitable sites for the emplacement of landfills.

Another important aspect to consider about MSW landfills, is the production and collection of biogas resulting from the anaerobic decomposition of organic matter present in the waste. The main components of biogas are methane and carbon dioxide. Based on the methane richness of the biogas, this gas can be considered to be of high value and utility for electricity production, which may constitute a new source of renewable energy thanks to its high calorific value.

For all of the above, it is extremely important for these sites to be designed based on the needs of the population and the environment. In the design phase of a new landfill, it is essential for the designers to have the analysis and modeling tools that they know exactly the amount of waste that a landfill will receive and the physical conditions to which the waste will be subjected throughout its operational phase.

The objective of this Master's Thesis (TFM) is to establish a methodology (BIOLAND3) for optimizing the design and operation of MSW landfills. This methodology must be able to achieve the following:

1. Estimate the amount of waste that will be produced during the landfill's operational phase, based on the population served by the infrastructure.
2. Calculate the maximum production of biogas in optimal operating conditions.
3. Carry out constant monitoring of the environmental status of the area where the construction of the landfill is carried out.

The first part of the BIOLAND3 methodology corresponds to the calculation of future waste production, which will be carried out through the combination of three elements: (i) the concept of "population load", which encompasses in a single parameter the three main factors that define the real demographic load of a territory and that affect the production of waste (the fixed population, the non-resident population and the population associated with

tourism); (ii) a statistical simulation of the population that will reside in the study area in the coming years, based on the classical cohort-component method and (iii) the future projection of the waste generation rate per individual.

The second part of the methodology corresponds to the application of the BIOLEACH model, a management model for bioreactor-type landfills that allows estimating the joint production of leachate and biogas based on an adaptation of the water balance equation.

In the third part, the weighted environmental index is used, which allows the user to make an environmental analysis of the land use cover of the territory based on information that can be integrated into a geographic information system, with the aim of determining the environmental impact of measures, actions or policies implemented on the territory, in this case the construction and management of a MSW landfill.

Palabras clave español: vertedero, residuos, población, biogás, indicador

Palabras clave valenciano: abocador, residus, població, biogàs, indicador

Palabras clave inglés: landfill, waste, population, biogas, indicator

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2.	LEGISLACIÓN APLICABLE	3
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PLAN ZONAL 1	5
3.	ESTADO DEL ARTE	7
3.1.	INTRODUCCIÓN	7
3.2.	VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	7
3.2.1.	Residuos sólidos urbanos	7
3.2.1.1.	Composición de los residuos	8
3.2.1.2.	Flujo de los residuos	8
3.2.2.	Principales problemas ambientales de los vertederos	9
3.3.	PRODUCCIÓN DE RESIDUOS	10
3.3.1.	Proyecciones de población	13
3.3.1.1.	Población fija	13
3.3.1.2.	Población no residente	19
3.3.1.3.	Población asociada al turismo	19
3.3.2.	Proyección de la tasa de producción de residuos	19
3.3.3.	Proyección de la tasa de vertido de residuos	19
3.4.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	20
3.4.1.	Componentes del biogás	21
3.4.2.	Proceso de generación de biogás	21
3.4.3.	Modelación de la producción de biogás	22
3.4.3.1.	Modelos de producción de biogás	23
3.5.	INDICADORES E ÍNDICES	30
3.5.1.	Indicadores e índices ambientales	31
3.5.1.1.	Índices ambientales basados en usos de suelo	32
4.	BIOLAND3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	39
4.1.	JUSTIFICACIÓN	39

4.2.	DIMENSIONAMIENTO DE VERTEDEROS (CÁLCULO DE RESIDUOS VERTIDOS)	40
4.2.1.	Proyección de la carga de población	42
4.2.1.1.	Proyección de la Población fija	43
4.2.1.2.	Proyección de población no residente	45
4.2.1.3.	Proyección de población asociada al turismo.....	47
4.2.1.4.	Carga de población futura	48
4.2.2.	Proyección del comportamiento de los residuos	49
4.2.2.1.	Proyección de la tasa unitaria de generación de RSU	49
4.2.2.2.	Proyección de la tasa unitaria de vertido de RSU.....	49
4.2.3.	Estimación de los RSU vertidos.....	50
4.2.4.	Volumen necesario para el emplazamiento (dimensionamiento).....	51
4.3.	GENERACIÓN DE BIOGÁS	51
4.3.1.	Modelo BIOLEACH.....	52
4.3.1.1.	Cálculo de la máxima producción de biogás	53
4.4.	MONITORIZACIÓN AMBIENTAL.....	58
4.4.1.	Índice ambiental WEI	59
4.4.1.1.	Índice Ambiental WEI y usos de suelo SIOSE	60
4.4.1.2.	Aplicación del Índice WEI.....	62
4.5.	MODELO CONCEPTUAL BIOLAND3.....	63
5.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE BIOLAND3	65
5.1.	ÁREA DE ESTUDIO	65
5.1.1.	Zona Castellón 1	65
5.1.1.1.	Demografía ZC1.....	67
5.1.1.2.	Producción de residuos ZC1.....	68
5.2.	CALCULO DE RESIDUOS VERTIDOS.....	70
5.2.1.	Periodo Proyectivo.....	70
5.2.2.	Proyección de la carga de población	70

5.2.2.1.	Proyección de la Población fija	70
5.2.2.2.	Proyección de población no residente	88
5.2.2.3.	Proyección de población asociada al turismo.....	91
5.2.2.4.	Carga de población futura	94
5.2.3.	Proyección del comportamiento de los residuos	95
5.2.3.1.	Proyección de la tasa unitaria de generación de RSU	95
5.2.3.2.	Proyección de la tasa unitaria de vertido de RSU.....	95
5.2.4.	Estimación de los RSU vertidos.....	98
5.2.5.	Volumen necesario para el emplazamiento (dimensionamiento).....	99
5.3.	GENERACIÓN DE BIOGÁS	100
5.3.1.	Recopilación de información	100
5.3.1.1.	Cuantificación y caracterización de los RSU	100
5.3.1.2.	Aplicación del modelo BIOLEACH	104
5.4.	MONITORIZACIÓN AMBIENTAL	109
5.4.1.	Recopilación de información	109
5.4.2.	Aplicación del Índice WEI.....	110
5.4.3.	Resultados y conclusiones.....	111
6.	CONCLUSIONES	117
7.	LÍNEAS DE FUTURA INVESTIGACIÓN	119
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.- Esquema de flujo de los RSU recogidos en masa.....	9
Figura 3.2.- Proceso de elaboración de índices	31
Figura 4.1.- Esquema general de la metodología BIOLAND3	40
Figura 4.2.- Esquema metodológico propuesto para el dimensionamiento de vertederos.	42
Figura 4.3.- Diagrama de flujo del módulo de producción de biogás propuesto del modelo BIOLEACH.....	53
Figura 4.4.- Modelo de degradación triangular para los RRB.....	57
Figura 4.5.- Modelo de degradación triangular para los RLB.....	58
Figura 4.6.- Metodología para el monitoreo ambiental de vertederos.....	59
Figura 4.7.- Modelo conceptual de BIOLAND3	64
Figura 5.1.- Ámbito territorial de la Zona Castellón 1	66
Figura 5.2 - Población empadronada Zona Castellón 1 (1998-2021).....	68
Figura 5.3.- Kg de residuos generados en la ZC1 (2014-2020)	69
Figura 5.4.- Distribución mensual promedio de la producción de residuos en la ZC1	69
Figura 5.5.- Distribución por edades y número de habitantes de la población empadronada en la ZC1	72
Figura 5.6.- Tasa de Fecundidad por edad en la ZC1 (2021-2034).....	74
Figura 5.7.- Tasa de Mortalidad por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034).....	75
Figura 5.8.- Tasa de Mortalidad por edad para hombres en la ZC1 (2021-2034).....	76
Figura 5.9.- Tasa de emigración con destino al extranjero por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034).....	77
Figura 5.10.- Tasa de emigración con destino al extranjero por edad para hombres en la ZC1 (2021-2034).....	78
Figura 5.11.- Flujos de inmigración procedentes del extranjero por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034).....	79
Figura 5.12.- Flujos de inmigración procedentes del extranjero por edad para para hombres en la ZC1 (2021-2034).....	80
Figura 5.13.- Flujos de inmigración procedentes del extranjero para mujeres y hombres en la ZC1 (2021-2034).....	80
Figura 5.14.- Tasas de inmigración interprovincial por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034).....	82
Figura 5.15.- Tasas de inmigración interprovincial por edad para hombres en la ZC1 (2021-2034).....	82

Figura 5.16.- Flujos de inmigración interprovincial por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034)	84
Figura 5.17.- Flujos de inmigración interprovincial por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034)	84
Figura 5.18.- Flujos de inmigración interprovincial para mujeres y hombres en la ZC1 (2021-2034)	85
Figura 5.19.- Proyección de la población fija (2021-2034)	87
Figura 5.20.- Población fija histórica (1998-2020) y proyectada para la ZC1 (2021-2034)	87
Figura 5.21.- Población fija histórica (1998-2020) y proyectada para la provincia de Castellón (2021-2034)	88
Figura 5.22.- Proyección de la población no residente para la ZC1 (2021-2034)	90
Figura 5.23.- Proyección de la población no residente para la ZC1 (2021-2034)	93
Figura 5.24.- Estimación de la Carga de Población para la ZC1 (2021-2034)	94
Figura 5.25.- Proyecciones del porcentaje de residuos destinados a depósito controlado para la ZC1 (2003-2034)	97
Figura 5.26.- Proyección de la tasa unitaria de vertido para la ZC1 (2021-2034)	98
Figura 5.27.- Composición de los RSU inicial, utilizada para la modelación de la producción de biogás	101
Figura 5.28.- Composición de los RSU inicial (peso húmedo), utilizada para la modelación de la producción de biogás	101
Figura 5.29.- Composición química de los RSU caracterizados según el tipo de RSU, (RRB, RLB, RNB)	102
Figura 5.30.- Composición química de los RRB y RLB caracterizados según su porcentaje en peso (base seca)	102
Figura 5.31.- Cálculo de la ecuación estequiométrica	104
Figura 5.32.- Volumen de biogás producido para los RRB y RLB	105
Figura 5.33.- Agua consumida en la formación de biogás por kg de RSU	105
Figura 5.34.- Vapor de agua producido por m ³ de biogás	105
Figura 5.35.- Proyección de la tasa mensual de producción de biogás para los RRB	106
Figura 5.36.- Proyección de la tasa mensual de producción de biogás para los RLB	106
Figura 5.37.- Tasa de generación óptima de biogás para los RRB y RLB generados en la ZC1 (2021-2046)	107
Figura 5.38.- Tasa de generación óptima de biogás para los RRB y RLB generados en la ZC1 (primeros 10 años)	108

Figura 5.39.-Producción acumulada de biogás en condiciones óptimas (2021-2046)	108
Figura 5.40.- Usos de suelo (SIOSE) para el área asociada al vertedero de Cervera del Maestre (2005).....	110
Figura 5.41.- Valores del WEI en el vertedero de Onda (2005).....	111
Figura 5.42 Evolución del valor medio del WEI para los vertederos estudiados.....	112
Figura 5.43.- Evolución de los valores promedio del índice WEI para los vertederos estudiados (2005-2015)	113
Figura 5.44.- Función de distribución acumulada del índice WEI promedio para los años 2005, 2009 y 2015, incluyendo los valores máximos y mínimos históricos.	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Composición y generación de residuos en España (2006).....	8
Tabla 3.2.- Valor ambiental en función del rango del WEI	38
Tabla 4.1.- Densidad de los residuos según el método de depósito	51
Tabla 4.2.- Composición por categorías de RSU propuesta en BIOLEACH.....	54
Tabla 4.3 - Composición por categorías de los RRB y RLB.....	55
Tabla 4.4 –Valores asociados a los factores de evaluación (F_i) y los valores finales del índice WEI (WEI_k) para cada una de las clases existentes en la base de datos de uso de suelo de SIOSE.....	60
Tabla 5.1 - Municipios ZC1	66
Tabla 5.2.- Población empadronada Zona Castellón 1, 1998-2021.....	67
Tabla 5.3.- Indicador coyuntural de fecundidad y edad media a la maternidad, año 2019	73
Tabla 5.4.- Resultados de la encuesta a expertos para el ICF y el EMM futuros.....	73
Tabla 5.5.- Esperanza de vida para hombres y mujeres del año 2019.....	75
Tabla 5.6.- Resultados de la encuesta a expertos para la esperanza de vida futura.....	75
Tabla 5.7.- Resultados de la proyección de la población fija para el periodo 2021-2034.....	86
Tabla 5.8 - Población no residente asociada a la ZC1 (2011)	89
Tabla 5.9 – Pernoctaciones anuales de la población no residente asociada a la ZC1 (2011).....	89
Tabla 5.10 – Población fija empadronada en la ZC1 (2011).....	89
Tabla 5.11.- Proyección de la población no residente para la ZC1 (2021-2034).....	90
Tabla 5.12.- Número de plazas disponibles para la ZC1 de acuerdo al tipo de alojamiento (2020)	91
Tabla 5.13.- Grado de ocupación promedio anual por tipo de alojamiento para la Comunidad Valenciana	91
Tabla 5.14.- Pernoctaciones anuales según alojamiento para la población asociada a la ZC1 (2020)	92
Tabla 5.15.- Población fija empadronada en la ZC1 (2020).....	92
Tabla 5.16.- Proyección de la población no residente para la ZC1 (2021-2034).....	93
Tabla 5.17.- Estimación de la Carga de Población para la ZC1 (2021-2034).....	94
Tabla 5.18.- Cálculo de la tasa unitaria de generación de residuos para la ZC1 (2020)	95
Tabla 5.19.- Proyección del porcentaje de residuos destinados a depósito controlado para la ZC1 (2003-2020)	96
Tabla.5.20.- Proyección del porcentaje de residuos destinados a depósito controlado para la ZC1 (2021-2034)	96
Tabla 5.21.- Proyección de la tasa unitaria de vertido para la ZC1 (2021-2034).....	97

Tabla 5.22.- Proyección de los RSU vertidos en la ZC1 (2021-2034).....	99
Tabla 5.23 – Proyección mensual de los RSU depositados en vertedero para la ZC1 (2021-2034)	103
Tabla 5.24 - Ubicación de los vertederos analizados	109
Tabla 5.25.- Valores medios del índice WEI para los vertederos estudiados en los años 2005, 2009 y 2015	112
Tabla 5.26.- Diferencias entre los valores medios del WEI para los vertederos estudiados durante los periodos 2005-2009, 2009-2015 y 2005-2015	113
Tabla 5.27.- Evolución de valores medios del WEI por deciles para los vertederos estudiados, durante los periodos 2005-2009, 2009-2015 y 2005-2015	114

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El diseño, las estrategias de gestión y el monitoreo ambiental son algunos de los aspectos principales a considerar cuando se busca llevar a cabo la construcción futura de un vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU).

En relación al diseño de vertederos, la selección del área de emplazamiento de un vertedero y su dimensionamiento representan un importante problema a tratar, debido a que, actualmente, muchos de los vertederos existentes se encuentran cerca de su capacidad máxima. No obstante, para diseñar adecuadamente un vertedero, antes es necesario llevar a cabo un cálculo preciso de la cantidad de residuos que éste recibirá a lo largo de su vida útil. Este cálculo depende de múltiples factores, como las políticas de gestión y reciclaje, los cambios en los hábitos de consumo y, principalmente, depende de la proyección de la población futura que generará dichos residuos. Este último factor corresponde a la componente principal en la producción de residuos, la cual determinará las bases para un adecuado diseño del vertedero, debiendo en todo momento considerar los aportes externos que pueda generar la población asociada al turismo y la población no residente. Actualmente, la legislación española no establece ninguna regulación con respecto al dimensionamiento de vertederos.

En materia de gestión, uno de los aspectos fundamentales que se debe considerar durante la fase de explotación de los vertederos corresponde a la gestión del biogás producido por la descomposición de la materia orgánica contenida en los residuos. Esto se debe a los importantes riesgos y oportunidades que representa la generación de dichos gases, principalmente por su alta capacidad calorífica y sus potenciales efectos sobre la capa de ozono. En relación a esto, el Real Decreto 646/2020 establece que, como parte de la gestión de vertederos, *“se deberán tomar medidas adecuadas para controlar la acumulación y emisión de gases de vertedero, a ser posible comenzando desde la fase de explotación, hasta su clausura”*. Además, se establece que la recogida, tratamiento y aprovechamiento del biogás *“se deberá llevar a cabo de forma tal que se reduzca al mínimo el daño o deterioro del medio ambiente y el riesgo para la salud humana, teniendo en especial consideración la contribución al cambio climático”*.

Por otra parte, contar con un adecuado control ambiental de los efectos producidos, como resultado de las operaciones asociadas al vertido de RSU en depósitos controlados, es fundamental para garantizar el equilibrio de los ecosistemas y la protección del medio ambiente. Desde esta perspectiva, los vertederos representan una de las mayores fuentes potenciales de contaminación medioambiental. Un mal diseño y gestión de estas infraestructuras puede comprometer la calidad del suelo y del agua subterránea debido a posibles fugas de lixiviados y emisión de gases, así como efectos indirectos sobre el territorio que lo rodea. En su artículo 15, el Real Decreto 646/2020 establece que *“la entidad explotadora de un vertedero llevará a cabo durante la fase de explotación un programa de control y vigilancia específico”* y que dicha entidad deberá notificar a la autoridad competente y a otras entidades todo efecto negativo significativo sobre el medio ambiente que haya sido detectado a través de los procedimientos de control y vigilancia. Además, el Real Decreto 646/2020 establece que *“al menos una vez al año, la entidad explotadora, basándose en datos agregados, informará de los resultados de la vigilancia y control a las*

autoridades competentes” a fin de demostrar que se cumplen las condiciones mínimas, establecidas a partir de la autorización y de mejorar el conocimiento del comportamiento de los residuos en los vertederos.

Contar con herramientas adecuadas para cuantificar y gestionar los residuos que son depositados en vertederos y los productos que se generan a partir de su descomposición permitirá que dichos emplazamientos puedan operar de manera más sostenible, generando un servicio a la población que permita minimizar el impacto ambiental que se genera a través de la eliminación de los residuos.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es presentar BIOLAND3, una metodología que permite optimizar el dimensionamiento, gestión y control ambiental de vertederos de RSU a través de la integración de tres herramientas principales de análisis y modelación, con las cuales deberá ser posible:

1. Estimar la cantidad de residuos que serán vertidos durante el periodo de operación del vertedero, en función de la población a la que dé servicio la infraestructura.
2. Calcular la máxima producción de biogás en condiciones óptimas de operación.
3. Monitorizar de forma constante el estado ambiental del territorio en el que se implante el vertedero.

La metodología planteada se ha aplicado al análisis del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos del Plan Zonal 1 de la Comunidad Valenciana, que engloba 49 municipios del norte de la provincia de Castellón.

El presente documento se estructura en los siguientes capítulos:

- En el capítulo 1 se presenta la introducción y los objetivos a desarrollar.
- El capítulo 2 resume la legislación vigente en materia de eliminación de residuos sólidos en vertederos.
- En el capítulo 3 se analiza el estado del arte en materia de vertederos de RSU, métodos de estimación de la producción de residuos, métodos de estimación de la producción de biogás y métodos de monitoreo ambiental.
- El capítulo 4 presenta en detalle el esquema metodológico propuesto de BIOLAND3.
- En el capítulo 5 se describe la aplicación práctica: el análisis del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos del Plan Zonal 1 de la Comunidad Valenciana.
- En el capítulo 6 se muestran las conclusiones del trabajo.
- El capítulo 7 incluye las líneas de futura investigación.
- En el capítulo 8 se presentan las referencias utilizadas para la realización del presente TFM.

2. LEGISLACIÓN APLICABLE

Actualmente, en España, la legislación vigente en materia de diseño y gestión de vertederos es el Real Decreto 646/2020, del 8 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en el vertedero [1].

Dicho Real Decreto es la transposición al ordenamiento jurídico español de la Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, relativa al vertido de residuos, la cual establece un régimen concreto para la eliminación de los residuos mediante su depósito en vertederos. Dicho esto, el Real Decreto 646/2020 tiene por objeto:

- a) *“Establecer un marco jurídico y técnico adecuado para las actividades de eliminación de residuos mediante depósito en vertederos de conformidad con la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados al tiempo que regula las características de los vertederos y su correcta gestión y explotación.”*
- b) *“Garantizar una reducción progresiva de los residuos depositados en vertedero, especialmente de aquellos que son aptos para su preparación para la reutilización, reciclado y valorización, mediante el establecimiento de requisitos técnicos y operativos rigurosos aplicables tanto a los residuos como a los vertederos.”*
- c) *“Establecer medidas y procedimientos para prevenir, reducir e impedir, tanto como sea posible, los efectos negativos en el medio ambiente relacionados con el vertido de residuos, en particular, la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, del suelo y del aire, y la emisión de gases de efecto invernadero, así como cualquier riesgo derivado para la salud de las personas. Todo ello tanto durante la fase de explotación de los vertederos una vez ha concluido la vida útil de estos.”*

El objetivo principal que persigue esta normativa es avanzar hacia una economía circular, y cumplir con la jerarquía de residuos y con los requisitos de eliminación establecidos en los artículos 8 y 27 de la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular [2].

En el marco de la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, el Real Decreto 646/2020 responde a la necesidad de recoger la experiencia jurídica y técnica acumulada sobre la gestión de los residuos mediante depósito en vertederos en España, de desarrollar y aplicar la Ley 7/2022, de 8 de abril, y de transponer la Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo del 30 de mayo de 2018. Asimismo, el Real Decreto 646/2020 delimita los criterios técnicos mínimos para el diseño, construcción, explotación, clausura y mantenimiento de vertederos. También aborda la adaptación de los vertederos existentes a las exigencias del Real Decreto y los impactos ambientales a considerar en la nueva situación.

En materia de monitoreo de vertederos, en su artículo 15, el Real Decreto 646/2020 establece que los procedimientos de control y vigilancia necesarios para la fase de explotación de un vertedero deberán cumplir, al menos, los siguientes requisitos:

- a) *“La entidad explotadora de un vertedero llevará a cabo durante la fase de explotación un programa de control y vigilancia, tal como se especifica en el anexo III.”*
- b) *“La entidad explotadora notificará sin demora a la autoridad competente, así como al titular del vertedero y a la entidad local donde este se ubica, todo efecto negativo significativo sobre el medio ambiente puesto de manifiesto en los procedimientos de control y vigilancia, y acatará la decisión de dicha autoridad sobre la naturaleza y el calendario de las medidas correctoras que deban adoptarse; dichas medidas se pondrán en práctica a expensas de la entidad explotadora.”*

Además, el Real Decreto 646/2020 establece que, *“con una frecuencia que determinará la autoridad competente y, en cualquier caso, al menos una vez al año, la entidad explotadora, basándose en datos agregados, informará de los resultados de la vigilancia y control a dicha autoridad y al titular del vertedero, a fin de demostrar que se cumplen las condiciones de la autorización y de mejorar el conocimiento del comportamiento de los residuos en los vertederos.”*

Por otra parte, en el texto del articulado del Real Decreto 646/2020, la gestión de biogás aparece nombrada en su artículo 14 de la siguiente forma:

“Anexo I. Apartado 4. Control de gases.

Se tomarán las medidas adecuadas para controlar la acumulación y emisión de gases de vertedero. Cuando sea técnicamente viable dichas medidas serán adoptadas durante la fase de explotación de los vertederos sin esperar a su clausura.

En todos los vertederos que reciban residuos biodegradables se recogerán los gases de vertedero, se tratarán y se aprovecharán. Si el gas recogido no puede ser aprovechado para ser inyectado en la red gasista, como combustible vehicular o para producir energía, se deberá oxidar mediante antorchas u otros sistemas de oxidación pasiva en aquellos vertederos que presenten tasas marginales de generación de biogás que hagan técnicamente inviable el funcionamiento de las antorchas (por ejemplo, cubiertas oxidativas).

La recogida, tratamiento y aprovechamiento de gases de vertedero se llevará a cabo de forma tal que se reduzca al mínimo el daño o deterioro del medio ambiente y el riesgo para la salud humana, teniendo en especial consideración la contribución al cambio climático.”

Habiendo establecido el marco legal a nivel estatal, se procede a mencionar la legislación en materia de gestión de residuos vigente en la Comunidad Valenciana, la cual corresponde a la Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana [3].

Los objetivos generales de la ley son:

- a) *“Garantizar que los residuos se gestionen sin poner en peligro la salud humana, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos de la Comunidad Valenciana.”*
- b) *“Dar prioridad a las actuaciones tendentes a prevenir y reducir la cantidad de residuos generados y su peligrosidad.”*

- c) *“Obtener un alto nivel de protección, utilizando procedimientos o métodos que no provoquen incomodidad por el ruido o los olores, no atenten contra los paisajes o lugares de especial interés, ni perjudiquen el medio ambiente creando riesgos para el agua, el aire, el suelo, la flora y la fauna.”*
- d) *“Desarrollar instrumentos de planificación, inspección y control que favorezcan la suficiencia, seguridad y eficiencia de las actividades de gestión de los residuos.”*
- e) *“Asegurar la información a los ciudadanos sobre la acción pública en materia de gestión de los residuos, promoviendo su participación en el desarrollo de las acciones previstas.”*

En el marco del objetivo d), en la Ley 10/2000 se prevé que en el ámbito autonómico existan dos tipos de planes de gestión: el Plan Integral de Residuos (PIRCV) [4], y los Planes Zonales, ambos de obligado cumplimiento para todas las administraciones públicas y particulares, mediante los cuales se distribuyen en el territorio de la Comunidad Autónoma el conjunto de instalaciones necesarias para garantizar el respeto de los principios de autosuficiencia y proximidad por lo que debe regirse en la gestión de residuos.

Para ejemplificar el instrumento de aplicación más directo en el ámbito municipal (Planes Zonales), se aplicará la metodología objeto de este TFM en el Plan Zonal de Residuos de la Zona I de la Comunidad Valenciana [5].

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PLAN ZONAL 1

De acuerdo con la Ley 10/2000, *“la función de los planes zonales es desarrollar y mejorar las previsiones del Plan Integral de Residuos en aquellos casos en que se establece en la propia ley, o cuando la administración autonómica justificadamente así lo establezca”*. Mediante estos planes de residuos, la Generalitat Valenciana *“garantiza una adecuada dirección de la gestión de residuos en toda la Comunidad Valenciana.”*

El Plan de Residuos de la Zona I tiene por objeto *“desarrollar las previsiones en cuanto a gestión de residuos de la parte norte de la provincia de Castellón, en la que se incluyen las comarcas de Els Ports (Área 1), Alt Maestrat (Área 2), Baix Maestrat (Área 3) y parte de la Plana Alta (Área 5), junto con los municipios de Oropesa y Cabanes”*. Para ello, el plan analiza la situación actual y propone las mejoras que correspondan en cada uno de los sistemas de gestión que lo conforman.

El Plan Zonal I está constituido por un documento que incluye una memoria informativa, en la que se realiza un análisis y un diagnóstico sobre la gestión de residuos en la Zona I, lo cual se ve reflejado en una ordenanza donde se presentan las prescripciones necesarias para las operaciones de gestión de residuos y los planos de ordenación.

En su apartado 1.2, el Plan Zonal I lleva a cabo un análisis territorial de los emplazamientos, dentro del cual se busca determinar la ubicación óptima para el emplazamiento de vertederos de RSU. Los parámetros a considerar para la elección de los sitios óptimos se basan en los siguientes conceptos:

- La población equivalente de los centros urbanos de la zona y su ubicación espacial, llamado centro de gravedad.
- La aptitud geológica del terreno, especialmente en relación al coeficiente de permeabilidad. La caracterización deberá incluir un reconocimiento exhaustivo de la zona y la realización de sondeos para determinar la permeabilidad de los terrenos, teniendo en cuenta que el valor máximo, de acuerdo con la normativa vigente, es de 10^{-7} m/s.
- Transporte y accesibilidad, relacionado con la disponibilidad de vías de acceso o carreteras.
- Planeamiento municipal y usos del suelo en base a la normativa.
- La existencia de zonas de protección ambiental
- Protección de los núcleos urbanos, ubicando la infraestructura de vertido de residuos a más de 2.000 metros de los núcleos de población.
- Vías pecuarias y yacimientos arqueológicos, evitando su afección.
- Afecciones de carreteras y vías férreas.

En su apartado 1.3, el Plan Zonal realiza un análisis de la producción actual de los residuos y las previsiones a futuro con respecto al dimensionamiento de los vertederos. El cálculo de la producción se basa en la metodología planteada en el PIRCV.

Finalmente, en su apartado 1.3.4, el Plan Zonal establece los siguientes aspectos para los depósitos controlados de alta densidad, con respecto a la emisión de gases:

- *“Captación: todos los depósitos controlados que reciban residuos biodegradables captarán los gases emitidos a la atmósfera.”*
- *“Utilización: una vez recogidos, los gases se utilizarán para producir energía, o, si esto no fuera posible, se quemarán.”*
- *“Control: mensualmente se medirán los niveles de CH₄, CO₂, O₂, y presión atmosférica de cada sección representativa del depósito controlado y, dependiendo de la composición de los residuos, deberán analizarse también otros gases (H₂S, H₂, etc.). En función de los resultados de los análisis, la periodicidad del muestreo podrá ser mayor.”*

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la legislación ambiental vigente y de la legislación en materia de diseño y gestión de vertederos de RSU, los constantes cambios en las tendencias demográficas y los diversos problemas y oportunidades detectados asociados a los vertederos de RSU hacen necesario estudiar en detalle cuatro aspectos fundamentales del estado del arte que permitan alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo y desarrollar la metodología BIOLAND3: (i) vertederos de residuos sólidos urbanos, así como sus principales procesos y problemas; (ii) métodos de estimación de producción de residuos y su depósito en vertederos; (iii) métodos de estimación de la producción de biogás en vertederos, y (iv) métodos de monitorización ambiental del territorio.

3.2. VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Actualmente, los vertederos de residuos sólidos urbanos son la técnica de eliminación más habitualmente utilizada. A pesar de los esfuerzos por desarrollar alternativas de eliminación de residuos que consideren el aprovechamiento energético de los mismos (compostaje, biometanización, técnicas de incineración con recuperación de energía, fabricación de biocombustibles, etc.), se estima que alrededor del 40-45% de los RSU generados en España se sigue depositando en vertederos [6].

Por tanto, el control ambiental del vertedero es fundamental para garantizar el equilibrio de los ecosistemas y la protección del medio ambiente. De forma más precisa, la correcta gestión del lixiviado y del biogás, que se generan durante las fases de explotación y post-clausura de un vertedero, resulta crucial.

3.2.1. Residuos sólidos urbanos

La Ley 10/2000 de Residuos de la Comunidad Valenciana define, en su artículo 4.e), los residuos urbanos o municipales como:

- *“Los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y Servicios.”*
- *“Todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades.”*

A continuación, se analizan brevemente los aspectos fundamentales relacionados con la eliminación de residuos en vertedero controlado, partiendo de las características de los propios residuos, su esquema general de flujo y sus implicaciones y problemas ambientales derivados.

3.2.1.1. Composición de los residuos

La composición de los residuos es muy variable y en ella influyen factores muy diversos (económicos, sociales, ambientales) [7].

- Las características de la población: el tipo de población que genera los residuos, ya sea urbana o rural, con grandes áreas residenciales, turística o industrial, etc.
- La época de producción de los residuos: el clima y las estaciones influyen en la composición de los RSU
- El nivel social de la población: a mayor nivel social, mayor producción de residuos
- Los hábitos de consumo de la población

De acuerdo con los datos publicados en el Plan Nacional Integral de Residuos (2008-2015), la generación y composición de residuos en España tiene las características mostradas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1.- Composición y generación de residuos en España (2006)

<i>Componentes</i>	<i>Composición media (%)</i>	<i>Generación (2006) (t/año)</i>
Materia orgánica	48,9	11.222.843
Papel-Cartón	18,5	4.245.861
Plástico	11,7	2.685.220
Vidrio	7,6	1.744.246
Metales férricos	2,5	573.765
Metales no férricos	1,6	367.210
Maderas	0,6	137.704
Textiles	3,7	849.172
Complejos, celulosa	2,0	459.012
Otros	2,9	665.567
Totales	100	22.950.600

[8]

De acuerdo con lo anterior, es posible observar que el principal componente de los residuos corresponde a materia orgánica y papel-cartón. Estos componentes se corresponden con la mayoría de la fracción orgánica, la cual es la que se biodegrada en los vertederos y genera biogás.

3.2.1.2. Flujo de los residuos

Debido a que el flujo de residuos es un proceso que puede variar sustancialmente de un lugar a otro, no es posible generalizar dicho proceso a escala global o estatal. En este trabajo se ha optado por analizar el esquema general de flujo de los residuos urbanos de la Comunidad Valenciana, el cual comienza con el proceso de recogida, seguido de su transporte a plantas de compostaje, en las cuales se lleva a cabo una selección y separación de los residuos en tres categorías (valorizables, compost y rechazo), de las cuales la fracción de rechazo corresponde a la categoría que se considera apta para su eliminación (figura 3.1) [9].

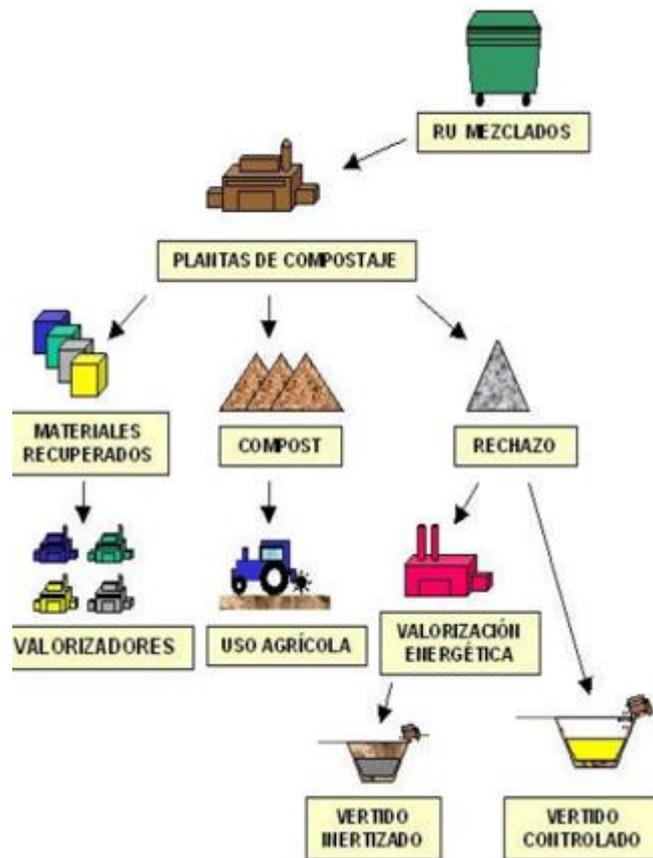


Figura 3.1.- Esquema de flujo de los RSU recogidos en masa. (PIRCV)[9]

La Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana establece la obligación de que “la eliminación de los residuos se realice mediante sistemas que acrediten la máxima seguridad con la mejor tecnología disponible”. La elección de las tecnologías de tratamiento corresponde a los consorcios y entidades competentes de la gestión de los residuos urbanos.

Es importante mencionar que dependiendo la zona en la que se lleve a cabo el análisis, el esquema general de flujo podrá variar, por lo que es posible que se tengan que llevar a cabo diferentes consideraciones para el diseño y gestión de los vertederos de RSU.

3.2.2. Principales problemas ambientales de los vertederos

A pesar del hecho de que actualmente las tendencias evidencian un aumento en el porcentaje de residuos reciclados, reusados y valorizados energéticamente, los vertederos de RSU aún juegan un papel importante dentro de las estrategias de gestión de residuos. No obstante, el uso de dichos emplazamientos conlleva efectos negativos asociados a distintos problemas ambientales. En primera instancia, la degradación de los desechos tiene como resultado la generación de lixiviados

y gases, los cuales representan importantes amenazas a la salud humana y a la calidad de los ecosistemas.

Cabe destacar que, si bien existen muchos impactos ambientales a corto plazo, los de mayor importancia desde un punto de vista medioambiental son aquellos que tienen consecuencias a largo plazo y que generalmente están relacionados con los lixiviados y el gas de vertedero [10].

El biogás generado por la descomposición anaerobia de la materia orgánica presente en los residuos está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, los cuales son considerados gases de efecto invernadero. Se estima que los depósitos de vertedero generan alrededor de un 20% de las emisiones globales antropogénicas de metano [11].

La cantidad y el tipo de emisiones de un vertedero, así como sus impactos ambientales potenciales, se encuentran fuertemente relacionados con el tipo de residuos, el tipo de vertedero y el tipo de gestión que tiene el emplazamiento.

En relación a los impactos ambientales provocados por los lixiviados, el principal problema corresponde a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Los lixiviados pueden migrar hacia el subsuelo o incluso a las aguas superficiales debido a fallas en el sistema de impermeabilizado del vertedero. Una correcta ubicación del vertedero, así como un control cuidadoso del lixiviado y de la evacuación de las aguas, pueden prevenir los casos de contaminación de las aguas superficiales por el lixiviado [12].

La construcción y gestión de vertederos también genera efectos negativos sobre el paisaje debido al alto riesgo de incendios y explosiones, malos olores, así como los efectos asociados a los cambios de uso de suelo. Los hábitats de especies pueden llegar a sufrir pérdidas y afecciones importantes debido a la construcción de dichas obras [11].

3.3. PRODUCCIÓN DE RESIDUOS

Como se mencionó anteriormente, para diseñar adecuadamente un vertedero de RSU es necesario llevar a cabo un cálculo preciso de la cantidad de residuos que éste recibirá a lo largo de su vida útil, la cual depende de múltiples factores como las políticas de gestión y reciclaje, los cambios en los hábitos de consumo y, principalmente, del cálculo de la población futura.

A continuación, se presentan los resultados de la recopilación y análisis de información en materia de producción de residuos (proyecciones de población y tasa de generación de residuos), con el objetivo de conocer las técnicas de estimación actuales que generan los mejores resultados, su aplicabilidad y su fundamento teórico, para posteriormente integrar dentro de la metodología BIOLAND3 un modelo de producción de residuos de acuerdo con los objetivos principales del estudio.

Debido a factores como el crecimiento poblacional, la industrialización, urbanización y el crecimiento económico, se ha detectado una tendencia importante en el aumento de la producción de RSU en una escala global. La producción de RSU, en términos de kg/hab/día, ha incrementado

drásticamente. Algunos autores relacionan este aspecto con el desarrollo económico global debido al rápido crecimiento industrial y a las tendencias crecientes de la población rural a migrar hacia zonas urbanas [13], [14].

La producción de residuos está directamente relacionada con la población que genera dichos residuos. Tradicionalmente, la generación de residuos urbanos se ha determinado a partir de dos componentes, la carga de población y la tasa unitaria de generación por habitante (PIRCV) [9].

El principal problema en relación al cálculo de la producción de residuos de una zona determinada radica en conocer cuál es realmente la población generadora de dichos residuos y la cantidad de residuos que dicha población produce por habitante, incluyendo no sólo la población empadronada, sino también toda aquella población no recogida en los censos demográficos y padrones municipales. Esto implica que la generación de residuos se ve afectada por dos factores externos a la población fija de una localidad o área: la presencia de población no residente y la población relacionada con la actividad turística [9].

Un adecuado estudio poblacional resulta fundamental para determinar las ratios de generación de residuos urbanos y para establecer proyecciones de generación de residuos urbanos y determinar la necesidad de futuras instalaciones de gestión para estos residuos.

La **población fija** de un territorio constituye el factor de mayor importancia en la producción de residuos. Por esto se considera fundamental realizar una evaluación y un análisis detallado al momento de elegir qué tipo de datos demográficos se considerarán para el cálculo de la población y las fuentes que proveen dichos datos.

Por otra parte, existe población que no reside de manera permanente en el territorio pero que tiene algún tipo de vinculación habitual con dicha zona, ya sea porque trabajan allí, porque estudian allí, o porque, no siendo su residencia habitual, suelen pasar allí ciertos periodos de tiempo, aunque no exclusivamente por motivos vacacionales. **La población no residente** se divide en tres categorías principales: la población no residente que trabaja, la población no residente que estudia y la población estacional debido a segunda residencia.

La **población asociada al turismo** corresponde al segundo factor externo que afecta a la producción de residuos de una determinada zona, cuyos aportes son de gran importancia ya que, en los periodos vacacionales más importantes, algunos municipios cuentan con una carga extra poblacional importante que puede llegar a duplicar la generación de residuos. En algunos casos, existen sitios donde la población turística llega a ser mayor que la población fija, como es el caso de la isla de Menorca [15].

Para resolver dicha problemática, en el ámbito de la Comunidad Valenciana, el PIRCV presenta una metodología para el cálculo de la población asociada a los factores mencionados anteriormente de acuerdo con las siguientes consideraciones.

Habitualmente, para cualquier territorio es posible contar con dos tipos de estadísticas o datos demográficos:

- Datos correspondientes a los censos de población que normalmente se actualizan cada 10 años.
- Información publicada en los padrones municipales, la cual comúnmente corresponde a un registro administrativo que se actualiza a escala anual conformado por los vecinos registrados de un determinado municipio.

Tanto la información procedente de los censos como aquella que se obtiene del padrón municipal, aportan datos valiosos que contribuyen en el proceso del cálculo de la población.

Con respecto a los censos de población, debido a su periodicidad, la información de dichos estudios carece de actualizaciones para los períodos intercensales, por lo que su aplicación a este tipo de problemas resulta inconveniente. Sin embargo, es posible rescatar información valiosa proveniente de dichos estudios. En el caso de España, los censos realizados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) cuentan con una serie de datos asociados a la “población vinculada” [16], los cuales permiten tener una idea de la carga real a la que puede estar sometido un municipio a causa de la presencia de población no residente (PIRCV) [9].

Por otra parte, la información del padrón municipal nos da una idea de la población residente de un territorio y contiene datos asociados a la población registrada o fija de un territorio. Los datos del padrón sí cuentan con actualizaciones año con año, por lo que resultan de utilidad para conocer la población fija de un determinado territorio a escala anual.

Considerando la información mencionada anteriormente, sería posible estimar dos de los tres factores que comprenden la carga poblacional de un territorio asociada a la producción de residuos, estos son, la población fija y la población no residente.

El último factor corresponde a la población asociada a la actividad turística, la cual se considera a través del cálculo del número de turistas que visitan la zona de estudio a lo largo del año y se calcula en función del número de plazas de alojamientos turísticos existentes, los cuales se obtienen a partir de la oferta turística municipal ofrecida por la Conselleria de Turismo [17] y el grado de ocupación de dichas plazas proporcionado por la Encuesta Turística de la Conselleria de Turismo [18].

Para conocer la “tasa unitaria” de generación de residuos, es necesario estimar la “carga de población” que genera dichos residuos para un periodo de tiempo determinado y cuantificar la cantidad de residuos producidos en dicho periodo de tiempo. De acuerdo con PIRCV, en el ámbito de la Comunidad Valenciana, hasta el año 2013 se había implementado el concepto de “tasa unitaria” de generación por habitante como un dato empírico procedente de estadísticas de dudosa procedencia, debido a que muchas veces se había recurrido a determinar esta “tasa unitaria” como cociente entre los “residuos urbanos estimados” y la “población empadronada”, con lo cual la falta de rigor era doble, tanto en el numerador como en el denominador desconocidos [9].

3.3.1. Proyecciones de población

La estimación de la producción de residuos futura presenta problemas propios de su índole, debido a que, para su estimación, no solo es necesario realizar el cálculo de la carga de población a través de los cuatro componentes mencionados anteriormente (la población fija, la población no residente, la población asociada al turismo y la tasa unitaria de generación de residuos), sino que también es necesario realizar proyecciones a futuro para cada uno de estos componentes.

A continuación, se presenta un análisis de los métodos de proyección encontrados en la literatura para los componentes mencionados.

3.3.1.1. Población fija

Las proyecciones de población se entienden como estimaciones numéricas de escenarios hipotéticos de la evolución demográfica de un país o una región determinada, usualmente determinadas a través de la extrapolación de tendencias observadas en el pasado [19].

Tradicionalmente, las proyecciones de población han sido utilizadas como insumo fundamental para los procesos de planificación gubernamental sociales y económicos de mediano y largo plazo, y para la aplicación de normativas, entre otros usos [20], [21].

A través de un análisis bibliográfico, se ha identificado una amplia variedad de metodologías propuestas que han sido propuestas y aplicadas para la proyección de la población futura a escala sub-provincial.

Para escala nacional, autonómica y provincial, el método clásico de componentes-cohorte es ampliamente aceptado como el “*gold-standard*” de los modelos de proyección de población. No obstante, para escalas menores a la provincial, no existe una metodología que sobresale entre todas las existentes como sucede en las otras escalas. Existe una variedad considerable de metodologías que son utilizadas actualmente, las cuales se aplican en función de la disponibilidad de datos, los resultados que se buscan, los costos, entre otros factores.

A continuación, se describen cuatro de los principales métodos de proyección de población fija, los cuales se analizan y según diferentes criterios, como su adecuación conceptual, precisión de los resultados, costos, consumo de tiempo y requerimientos de información previa. Para cada uno se señalan sus aspectos clave, así como sus ventajas y desventajas.

Método de componentes-cohorte

Los modelos de tipo componente-cohorte (CC) corresponden al método de proyección poblacional más común utilizado actualmente a nivel mundial para escalas nacionales, autonómicas y provinciales. Su origen se basa en el trabajo de Cannan [22].

Estos modelos se denominan de componentes-cohorte debido a que se realizan a partir de la aplicación de hipótesis sobre los componentes demográficos que condicionan los cambios de la población (fertilidad, mortalidad y migraciones), la cual es dividida en cohortes sometidas a los cambios causados por los componentes mencionados. Existen diferentes tipos de modelos de componentes-cohortes. Sin embargo, la característica común a todos ellos es que modelan los componentes de la población y la dividen en cohortes.

Las proyecciones de dicha población parten de una población inicial (año t) existente para el área de estudio, la cual se discretiza por sexo (s) y edad (x) y se obtienen calculando el número de habitantes de edad x+1 y sexo s para el año t+1 ($P_{s,x+1}^{t+1}$). De esta forma, la población base avanza para cada año de proyección, utilizando tasas de mortalidad y fecundidad e información asociada a los fenómenos de migración presentes. En cada año futuro, se añade un nuevo grupo poblacional de edad 0 aplicando las tasas de fecundidad a la población de mujeres que se encuentran en el rango de fertilidad [23].

A continuación, se detallan los diferentes cálculos que utiliza el método de las componentes a escala provincial para poder estudiar la evolución futura de una población.

Para las edades a 1 de enero del año de partida $x = 0, 1, 2, \dots, 98$:

$$P_{s,x+1}^{t+1} = \frac{[1 - 0.5 * (m_{s,x}^t + e_{s,x}^t + ei_{h,s,x}^t)] * P_{s,x}^t + IM_{s,x}^t + IMi_{h,s,x}^t}{[1 + 0.5 * (m_{s,x}^t + e_{s,x}^t + ei_{h,s,x}^t)]} \quad (3.1)$$

Donde:

$m_{s,x}^t$ es la tasa de mortalidad en el año t de la generación de individuos de sexo s y edad x a 1 de enero del año t

$e_{h,s,x}^t$ es la tasa de emigración exterior en el año t de la generación de individuos residentes en la provincia h de sexo s y edad x a 1 de enero del año t

$IM_{s,x}^t$ es el flujo de inmigración procedente del extranjero en el año t de individuos de sexo s y edad x a 1 de enero del año t

$IMi_{h,s,x}^t$ es el flujo de inmigración procedente del resto del país hacia la provincia h en el año t de individuos de sexo s y edad x a 1 de enero del año t

$ei_{h,s,x}^t$ es la tasa de emigración de la provincia h al resto del país de individuos de sexo s y edad x a 1 de enero del año t.

Para los nacidos durante el año en curso t:

$$P_{s,0}^{t+1} = \frac{[1 - 0.5 * (m_{s,-1}^t + e_{s,-1}^t + ei_{h,s,-1}^t)] * N_s^t + IM_{s,x}^t + IMi_{h,s,x}^t}{[1 + 0.5 * (m_{s,-1}^t + e_{s,-1}^t + ei_{h,s,-1}^t)]} \quad (3.2)$$

Donde

$m_{s,-1}^t$ es la tasa de mortalidad en el año t de la generación de individuos de sexo s, nacidos durante el año t

$e_{h,s,-1}^t$ es la tasa de emigración exterior en el año t de la generación de individuos residentes en la provincia h de sexo s, nacidos durante el año t

$IM_{s,x}^t$ es el flujo de inmigración procedente del extranjero de nacidos de sexo s durante el año t

$IMi_{h,s,x}^t$ es el flujo de inmigración procedente del resto del país hacia la provincia h de nacidos de sexo s durante el año t

$ei_{h,s,-1}^t$ es la tasa de emigración de la provincia h al resto del país de individuos de sexo s, nacidos durante el año t

N_s^t son los nacidos en el área de estudio de sexo s durante el año t, los cuales se derivan de la expresión siguiente.

$$N_s^t = r * \sum_{14}^{49} \left(\frac{P_{M,x}^t + P_{M,x+1}^{t+1}}{2} \right) * f_x^t \quad (3.3)$$

Donde

r es el ratio de masculinidad al nacimiento proyectado en el caso de los varones y, por tanto, 1-r el ratio de feminidad al nacimiento proyectado en el caso de las mujeres

$P_{M,x}^t$ es la población de mujeres de edad x a 1 de enero del año t

f_x^t es la tasa de fecundidad de la generación de mujeres que tienen edad x a 1 de enero del año t. Se considera el rango de edad en el que las mujeres son capaces de tener hijos las edades de 14 a 49 años.

Para el grupo de edad abierto de 100 o más años:

$$P_{s,100+}^{t+1} = \frac{[1-0.5*(m_{s,99+}^t + e_{s,99+}^t + ei_{h,s,99+}^t)]*(P_{s,99}^t + P_{s,100+}^t) + IM_{s,99+}^t + IMi_{h,s,99+}^t}{[1+0.5*(m_{s,99+}^t + e_{s,99+}^t + ei_{h,s,99+}^t)]} \quad (3.4)$$

Donde

$P_{s,99}^t$ es la población residente en el área de estudio de sexo s y edad 99 a 1 de enero del año t

$P_{s,100+}^t$ es la población residente en el área de estudio de sexo s de 100 o más años a 1 de enero del año t

$m_{s,99+}^t$ es la tasa de mortalidad en el año t de la generación de individuos de sexo s de 99 o más años a 1 de enero del año t

$e_{h,s,99+}^t$ es la tasa de emigración exterior en el año t de la generación de individuos residentes en la provincia h de sexo s de edad 99 o más años a 1 de enero del año t

$IM_{s,99+}^t$ es el flujo de inmigración procedente del extranjero en el año t de individuos de sexo s de edad 99 o más años a 1 de enero del año t

$IMi_{h,s,99+}^t$ es el flujo de inmigración procedente del resto del país hacia la provincia h en el año t de individuos de sexo s de edad 99 o más años a 1 de enero del año t

$ei_{h,s,99+}^t$ es la tasa de emigración de la provincia h al resto del país de individuos de sexo s de edad 99 o más años a 1 de enero del año t.

A partir de las cifras resultantes del proceso, se derivan las cifras por edad de cada fenómeno demográfico, bajo la hipótesis de distribución uniforme entre las edades exactas que los individuos de cada generación tendrán en algún momento del año.

Finalmente, para el cálculo de la población total en el año t+1, será necesario llevar a cabo la sumatoria de la población para dicho año de edades 0 a más de 100 de ambos sexos (s).

$$P_{tot}^{t+1} = \sum_0^{100+} P_{m,x}^{t+1} + P_{h,x}^{t+1} \quad (3.5)$$

Donde

P_{tot}^{t+1} es la población total para el año t+1

$P_{m,x}^{t+1}$ es la población de mujeres de edad x para el año t+1

$P_{h,x}^{t+1}$ es la población de hombres de edad x para el año t+1.

En conclusión, los modelos de CC presentan al usuario una herramienta conceptualmente adecuada para realizar proyecciones de población, ya que consideran la estructura etaria de la población, así como la componente por sexo. Además, para la aplicación de este tipo de metodologías es necesario realizar hipótesis acerca de las componentes de fertilidad, mortalidad y migración, de las cuales dependerán los resultados del modelo. El único posible inconveniente se relaciona con los requerimientos de información que tiene dicha metodología, los cuales suelen ser altos.

Modelos de extrapolación de tendencias

Existe otro tipo de modelos de proyección de población denominados “modelos de extrapolación de tendencias” (*trend extrapolation models*), los cuales buscan determinar valores futuros de población basándose únicamente en los valores históricos que ha tenido la población. El objetivo es estudiar las posibles tendencias que presente un determinado fenómeno en base a observaciones de su comportamiento pasado para realizar una proyección basada en la extrapolación de dichas tendencias. Usualmente, en proyecciones a corto plazo es suficiente llevar a cabo una extrapolación de líneas de tendencia con carácter lineal o exponencial. No obstante, para proyecciones a largo plazo, se considera que existen numerosos factores que pueden afectar el

tamaño de la población, por lo que para su estimación es necesario considerar funciones matemáticas más complejas [24].

Algunas de las funciones matemáticas comúnmente mencionadas en la literatura incluyen el modelo lineal, curvas polinómicas de orden 3 y 4, curvas exponenciales, curvas hiperbólicas, funciones potencia, funciones logísticas, entre otras.

Los parámetros que caracterizan a este tipo de modelos o funciones pueden estimarse a través de modelos de regresión, mínimos cuadrados, modelos ARMA, entre otros.

Este tipo de modelos conceptualmente no se consideran adecuados, debido a que no reflejan los procesos poblacionales al no considerar el impacto de la estructura etaria de la población para modelar los cambios futuros. Además, los resultados que estos modelos arrojan son generalmente estimaciones totales de la población sin hacer distinción en las edades o género de la población. Por otra parte, la información que se requiere para la construcción de este tipo de modelos es mínima, necesitando datos de poblaciones totales históricas. Algunos autores argumentan que la precisión de dichos modelos a corto plazo es igual de buena que la que se obtiene con un modelo de componentes-cohorte [24].

Modelos de cambio de uso de suelo

Existe otro grupo de modelos asociados al análisis y proyección de los usos de suelo del territorio con base en información geoespacial. Los modelos de cambio de uso de suelo son simplificaciones de la realidad que permiten predecir el futuro uso de suelo, y con esto, conocer las posibles implicaciones que tendrán fenómenos que afectan al territorio como por ejemplo la urbanización. Estos modelos simplifican de manera útil la amplia gama de factores socioeconómicos y biofísicos que tienen alguna influencia en los patrones espaciales con los que se producen los cambios de uso de suelo.

Actualmente, uno de los modelos de cambio de uso de suelo más utilizados corresponde al modelo Land Change Modeler (LCM) desarrollado por Eastman [25], el cual permite reconocer y reproducir los patrones espacio-temporales que caracterizan a la evolución de los usos de suelo en un territorio y realizar proyecciones con base en un proceso empírico de parametrización a través de un análisis de mapas temáticos dentro de un sistema de información geográfica (SIG) por medio del uso de redes neuronales. Estos mapas temáticos incluyen atributos o métricas relacionadas principalmente con la morfología del terreno y factores socioeconómicos (cercanía a núcleos urbanos o vías). Los atributos del territorio son un aspecto clave cuando se trata de predecir cambios de uso de suelo debido a que existen factores que pueden facilitar o limitar la expansión de ciertos usos sobre el territorio (ej. pendiente del terreno), así como otros factores que establecen condiciones favorables para el desarrollo o transformación de usos de suelo en ciertas áreas del territorio [26].

Para desarrollar una adecuada modelación de la evolución de los usos de suelo, en primera instancia, es necesario contar con una base de datos histórica de los usos de suelo que han sido

registrados en dicho territorio. Esto con el objetivo de poder realizar un análisis de las interacciones que estos usos tienen entre sí y tendencias asociadas a los cambios de uso de suelo. Por otra parte, se considera esencial conocer las diferentes características del territorio que condicionan la variación espacio-temporal de los usos de suelo a través de un análisis del territorio. Dichas características se relacionan principalmente con condicionantes físicas del territorio (pendientes y elevaciones) y “condicionantes antrópicas” (cercanía a vialidades, cercanía a núcleos urbanos), sin embargo, se recomienda ajustar y en cualquier caso aumentar el número de variables a considerar según sea pertinente para cada territorio [26], [27].

Para el desarrollo de la modelación de cambios de uso de suelo, es necesario contar con un volumen considerable de datos geospaciales como mapas de uso de suelo históricos, mapas de pendientes, mapas de elevación, cartografía base del territorio (vías y centros urbanos). La principal virtud de este método es la incorporación de condicionantes físicos reales del territorio que restringen el desarrollo urbano [28].

En el estricto sentido, los modelos de cambio de uso de suelo no son modelos de proyección poblacional como tal. Sin embargo, las proyecciones de uso de suelo obtenidas a través del modelo LCM pueden relacionarse con porcentajes de ocupación o densidades poblacionales para cada uno de los usos de suelo estimados. Esta relación se encuentra condicionada por las diferentes proyecciones de porcentajes de ocupación. No obstante, si se desarrolla de manera adecuada, este conjunto de proyecciones permite generar modelos capaces de estimar el valor de la población futura de un territorio.

Este tipo de modelos cuenta con requerimientos de información considerables, ya que es necesario en primera instancia realizar un análisis de la relación entre los diferentes usos de suelo y sus densidades de población asociadas, para lo cual existe poca información disponible en la actualidad.

Habiendo discutido las diferentes metodologías asociadas a los modelos mencionados y las ventajas y desventajas asociadas a cada uno de estos, es necesario indicar que la elección de un tipo de modelo de proyección u otro dependerá de la disponibilidad de datos que se tenga para el estudio. Sin embargo, considerando un escenario ideal, los modelos basados en el método clásico de componentes-cohorte ofrecen la mejor alternativa para realizar proyecciones poblacionales a pesar del elevado volumen de información que requieren, ya que dichos modelos permiten obtener información adicional con respecto a la población asociada a las componentes con las que se modela y además, la discretización de la población en cohortes permite llevar a cabo análisis más completos de la población proyectada obteniendo resultados con mayor detalle. El PIRCV utiliza el modelo de extrapolación de tendencias para sus proyecciones de población. Sin embargo, se considera que dicha metodología para el caso de España no genera resultados con la precisión que podrían generar otros modelos como el de componentes-cohorte o los modelos de cambio de uso de suelo.

3.3.1.2. Población no residente

Para realizar una proyección de la población no residente, se considera oportuno analizar los métodos de proyección establecidos en el PIRCV, que recomienda la aplicación del método de extrapolación de tendencias. Para esto, es necesario analizar las tendencias de la relación entre la población no residente y la población fija y llevar a cabo una proyección/extrapolación de dicha relación para el periodo proyectivo, partiendo del supuesto de que las tendencias observadas se mantendrán constantes para dicho periodo.

Se considera apropiada la implementación de dicha metodología, debido a que la información relacionada con este componente poblacional actualmente es muy limitada.

3.3.1.3. Población asociada al turismo

Al igual que para la proyección de la población no residente, para la proyección de la población asociada al turismo se llevó a cabo un análisis de los métodos de proyección establecidos en el PIRCV, dentro del cual se recomienda la aplicación del método de extrapolación de tendencias.

Para el desarrollo de esta proyección, es necesario analizar las tendencias de la relación entre la población asociada al turismo y la población fija y llevar a cabo una proyección/extrapolación de esta para el periodo proyectivo, partiendo del supuesto de que las tendencias observadas se mantendrán constantes para dicho periodo.

3.3.2. *Proyección de la tasa de producción de residuos*

Para realizar una proyección de la tasa de producción de residuos, se considera oportuno analizar los métodos de proyección establecidos en el PIRCV.

El PIRCV establece una proyección de la tasa de producción de residuos considerando la aplicación del método de extrapolación de tendencias. Particularmente, el PIRCV considera que los ratios promedio obtenidos como parte del análisis de las tasas de generación de residuos para el 2002 – 2004 se mantienen constantes en el periodo 2008-2013, ya que, aunque es de esperar un incremento del nivel de vida de los ciudadanos, y consecuentemente de su potencial de generación de residuos urbanos, el PIRCV considera que este efecto se ha de equilibrar con la aplicación de políticas de prevención orientadas específicamente a la ciudadanía.

3.3.3. *Proyección de la tasa de vertido de residuos*

La proyección de la tasa de vertido de un determinado ámbito geográfico depende fuertemente de la información disponible acerca de los porcentajes de rechazo que tienen las plantas de valorización, ya que a través del análisis de dicha información se pueden establecer hipótesis

acerca de la tendencia que ha tenido dicha tasa a lo largo del tiempo. No obstante, esta proyección depende también de las políticas y/o normas que se establezcan para el territorio en cuestión asociadas a la gestión y/o valorización de los residuos.

Con respecto a esto, se considera oportuno analizar las proyecciones realizadas en el Plan Nacional de Residuos y el Plan Zonal 1. En el Plan Nacional de Residuos se fijaba el año 2012 como fecha máxima para alcanzar un porcentaje del 33,1% para la fracción de residuos destinados a vertedero. Aunado a esto, el Plan Zonal 1 estableció una proyección de dicho porcentaje para el periodo 2012-2020 en la ZC1, para la cual se estimó un porcentaje de vertido del 26,9% para el año 2020.

3.4. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Actualmente, se considera que el manejo del biogás producido por la descomposición de la materia orgánica en los residuos depositados en vertederos es uno de los aspectos fundamentales a abordar durante la gestión de dichos emplazamientos, debido a los importantes riesgos y oportunidades que representa la generación de estos gases por su alta capacidad calorífica y sus potenciales efectos sobre la capa de ozono. El Real Decreto 646/2020 establece que, como parte de la gestión de vertederos, se deberán tomar medidas adecuadas para controlar la acumulación y emisión de gases de vertedero, de ser posible comenzando desde la fase de explotación de los vertederos hasta su clausura, y además, se establece que la recogida, tratamiento y aprovechamiento de biogás se deberá llevar a cabo de forma tal que se reduzca al mínimo el daño o deterioro del medio ambiente y el riesgo para la salud humana, teniendo en especial consideración la contribución al cambio climático.

A continuación, se presenta la recopilación y análisis de información relacionada con la producción, composición y modelación del biogás en vertederos, con el objetivo de integrar dentro de la metodología BIOLAND3 un modelo de producción de biogás de acuerdo con los objetivos principales del estudio.

Como se mencionó anteriormente, la descomposición bacteriana de la materia orgánica biodegradable presente en los residuos depositados en vertederos tiene como resultado la generación de biogás. Este gas está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), los cuales se caracterizan por ser gases que contribuyen al aumento del efecto invernadero.

Se estima que los depósitos de vertedero generan alrededor de un 20% de las emisiones globales antropogénicas de metano [11]. Esto se debe a que el biogás es más ligero que el aire, por lo que tiende a escapar hacia la atmósfera (su densidad relativa respecto del aire es 0,56). Permitir que este gas escape hacia la atmósfera tiene numerosas implicaciones ambientales negativas ya que el metano, además de contribuir al aumento del efecto invernadero y el calentamiento global, contribuye a la degradación de la capa de ozono [29].

Por otra parte, el metano es considerado como un importante recurso energético “verde”, debido a su alto poder calorífico ($35,880 \text{ kJ/m}^3\text{N}$), alrededor de 25 veces mayor que el del dióxido de

carbono [7], [30]. Por esto, la captura y utilización del biogás no solo conlleva claros beneficios ambientales, sino que también representa un importante atractivo económico para los gestores de dichos emplazamientos, los cuales en la mayoría de los casos corresponden a los gobiernos locales.

A continuación, se realiza una descripción de las principales características y componentes del biogás, su proceso de generación en vertederos y los modelos de estimación más relevantes en la actualidad.

3.4.1. Componentes del biogás

Debido a que los vertederos engloban un proceso que se desarrolla a lo largo de varios años, la acumulación de los residuos en los vasos de vertido genera diferentes condiciones de humedad y temperatura dentro del vaso, lo cual conlleva una diferenciación en la producción de biogás y las fases de descomposición de la materia orgánica, de acuerdo a la profundidad a la que se encuentren estos residuos. Los residuos depositados en la superficie del vertedero no estarán sometidos a las mismas condiciones que los residuos sepultados hace 5 años.

En las primeras etapas del depósito (semanas a meses) el biogás producido cuenta con una composición que consta principalmente de metano y dióxido de carbono en concentraciones de 55(±10)% y 45(±10)% respectivamente. Dichas concentraciones permanecen relativamente constantes para el CO₂ a lo largo de la vida útil del vertedero, sin embargo, a medida que los vertederos se vuelven más antiguos, la concentración de metano en el biogás producido aumenta [31]. Otros compuestos minoritarios han sido encontrados en gases de vertedero a partir de muestreos, estos son: oxígeno (O₂), nitrógeno (N₂), hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO) y vapor de agua.

3.4.2. Proceso de generación de biogás

El principal proceso que ocurre dentro de un vertedero de RSU corresponde a la biodegradación de la materia orgánica presente en los residuos. Este proceso se puede separar en tres etapas. En primera instancia, las moléculas más complejas son hidrolizadas por bacterias, formando productos solubles. Posteriormente, se lleva a cabo el proceso de acetogénesis por otro tipo de bacterias, donde estos productos son transformados en ácidos orgánicos, dióxido de carbono e hidrógeno (3.6). Finalmente, en la última etapa del proceso de descomposición de la materia orgánica, las bacterias llevan a cabo el proceso de metanogénesis, a través de la degradación del ácido acético y etanol y la reducción del CO₂ con H₂, ambos procesos generan como resultado metano en forma de gas (3.7, 3.8).

Acetogénesis



Metanogénesis



Existen numerosos factores que influyen tanto en la cantidad de biogás generado como en la velocidad de formación o en su composición [32]. En general, estos factores son:

- La composición de los residuos: en función de la cantidad de materia orgánica biodegradable.
- El tratamiento previo de los residuos: en función del tamaño de partícula, el método de vertido, el espesor de la capa de residuos y la compactación de estos.
- La tipología y las características de la instalación: la topografía del vaso, el sistema de extracción del biogás, el sistema de gestión de los lixiviados y el paquete de sellado.
- Las condiciones climáticas: en función de la temperatura y la precipitación (humedad) a la que se someten los residuos.

Los aspectos anteriores varían significativamente de un emplazamiento a otro. Debido a esto, la cantidad de biogás generado por tonelada de residuos y la velocidad de formación también varían de forma significativa.

3.4.3. Modelación de la producción de biogás

Lo anterior demuestra la necesidad de contar con herramientas adecuadas para la caracterización de las condiciones locales de los vertederos de RSU. Para lograr esto, es necesario utilizar técnicas de modelación que permitan llevar a cabo una adecuada gestión de los vertederos y de esta forma poder conocer las condiciones necesarias para maximizar la producción de biogás.

Los modelos de producción de biogás tienen como objetivo principal llevar a cabo una adecuada caracterización y análisis de las condiciones a las que se encuentra y encontrará sometido un vertedero para estimar proyecciones relacionadas con emisiones futuras de biogás o de la fracción de metano. Las proyecciones de producción de biogás son un insumo altamente valioso en el proceso de diseño de los sistemas de captación, así como en la monitorización del vertedero.

El enfoque teórico de la mayoría de los modelos de biogás deriva de la ecuación de Monod (3.9), la cual corresponde a una expresión general cinética que describe los procesos de biodegradación [33], [34]:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{KxC}{k_C+C} \quad (3.9)$$

Donde:

C es la concentración restante del sustrato (materia orgánica) en el tiempo t (kg/m³ RSU)

X es la concentración de microorganismos (kg/m³ RSU)

K es la tasa máxima de utilización del sustrato por kg de microorganismos

K_c es la constante de saturación

La ecuación de Monod (3.9) se puede aproximar por las siguientes funciones en dos casos extremos:

- Reacción de orden cero: para valores altos de C, la tasa de utilización del sustrato es constante si la concentración de microorganismos también lo es (3.10).

$$\frac{dC}{dt} = -Kx \quad (3.10)$$

- Reacción de primer orden: para valores pequeños de C y asumiendo constante la concentración de microorganismos, la tasa de utilización del sustrato es una función lineal (3.11).

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{Kx}{K_c} C \quad (3.11)$$

3.4.3.1. Modelos de producción de biogás

A continuación, se describen brevemente los principales modelos de producción de biogás existentes.

EPER

El modelo EPER (*European Pollutant Emission Register*) es un modelo de orden cero que calcula las emisiones de metano para una sola tipología de residuos en función de la cantidad depositada, la proporción de carbono biodegradable, un factor de eficiencia en la recuperación de biogás y un factor de conversión de carbono a metano (3.12) [34], [35].

$$M_c = M * BDC * BDC_f * F * D * C \quad (3.12)$$

Donde

M_e son las emisiones difusas de metano (t CH₄/año)

M es la cantidad anual de residuos depositados en vertedero (t RSU/año)

BDC es la proporción de carbono biodegradable (0,15) (t C/t RSU)

BDC_t es la proporción de carbono biodegradable convertido (0,50)

F es el factor de conversión de C en CH₄ (1,33) (t CH₄/t C)

D es la eficiencia en la recuperación del biogás: Sin sistema de recuperación (0,9), con sistema de recuperación (0,4), con sistema de recuperación y capa de cubrición (0,1)

C es la concentración de metano en el biogás (50) (%)

Eliminando de la ecuación (3.12) la eficiencia en la recuperación (D), se podría estimar la producción de metano en el vertedero.

IPCC

Este modelo de primer orden calcula las emisiones de metano, diferenciando el vertedero en secciones y obteniendo el cálculo de las emisiones en base a la cantidad de residuos depositados, las fracciones biodegradables de los residuos y diferentes constantes de degradación [36].

A continuación, se presenta una aproximación del modelo IPCC multifase:

$$Q_{CH_4} = M_i * L_0 * [F_R(k_R * e^{-k_R(t-t_i)}) + F_M(k_M * e^{-k_R(t-t_i)}) + F_S(k_S * e^{-k_R(t-t_i)})] \quad (3.13)$$

Donde

Q_{CH₄} son las emisiones de metano (m₃ CH₄/año)

L₀ es el potencial de generación de metano (m₃ CH₄/t RSU)

M_i es la masa de residuos depositados en la sección i del vertedero (t/año)

F_R, F_M, F_S representan las fracciones rápida, moderada y lentamente biodegradables de residuos

k_R, k_M, k_S son las constantes de degradación de cada una de las fracciones de residuos

t_i es el incremento de la edad (años)

LFGGEN

El modelo LFGGEN (*Landfill Gas Generation Model*) estima la generación de biogás, pudiendo estimar la generación teórica de CO₂ y CH₄ basado en tres hipótesis principales [37].

- La metanogénesis va precedida de una fase de latencia.
- En la primera parte de la metanogénesis, la tasa de generación sigue una función lineal
- La segunda parte de la metanogénesis sigue una cinética de primer orden.

Además, el modelo permite establecer algunas hipótesis adicionales:

- La posibilidad de clasificar los residuos biodegradables en una de once categorías
- La posibilidad de asignar a los residuos diferentes estados de humedad: húmedo, moderado y seco
- La existencia de tres fracciones de biodegradabilidad: rápida, moderada y lenta.
- Las tasas de degradación varían en función de la humedad de los residuos

LFGGEN incluye un desfase de tiempo t_0 donde se establecen las condiciones anaerobias, seguido de un incremento lineal hasta llegar a la tasa máxima específica de metano Q_{SP} , que se alcanza al final del año t_p . Tras alcanzar la tasa máxima, la generación de biogás decrece exponencialmente hasta ser casi nula en t_{99} , tiempo en que la generación de biogás cae por debajo del 1% del pico.

El modelo asume que los tiempos en los que se alcanza la tasa máxima de degradación varían dependiendo del tipo de residuos y las condiciones de humedad (3.14).

$$Q_{SP} = L_0 * \frac{2k}{k(t_p - t_0) + 2} \quad (3.14)$$

Donde:

Q_{SP} es la tasa máxima específica de metano ($m^3/año/kg$ RSU)

L_0 es el potencial de la generación de metano (m^3/kg RSU)

t_0 es el desfase de tiempo (año)

t_p es tiempo en el que alcanza la tasa máxima específica (año)

k es la constante de biodegradación ($año^{-1}$)

En la segunda fase de la metanogénesis, la constante de biodegradación es:

$$k = \frac{-\ln 0.01}{t_{99} - t_p} \quad (3.15)$$

Donde:

t_{99} es el tiempo en el que la generación de biogás es menor el 1% de Q_{SP} (año)

GasSim

GasSim es un modelo probabilístico que utiliza una ecuación de degradación de primer orden basada en el modelo multifase descrito por Scheepers y van Zanten [38].

En este modelo, la incertidumbre de ciertos parámetros puede representarse mediante un modelo de simulación que proporciona medida del efecto de dicha incertidumbre. Utiliza la técnica de simulación Monte Carlo [39].

El modelo incorpora información sobre la cantidad y composición de los residuos, la tipología del vertedero y la gestión de la explotación. Los resultados que se pueden obtener son:

- Estimaciones del biogás generado en el interior del vertedero
- Emisiones de la combustión del biogás llevado a antorcha
- Emisiones del biogás no recogido por el sistema de captación
- Migraciones terrestres del biogás
- Impactos en la calidad del aire a corto y largo plazo
- Impactos en el ser humano

Tchobanoglous

El modelo de Tchobanoglous sintetiza los componentes del balance de agua considerando el vertedero como una unidad tridimensional [40]. Los componentes principales implicados en el balance son:

- Las entradas de agua (procedente de las cotas superiores a la celda o unidad considerada)
- La humedad de los residuos sólidos
- La humedad del material de cubrición.
- Las salidas de agua integradas por el agua que sale del vertedero saturando el biogás y la que se drena como lixiviados.

El balance de agua de vertedero se obtiene sumando todas las entradas y restando el agua consumida por las reacciones químicas (o perdida como vapor de agua), teniendo en cuenta la variación de la capacidad de campo para un intervalo de tiempo determinado. Los términos que componen el balance de aguas pueden colocarse en forma de ecuación de acuerdo a lo siguiente:

$$\Delta S_{RS} = W_{RS} + W_{MC} + W_P - W_B - W_{VA} - W_L \quad (3.16)$$

Donde:

ΔS_{RS} es la variación de la cantidad de agua almacenada en los RSU en el vertedero (kg/m^3)

W_{RS} es el agua (humedad) de los RSU depositados (kg/m^3)

W_{MC} es el agua (humedad) del material de cubrición (kg/m^3)

W_P representa el agua filtrada superiormente (en nivel superior, precipitación) (kg/m^3)

W_B representa el agua consumida en la formación de biogás (kg/m^3)

W_{VA} es el agua que sale junto con el biogás como vapor de agua (kg/m^3)

W_L representa el agua que sale inferiormente por cada nivel, siendo lixiviado si el nivel se encuentra directamente por encima de un sistema para la recogida de lixiviado (kg/m^3)

BIOLEACH

BIOLEACH es un modelo matemático fundamentado en la ecuación de balance hídrico que permite realizar la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de

RSU que además cuenta con la posibilidad de analizar el comportamiento del vertedero como biorreactor [7].

A través de la aplicación del modelo, es posible conocer cuál será la producción real de biogás cada mes, cuál será la producción mensual de lixiviados y, además, conocer las acciones necesarias a realizar para maximizar la producción de biogás utilizando óptimamente el volumen de lixiviados almacenados en la balsa.

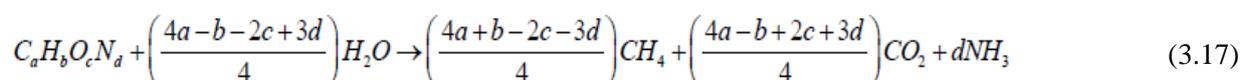
El modelo BIOLEACH dentro de su interfaz, cuenta con un módulo desarrollado para llevar a cabo el cálculo de la producción óptima de biogás en un vertedero, a partir de los siguientes tres factores, los cuales deben ser conocidos por el usuario [7].

- Composición de los RSU en el mes i : procedente habitualmente de los ensayos de caracterización realizados en las plantas de tratamiento, en los cuales se determina el porcentaje de humedad de cada uno de los componentes de RSU, tanto orgánicos como inorgánicos.
- Análisis químico elemental de los RSU depositados en el vertedero en el mes i , en el cual se determinan las proporciones molares de C, H, O y N presentes en cada una de las fracciones que componen el residuo obtenidas a través de ensayos de caracterización de residuos.
- Masa total de RSU (kg) depositados en el vertedero en el mes i , a partir de la cual se determinará la superficie sometida a infiltración neta considerando un espesor de residuos fijado por el usuario.

Además, el usuario cuenta con la posibilidad de establecer el porcentaje de los residuos que se encuentra disponible para su degradación total, distinguiendo entre el porcentaje correspondiente a la fracción rápidamente biodegradable (RRB) y a la fracción lentamente biodegradable (RLB). De acuerdo con [7], estos valores son inferiores a un 75% para los RRB y un 50% para los RLB, por lo cual, incluso tras la finalización del proceso de formación de biogás, todavía quedará almacenado un alto contenido de materia orgánica en el interior del vertedero. Este valor debe ser calibrado por el usuario.

BIOLEACH también requiere de la calibración de la temperatura de la masa de residuos que se considera constante en todo el proceso y en todo el volumen de vertedero.

Al margen del proceso de descomposición total de la materia orgánica en fase anaerobia, BIOLEACH opta por la implementación de la ecuación estequiométrica (3.17), la cual permite estimar la producción de biogás bajo condiciones óptimas (en las que se produce la biodegradación total de la materia orgánica contenida en los RSU), en función de la composición química del RSU.



Donde

$C_a H_b O_c N_d$ representa en base molar la composición de la materia orgánica al inicio del proceso.

a, b, c, d son las proporciones molares de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, respectivamente

Las proporciones molares son calibradas automáticamente por el modelo para la mezcla dada de RSU.

La metodología anterior asume que la fracción orgánica biodegradable de los RSU se estabiliza completamente y se degrada para formar metano, dióxido de carbono y amoníaco. La velocidad de esta conversión depende del contenido de RRB y RLB dentro de la masa de residuos y de la disponibilidad de agua, la cual es un factor limitante cuya ausencia puede inhibir el proceso de formación del biogás. Debido a lo anterior, BIOLEACH calcula la máxima producción de biogás de forma independiente para los RRB y para los RLB.

BIOLEACH considera un modelo de cinética de reacción triangular, para poder establecer la tasa unitaria de formación de biogás (m^3 biogás/kg RSU en cada mes) correspondiente a cada una de las fracciones de residuos en el tiempo. El usuario debe calibrar cuál es el porcentaje de RSU que está efectivamente disponible para ser degradado y, además, debe especificar los parámetros de dicho modelo triangular. Estos parámetros son los siguientes:

- Tiempos empleados hasta alcanzar la degradación total de las fracciones RRB y RLB.
- Tiempo en los que se alcanza la tasa máxima de biodegradación para las fracciones RRB y RLB.

El modelo triangular asume que la tasa de generación de metano sigue un crecimiento lineal durante la primera fase de descomposición y que en la segunda fase, la generación de metano desciende también linealmente [40]–[42].

Para la fracción de residuos rápidamente biodegradables (RRB) se considera:

- Periodo total de descomposición = 5 años
- La tasa máxima de formación de biogás se produce 1 año después del vertido de los RRB en el vaso.

Para la fracción de residuos lentamente biodegradables (RLB) se considera:

- Periodo total de descomposición = 15 años
- la tasa máxima de formación de biogás se produce 5 años después del vertido de los RLB en el vaso.

El modelo triangular considera que la tasa de no es constante. Para el caso de la fracción RRB, considera que esta tasa crece de forma lineal durante los primeros doce meses, alcanzando su valor

máximo al final del mes 12, posterior a esto, la tasa desciende linealmente hasta alcanzar un valor de 0 al final del mes 60. Para el caso de la fracción RLB, el comportamiento es similar, a una escala temporal mayor, alcanzando su valor máximo al final del mes 60, posteriormente anulándose al final del mes 180.

Para calcular la producción de biogás en un determinado instante se deberá considerar la edad de los residuos depositados en el vertedero, debido a que como se mencionó anteriormente, las tasas de producción de biogás varían en función del tiempo.

De esta forma, la máxima producción de biogás en un determinado instante se obtiene como convolución de todas las producciones de ambas fracciones de residuo (RRB y RLB) que hubieran sido depositadas en el vertedero, desde su puesta en funcionamiento hasta la fecha de cálculo.

BIOLEACH lleva a cabo dicho cálculo con una discretización temporal mensual y lleva un control estricto de estas tasas de producción de biogás a través de un proceso de convolución.

Como conclusión, se puede decir que la mayoría de los modelos de producción de biogás o metano mencionados anteriormente se han desarrollado asumiendo cinéticas de degradación de primer orden y de orden cero. Los modelos de cinética de primer orden establecen una relación lineal para la máxima producción de metano por unidad de residuo y una relación exponencial para la tasa de degradación y el tiempo. Por otra parte, los modelos de orden cero establecen que la producción de metano se mantiene constante en el tiempo, lo cual representa importantes errores.

Es necesario considerar que la tasa de degradación de la materia orgánica en un vertedero depende de la distribución de los componentes orgánicos en el vertedero, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los residuos y la compactación de estos.

No obstante, se considera que el modelo de degradación triangular representa una opción superior a los modelos basados en cinéticas de orden 0 y 1 debido a su simplicidad.

3.5. INDICADORES E ÍNDICES

Los procedimientos de control y vigilancia de un vertedero son un aspecto de gran importancia en materia de gestión ambiental del territorio. Un adecuado control ambiental es fundamental para garantizar el equilibrio de los ecosistemas y la protección del medio ambiente. Desde esta perspectiva, los vertederos representan una de las mayores fuentes potenciales de contaminación medioambiental. Un mal diseño y gestión de estas infraestructuras puede comprometer la calidad del suelo y del agua subterránea debido a posibles fugas de lixiviados y emisión de gases, así como efectos indirectos sobre el territorio que lo rodea.

Con el objetivo de cuantificar algunas de las herramientas actuales con mayor influencia en el análisis ambiental del territorio, se llevó a cabo una recopilación de información relacionada con la aplicación de indicadores e índices ambientales para el monitoreo del territorio, en búsqueda de poder integrar estos aspectos como parte de la metodología BIOLAND3.

Un indicador es un parámetro que indica o proporciona información acerca del estado de un fenómeno o lugar. Desde el punto de vista de su función, los indicadores condensan la complejidad de nuestro entorno en una cantidad manejable de datos [43].

Los indicadores suelen representar el punto medio entre la precisión científica y la información disponible. Según la Agencia Europea del Medio Ambiente, un indicador es *“una medida, por lo general cuantitativa, que puede usarse para ilustrar y comunicar fenómenos complejos de manera sencilla, incluyendo sus tendencias y cambios en el tiempo”* [44].

El aspecto más importante de los indicadores, en comparación con otras formas de información, es su relevancia para la toma de decisiones. Los indicadores son variables que resumen o de alguna manera simplifican información relevante y vuelven visibles fenómenos de interés.

Las funciones básicas que debe proporcionar un indicador son las siguientes [45]:

- **Simplificación:** debe simplificar un determinado sistema, teniendo en cuenta algunas de las muchas dimensiones que lo componen
- **Cuantificación:** debe ser capaz de utilizarse para comparar en el tiempo el estado actual del sistema o realizar comparaciones entre varios sistemas.
- **Comunicación:** debe ser capaz de transmitir información valiosa sobre un determinado aspecto que ayude en la toma de decisiones

Los sistemas que componen la realidad por lo general presentan estructuras complejas, necesitando mucha información (datos, variables, parámetros) para poder ser descritos de forma apropiada. Los indicadores surgen como herramienta que sintetizan la información disponible sobre dichos sistemas. Sin embargo, normalmente, un solo indicador no es capaz de describir todas las relaciones que ocurren dentro del sistema, por lo que es necesario disponer de un conjunto de indicadores que expliquen de forma global el sistema a analizar, a esto es a lo que se le denomina un “sistema de indicadores” [46].

La principal ventaja de un sistema de indicadores es la capacidad que estos tienen para organizar información, de forma que pueden establecerse relaciones entre las diferentes variables y proporcionar una interpretación conjunta. Sin embargo, es de suma importancia llevar a cabo una adecuada selección de las variables, ya que un fenómeno concreto puede abordarse de múltiples maneras y, por lo tanto, son muchos los indicadores simples que podrían servir para estudiarlo.

Se suelen distinguir dos tipos de indicadores: los indicadores simples, a los que se ha hecho referencia en apartados anteriores y los indicadores complejos o sintéticos, también llamados índices (figura 3.2). Esta clasificación depende de la información contenida en cada indicador y de su complejidad [47].

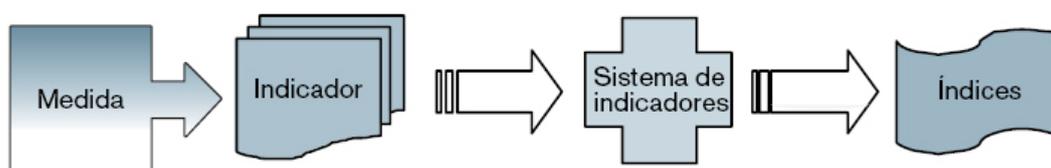


Figura 3.2.- Proceso de elaboración de índices
[48]

En el caso de los indicadores simples, la información procede de estadísticas reales o con un tratamiento simple de los datos. Los indicadores sintéticos o índices, en cambio, son valores adimensionales que aparecen al combinar varios indicadores sencillos a través de una ponderación y teniendo en cuenta una jerarquía en sus componentes [47].

La información que puede proporcionar cada uno de los dos tipos de indicadores es distinta y será de utilidad en función del nivel al cual se trabaje. Los indicadores simples se utilizan fundamentalmente para detectar impactos específicos y poder aplicar soluciones concretas. Los índices proporcionan una mejor comprensión del sistema a estudiar, pero requiere de una interpretación de los resultados mucho más exhaustiva y complicada.

3.5.1. Indicadores e índices ambientales

En los últimos años, los indicadores ambientales han cobrado importancia como herramientas de carácter fundamental en las evaluaciones ambientales a nivel detallado, local, regional y nacional [49], esto ha impactado de manera significativa en la gestión ambiental y la formulación de políticas ambientales a nivel global [50]. Se consideran indispensables en el diseño y formulación de políticas ambientales por parte de las autoridades ya que permiten explicar la evolución de fenómenos biofísicas a través del tiempo y medir el progreso o eficacia de las políticas y estrategias aplicadas a estas para mejorar su estado ambiental [51].

Este tipo de indicadores se utilizan principalmente con el objetivo de simplificar el seguimiento de sistemas ecológicos complejos. Estos usualmente están compuestos por variables cuantificables que informan sobre aspectos específicos de áreas particulares [52].

Los aspectos más importantes a considerar en la selección de indicadores ambientales que se van a utilizar son las siguientes [53]:

- Relevantes a escala nacional (pudiendo usarse a escalas regionales y locales)
- Pertinentes frente a los objetivos que se busquen
- Comprensibles, simples y concisos
- Realizables y al menor coste posible
- Limitados en número (principio de parsimonia)
- Representativos

La mayoría de índices ambientales difieren en número y tipo de indicadores que los componen debido a que normalmente, estos han sido desarrollados para diferentes propósitos y escalas, utilizando métodos de combinación de indicadores diferentes en la mayoría de los casos.

3.5.1.1. Índices ambientales basados en usos de suelo

La asignación de usos de suelo en el territorio es considerada como una de las principales causas de la transformación de los ecosistemas terrestres [54], [55]. Los cambios en el territorio derivados de los usos de suelo pueden llegar a afectar el clima, la biodiversidad y el paisaje de una región particular [56]–[59].

Existen dos aproximaciones principales para evaluar el impacto ambiental que tiene la asignación de usos de suelo en el territorio [60]. La primera se relaciona con la superficie asociada a una cierta categoría de uso de suelo y los cambios generados de una categoría a otra (cambios de uso de suelo). La segunda corresponde al uso de modelos que cuantifican los impactos en términos de la variación de las propiedades del suelo. En este caso se centrará la investigación en el primer tipo.

En la última década se han propuesto una cantidad importante de índices e indicadores ambientales enfocados en la gestión del territorio. Algunos de los más relevantes corresponden al Índice Integrado Relativo de Antropización (INRA) [61] y al Índice WEI (*Weighted Environmental Index*) [62]. Estos índices tienen en común el hecho de que utilizan información geoespacial para analizar el territorio, así como información relacionada con usos de suelo. Además, estos suelen basarse en valores cualitativos de diferentes parámetros asignados a distintas zonas del territorio [63]–[66]. A continuación, se presenta una descripción de ambos índices.

INRA - Índice integrado relativo de antropización

El índice INRA estudia la variación del grado de antropización mediante el análisis de un único factor denominado Índice de Antropización Integrada Relativa (INRA) [61]. Este índice se plantea

como una medida que integra aspectos urbanísticos, coberturas del suelo y usos de suelo de un territorio particular.

A través de su aplicación es posible caracterizar los fenómenos de antropización de manera cuantitativa y cualitativa considerando el territorio como un mosaico de ecosistemas con diferentes grados de modificación.

Como inputs, utiliza fotografías aéreas, imágenes satelitales o cualquier otro tipo de información espacial gráfica que permita identificar las características que se buscan para una determinada área.

Como parte inicial del proceso de evaluación, se definen las dimensiones de lo que los autores llaman unidades de análisis y el número de unidades con las que se trabajará, así como su ubicación espacial.

Una vez caracterizada el área de estudio y sus unidades de análisis, el siguiente paso en la metodología consiste en dividir cada unidad en partes iguales que se denominan subunidades de análisis (usualmente cien partes). Posteriormente, se desarrolla el análisis de las coberturas de uso de suelo estimando el efecto del gradiente rural-urbano sobre la zona y el objeto de estudio. Se les asigna un valor entre cero y uno con el fin de darle a cada subunidad un valor de antropización parcial como resultado de la aplicación de un análisis de decisión multicriterio, basado en el juicio de expertos.

Ya identificados los valores de antropización para cada subunidad, se procede a estimar el grado relativo de antropización por unidad de análisis (3.19):

$$INRA = \left(\frac{\sum SUA'}{n} \right) * 100 \quad (3.19)$$

Donde

$\sum SUA'$ es el sumatorio del valor de antropización parcial de todas las SUA
n es el número total de SUA

Con el fin de darle correspondencia espacial al INRA, se considera necesario representar los resultados del análisis gráficamente a través de mapas. Para esto, se puede emplear un método sencillo basado en el concepto de unidad pictórica (píxel), donde las subunidades y las unidades de análisis toman la característica de un píxel o unidad pictórica equivalente al valor o categoría de la antropización determinada dentro de ellas.

Índice ambiental WEI (*Weighted Environmental Index*)

El índice ambiental WEI, desarrollado por investigadores de la Universitat Politècnica de València [62], es una herramienta novedosa que fue desarrollada con el objetivo de llevar a cabo un análisis

ambiental del territorio basado en usos de suelo a través de técnicas GIS. Específicamente, este índice ha sido definido para cumplir con las siguientes características:

- Deberá integrar todas las características de índices que varían continuamente en el espacio
- Los valores del índice deberán estar justificados de una forma simple con base en clasificaciones preestablecidas de usos de suelo.
- Deberá permitir llevar a cabo análisis y evaluaciones de uso de suelo basados en información que pueda ser integrada a través de sistemas de información geográfica.
- Deberá ser capaz de aplicarse tanto en estudios de carácter general con información de resolución amplia, así como en estudios que contengan información detallada o de alta resolución.
- Su aplicación sobre una misma área geográfica en diferentes períodos deberá permitir evaluar el impacto de medidas o políticas territoriales, ambientales o urbanísticas implementadas sobre esta.

El WEI fue creado considerando la ponderación de 5 factores de evaluación, los cuales son aplicados y evaluados sobre distintas categorías de uso de suelo mediante el uso de sistemas de información geográfica, estos son:

- F1: Naturaleza antrópica o natural de la actividad desarrollada en el suelo
- F2: Consumo de agua asociado con el uso de suelo
- F3: Degradación del suelo (uso de productos químicos)
- F4: Sostenibilidad ambiental asociada con el tipo de uso de suelo (estabilidad del ecosistema).
- F5: Valor paisajístico de la actividad relacionada con el tipo de uso de suelo.

La definición para cada uno de ellos se presenta a continuación.

Factor 1: Naturaleza antrópica o natural de la actividad desarrollada en el suelo

Se refiere al tipo de actividad llevada a cabo en una zona determinada, específicamente a la naturaleza de la actividad, la cual puede ser de tipo antrópica o natural [67]–[69].

Las actividades de origen natural son las de mayor valor ambiental y mayor valor para el factor F1:

- Una actividad antrópica es cualquier acción o intervención realizada por el ser humano sobre un suelo determinado. Por ejemplo: la deforestación, la construcción de edificaciones, la pesca, la agricultura, etc.
- Una actividad natural es cualquier proceso existente en o producido por la naturaleza sin intervención del ser humano.

Factor 2: Consumo de agua asociado con el uso de suelo.

Se refiere al consumo de agua asociado a los diferentes tipos de uso de suelo. Por ejemplo: actividades mineras que cuentan con consumos elevados de agua se consideran con menor valor ambiental y por lo tanto un valor bajo para el factor F₂ que aquellos usos de suelo donde el consumo de agua es menor debido al origen de la actividad llevada a cabo en dicho suelo (ej. cultivos de secano) [70].

Factor 3: Degradación del suelo (uso de productos químicos)

Se refiere a la intensidad con la que se degrada el suelo debido a la actividad relacionada con el tipo de uso de suelo. Por ejemplo: Actividades que alteran fuertemente la composición del suelo como minería, zonas de vertido y construcciones cuentan con un valor ambiental bajo y por lo tanto un valor bajo para el factor F₃, a diferencia de otros tipos de uso de suelo que son de gran importancia para preservar la calidad ambiental de los suelos como los bosques y los cuerpos de agua [70], [71].

Factor 4: Sostenibilidad ambiental asociada con el tipo de uso de suelo (estabilidad del ecosistema).

Se refiere al resultado de las actividades relacionadas con los diferentes tipos de uso de suelo, considerando que una actividad sostenible es aquella que permite a la sociedad humana satisfacer sus necesidades haciendo un uso eficiente y racional de los recursos naturales (energéticos, hídricos, suelo, biodiversidad) considerando las necesidades de las generaciones actuales y futuras sin comprometer la salud de los ecosistemas y sin exceder la capacidad de regeneración de los ecosistemas. Por ejemplo: Actividades como la minería o la tala de árboles, son actividades que se consideran poco sostenibles debido a la velocidad con la que se llevan a cabo y a la baja capacidad de regeneración de los ecosistemas relacionados con los recursos que estas actividades demandan, por lo tanto, dichas actividades cuentan con valores bajos para el factor F₄ [72], [73].

Factor 5: Valor paisajístico de la actividad relacionada con el tipo de uso de suelo.

Se refiere al valor relativo que se asigna a cada uso de suelo o unidad de paisaje por razones ambientales, sociales, culturales o visuales. El paisaje se define como la combinación de determinados ecosistemas, sus interacciones, la geomorfología, el clima, las perturbaciones o elementos antrópicos que lo afectan y la abundancia relativa de los ecosistemas combinados [74].

Los componentes del paisaje son cuatro: el relieve, el agua, la cubierta vegetal y los elementos antrópicos.

El valor paisajístico que otorgamos a una Unidad de Paisaje es, por tanto, el resultado de considerar dos parámetros:

- Calidad Paisajística
- Visibilidad del Paisaje

La calidad paisajística de una unidad de paisaje viene determinada por la concurrencia en dicha unidad, de un mayor o menor número de recursos paisajísticos (el relieve, el agua, la cubierta vegetal y los elementos antrópicos), tanto los de orden ambiental, como los culturales, como los visuales.

La visibilidad es función de la combinación de distintos factores como cuánto paisaje percibimos, la calidad que se percibe del mismo, la duración de su percepción.

En este caso, contar con una variedad de recursos paisajísticos de origen natural aumenta el valor del factor F_5 , y un mayor número de recursos antrópicos para un determinado uso de suelo hace que el valor del factor F_5 disminuya conforme aumentan este tipo de elementos [74], [75].

La determinación de los valores para los factores de evaluación fue llevada a cabo individualmente de modo que fuera posible asignar un valor cuantitativo a cada factor F_i y uso de suelo j , cumpliendo la siguiente condición:

$$0 \leq F_{ij} \leq 100$$

Esto se llevó a cabo para cada una de las categorías de uso de suelo pertenecientes a la base de datos de uso de suelo del Sistema de Información sobre la Ocupación del Territorio Español (SIOSE), desarrollada en el año 2005 por el Instituto Geográfico Nacional de España. Esta base de datos cuenta con 40 clases simples y 46 clases compuestas; su escala es de 1:25.000 y su unidad de trabajo es el polígono.

Se obtuvo el correspondiente índice ambiental EI_j a través de la media ponderada de cada uno de los valores correspondientes a los factores de evaluación F_{ij} , considerando para cada uno un peso asignado α_i (3.20 y 3.21).

$$EI_j = \sum_{i=1}^5 \alpha_i F_{ij} \quad i = 1 \dots 5 \quad j = 1 \dots n_{cat} \quad (3.20)$$

$$\sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1 \quad (3.21)$$

Donde:

EI_j es el índice ambiental del uso de suelo j ($0 \leq EI_j \leq 100$)

α_i son los pesos asignados al factor i

F_i es el factor de evaluación i

n_{cat} son las categorías de uso de suelo

La aplicación de valores del índice ambiental EI_j se lleva a cabo sobre una discretización en polígonos irregulares de superficie variable, los cuales de manera conjunta constituyen la totalidad del área de estudio:

$$A_{total} = \sum_{k=1}^{n_{pol}} A_k \quad (3.22)$$

Donde:

A_{total} es la totalidad del área de estudio

A_k es el área del polígono k

n_{pol} es el número total de polígonos discretizados

Por tanto, una vez establecidos los valores del índice ambiental para cada uno de los usos de suelo, el índice WEI para un cierto polígono k (WEI_k) se determina de acuerdo a los valores del índice ambiental EI_j para cada uso de suelo existentes dentro de dicho polígono, considerando como pesos la proporción del área asignada a cada uso de suelo con base en el área total del polígono (3.23 y 3.24).

$$\beta_{jk} = \frac{A_{jk}}{A_k} \quad k = 1 \dots n_{pol} \quad (3.23)$$

$$WEI_k = \sum_{j=1}^{n_{jk}} \beta_{jk} EI_j \quad j = 1 \dots n_{jk} \quad (3.24)$$

Donde:

WEI_k es el índice ambiental ponderado para el polígono k

EI_j es el índice ambiental del uso de suelo j

A_{jk} es el área correspondiente al uso de suelo j dentro del polígono k

β_{jk} es el factor de ponderación del uso de suelo j para el polígono k

n_{jk} es el número de usos de suelo j dentro del polígono k

El resultado del índice ambiental ponderado obtenido en la ecuación 3.24, adopta valores que pueden variar entre 0 y 100, siendo que los valores cercanos a 0 indican un valor ambiental muy bajo, mientras que los valores cercanos a 100 indican un alto valor ambiental. Esto se realiza en concordancia con los cinco factores de evaluación F_i considerados en la definición del índice ambiental para cada uno de los usos de suelo.

De esta forma, los valores del índice WEI_k se estiman a través de los valores del índice EI_j , los cuales dependen de los valores asignados a los factores de evaluación F_i y los pesos asociados α_i a cada uno de estos factores. Los valores de F_i y α_i pueden ser modificados o adaptados por el usuario en cada caso, el cual será responsable de justificarlos, teniendo en cuenta las condiciones particulares del área de estudio que podrían modificar los valores propuestos.

No obstante, en la definición del WEI [62] se establecieron una serie de valores del índice WEI para la base de datos de uso de suelo de SIOSE. Los valores del índice WEI fueron obtenidos como

resultado de la combinación lineal de los cinco factores de evaluación (F_i) considerados en la definición del índice. Para su obtención, se han considerado iguales los valores de los pesos asociados a cada factor ($\alpha_i = 0,2$).

Estos valores han sido establecidos/diseñados para que los resultados finales del WEI permitan estudiar la evolución del valor ambiental en una cierta región, priorizando los usos de suelo naturales con consumos de agua bajos, bajos índices de degradación del suelo, alta sustentabilidad de los ecosistemas y altos valores paisajísticos.

La aplicación del índice WEI a cada una de las categorías de uso de suelo consideradas por SIOSE permite establecer una clasificación de los valores del índice basada en la discretización por rangos. En la definición del WEI [62] se propuso la clasificación mostrada en la tabla 3.2:

Tabla 3.2.- Valor ambiental en función del rango del WEI

Rango del WEI	Valor Medioambiental
$0 \leq WEI_k < 40$	Bajo
$40 \leq WEI_k < 70$	Medio
$70 \leq WEI_k \leq 100$	Alto

4. BIOLAND3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

4.1. JUSTIFICACIÓN

Dada la relevancia de las cuestiones anteriores, tanto desde el punto de vista medioambiental como desde el punto de vista económico, tener a disposición adecuadas herramientas de análisis y modelación para cuantificar y gestionar los residuos que son depositados en vertederos y los productos que se generan a partir de su descomposición es fundamental para que los vertederos puedan operar de manera sostenible y así cumplir los objetivos planteados por la legislación vigente en materia de protección medioambiental.

A través del análisis de los antecedentes recopilados, presentados en el estado del arte, se identificaron tres herramientas de modelación que se consideran de muy alto valor para para la gestión y la monitorización de vertederos de RSU, por su aplicabilidad, costes y resultados. Estas son:

- El concepto de carga de población en conjunto con el modelo de componentes-cohorte.
- El módulo de cálculo de la producción de biogás del modelo BIOLEACH.
- El índice ambiental WEI.

La primera parte de la metodología BIOLAND3 corresponde al cálculo de la fracción de residuos vertidos futura, el cual se realiza a través de la combinación de tres elementos o herramientas: (i) el concepto de “carga de población”, el cual engloba en un único parámetro los tres factores principales que definen la carga demográfica real de un territorio y que afectan a la producción de residuos (la población fija, la población no residente y la población asociada al turismo); (ii) una simulación estadística de la carga de población del área de estudio en los próximos años, basada en el método clásico de componentes-cohorte y el método de extrapolación de tendencias y (iii) la proyección futura de las tasas unitarias de generación y vertido de residuos.

La segunda parte de la metodología corresponde a la aplicación del modelo BIOLEACH [7], un modelo de gestión para vertederos de tipo biorreactor que permite estimar la producción máxima de biogás en condiciones óptimas, siguiendo la ecuación estequiométrica de Tchobanoglous et al. [40] y un modelo de cinética triangular.

En la tercera parte, se utiliza el índice ambiental WEI [62], que permite realizar un análisis ambiental de los usos de suelo del territorio basado en técnicas GIS, con el objetivo de determinar el impacto ambiental de medidas, acciones o políticas implementadas sobre el territorio, en este caso la construcción y gestión de un vertedero de RSU.

Se considera que, mediante la aplicación de estas herramientas, será posible establecer una metodología que servirá de apoyo para la toma de decisiones, ya que será capaz de responder a las necesidades reales en materia del dimensionamiento de vertederos, la gestión del biogás en vertederos y el monitoreo ambiental de vertederos (figura 4.1).

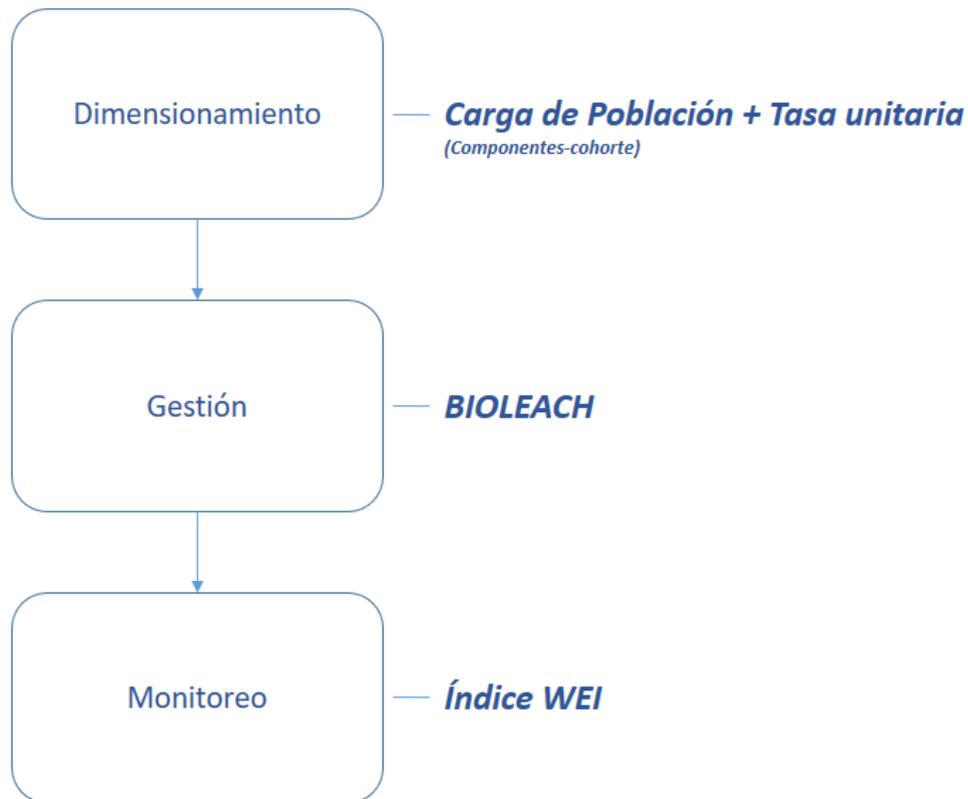


Figura 4.1.- Esquema general de la metodología BIOLAND3

4.2. DIMENSIONAMIENTO DE VERTEDEROS (CÁLCULO DE RESIDUOS VERTIDOS)

Con el objetivo de proveer de una herramienta que permita estimar adecuadamente las necesidades reales en materia de diseño de vertederos, que tendrá un ámbito geográfico determinado, la metodología BIOLAND3 propone como parte de su esquema metodológico, la elaboración de un estudio de modelación basado en los conceptos de “carga de población” y “tasa unitaria de vertido de residuos” para llevar a cabo el dimensionamiento necesario para la construcción de posibles vertederos.

Esto se estima necesario debido a que, a través de ambos conceptos, es posible abordar el principal problema en relación al cálculo de la producción de residuos de una zona determinada, el cual radica en conocer cuál es realmente la población generadora de dichos residuos, la cantidad de residuos que dicha población produce por habitante y el porcentaje de residuos que son vertidos con respecto al total generado.

Estimar la carga de población de una determinada zona es un proceso complejo, ya que implica conocer la población real generadora de residuos, la cual abarca no sólo la población “fija” que habita de manera permanente en el territorio (cuantificable a través de censos demográficos o

padrones municipales), sino también toda aquella población que visita el territorio de manera regular y no regular, generando aportes a la producción de residuos, la cual no es posible cuantificar en los censos demográficos y padrones. Esta población “externa” se compone principalmente de dos tipos, la población no residente (población que trabaja, que estudia o que dispone de una segunda residencia) y la población estacional asociada al turismo (PIRCV) [9].

El primer paso a desarrollar para el cálculo de los residuos que recibirá un vertedero corresponde a la recopilación de información asociada a los componentes demográficos básicos que tienen influencia en un cierto ámbito geográfico, a las características de la población no estacional y turística y al comportamiento asociado a la generación de residuos sólidos urbanos.

El segundo paso corresponde al desarrollo de un estudio demográfico mediante el cual se llevará a cabo una proyección de la “carga de población” del territorio, a través de la cual es posible conocer de manera precisa la población que generará los residuos de una determinada zona. Dicho parámetro considera una producción de RSU ajustada a las condiciones cambiantes del territorio, considerando no sólo a los ciudadanos “residentes” sino también a todas aquellas personas que, por diferentes motivos (vacacionales, trabajo, estudios, etc.), permanezcan en un territorio de manera temporal sin residir permanentemente en él. Este dato resulta imprescindible a la hora de determinar, regular y dimensionar instalaciones y servicios que las administraciones prestan, además, nos da la posibilidad de comparar la información de diferentes territorios, independientemente de su ubicación o su actividad económica principal [4].

El tercer paso para estimar los residuos que serán depositados en la futura instalación corresponde a la proyección de las tasas unitarias de generación y vertido de residuos sólidos urbanos, expresadas en kilogramos de residuos por habitante y día, para lo cual será necesario llevar a cabo un análisis de las tendencias relacionadas con la producción histórica de residuos y las políticas de gestión, específicamente en materia de vertido [76], [77].

Una vez realizadas las proyecciones correspondientes, aplicando las tasas de vertido de RSU a las estimaciones de población realizadas, será posible estimar la cantidad de RSU que serán enviados a vertedero por la población asociada a un cierto ámbito geográfico en un periodo futuro. Finalmente, para calcular el volumen que dichos residuos ocuparán, será necesario determinar el método de depósito con el que operará el vertedero a diseñar, el cual determina la densidad media que tendrán dichos residuos al llegar al emplazamiento. Conociendo el peso de los residuos y la densidad asociada al método de depósito, será posible calcular el volumen que estos ocuparán.

A continuación, se presenta el esquema metodológico para el dimensionamiento de vertederos de RSU planteado en la metodología BIOLAND3 (figura 4.2).

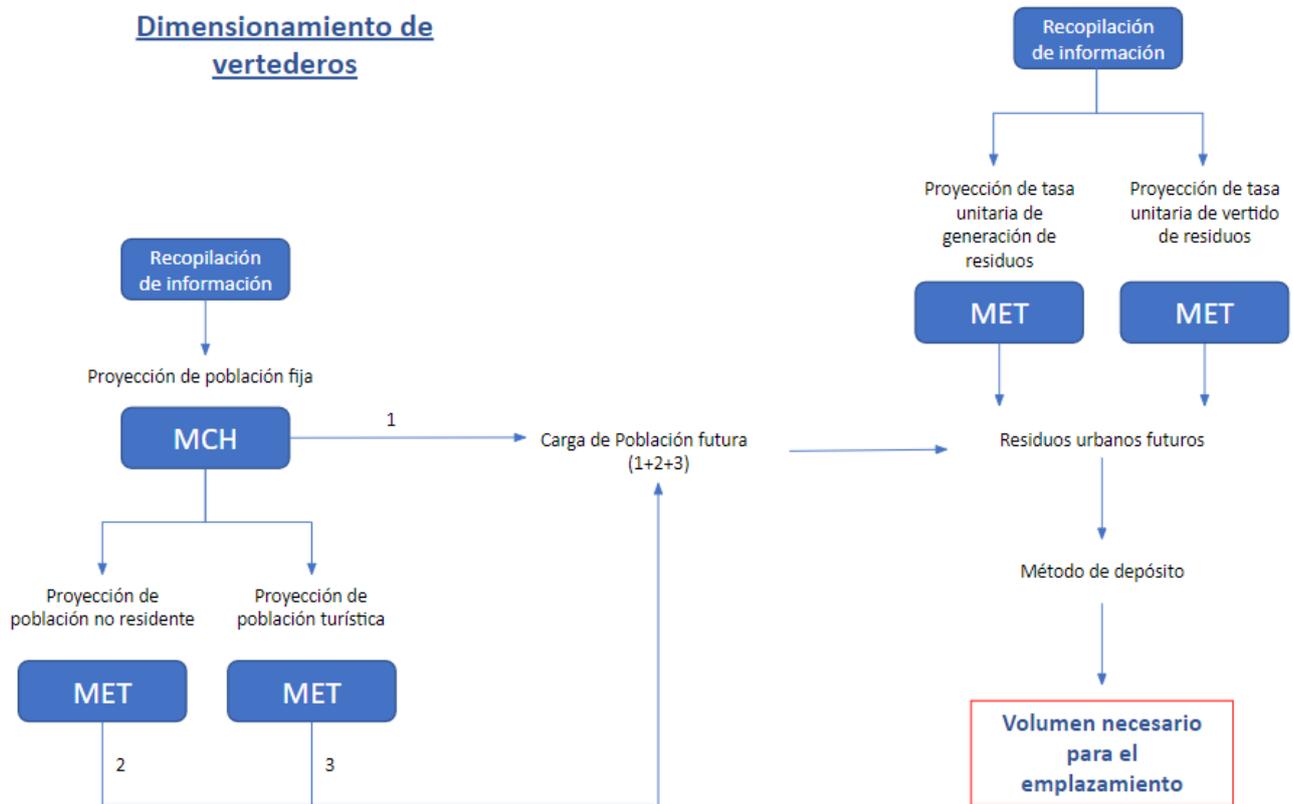


Figura 4.2.- Esquema metodológico propuesto para el dimensionamiento de vertederos.

La metodología propuesta para la proyección de la carga de población, las tasas unitarias de generación y vertido de residuos, a través de las cuales será posible determinar el espacio que será necesario considerar al momento de diseñar un nuevo vertedero de RSU se describe a continuación.

4.2.1. Proyección de la carga de población

El cálculo de la población futura generadora de residuos corresponde a una etapa clave en la metodología BIOLAND3. Dicho cálculo se desarrollará con base en el concepto de “carga de población”, el cual ofrece una estimación precisa de la carga demográfica real de un territorio para un periodo determinado [4]. La carga de población se obtendrá al sumar la población fija (empadronada o censada), la población no residente y la población asociada al turismo de un área específica.

$$CP = \text{Población empadronada} + \text{Población no residente} + \text{Población asociada al turismo}$$

4.2.1.1. Proyección de la Población fija

Como se mencionó en el estado del arte, actualmente existe una amplia variedad de metodologías desarrolladas para la modelación de la evolución demográfica de un territorio [24], [26]–[28].

Para la metodología BIOLAND3, se optó por realizar dicho cálculo a través de una simulación estadística de la población que residirá de manera permanente en el área de estudio en periodo futuro, en caso de mantenerse las tendencias y comportamientos demográficos consideradas. El fundamento teórico se basa en el método clásico de componentes-cohorte, el cual es considerado como el “*gold-standard*” de los modelos de proyección de población, cuyo origen se basa en el trabajo de Cannan [22].

Partiendo de la población residente o fija en cierto ámbito geográfico y de los datos observados para cada uno de los componentes demográficos básicos: la mortalidad, la fecundidad y la migración, se busca estimar la población correspondiente a un periodo futuro, partiendo de ciertas hipótesis sobre el devenir de esos tres componentes o fenómenos, los cuales son los que determinan el crecimiento y estructura de la población. Dicha estimación se realiza de manera separada por grupos etarios y sexo.

4.2.1.1.1. Método de componentes-cohorte

El método general de cálculo para la proyección de la población fija consiste en dos etapas, una etapa de recopilación y formulación de hipótesis y una etapa de aplicación.

Recopilación de información y formulación de hipótesis

En esta etapa se deberá recopilar información correspondiente a los fenómenos de mortalidad, fecundidad y migración, debiendo establecer hipótesis sobre su evolución en el tiempo para el periodo de proyección, así como información detallada acerca de la población de partida y su composición detallada por sexo y edad, esto con el objetivo de determinar las componentes o indicadores estadísticos necesarios para el desarrollo y la aplicación del modelo de componentes-cohorte. Los estadísticos que será necesario conocer son:

- Población fija del área de estudio, discretizada por edad y sexo, para el año en curso (Población de partida).
- Tasas de mortalidad del área de estudio, discretizadas por edad y sexo, para cada año del periodo futuro de modelación.
- Tasas de emigración al extranjero del área de estudio, discretizadas por edad y sexo, para cada año del periodo futuro de modelación.
- Tasas de emigración a otras provincias del área de estudio, discretizadas por edad y sexo, para cada año del periodo futuro de modelación.

- Flujos de inmigración del extranjero del área de estudio, discretizados por edad y sexo, para cada año del periodo futuro de modelación.
- Flujos de inmigración del extranjero del área de estudio, discretizados por edad y sexo, para cada año del periodo futuro de modelación.
- Ratios de masculinidad al nacimiento proyectados para el área de estudio, para cada año del periodo futuro de modelación.
- Tasas de fecundidad de mujeres del área de estudio, discretizadas por edad, para cada año del periodo futuro de modelación.

Aplicación del modelo

Se optó por implementar el esquema de simulación para el cálculo de la población futura a escala provincial, propuesto por el INE en su estudio de Proyecciones de Población de España 2020-2070, basado en el método de CC [23].

Para esto, se utilizarán las siguientes ecuaciones, las cuales fueron descritas en detalle en el estado del arte.

$$P_{s,0}^{t+1} = \frac{[1 - 0.5 * (m_{s,-1}^t + e_{s,-1}^t + ei_{h,s,-1}^t)] * N_s^t + IM_{s,x}^t + IMi_{h,s,x}^t}{[1 + 0.5 * (m_{s,-1}^t + e_{s,-1}^t + ei_{h,s,-1}^t)]} \quad (3.2)$$

$$P_{s,0}^{t+1} = \frac{[1 - 0.5 * (m_{s,-1}^t + e_{s,-1}^t + ei_{h,s,-1}^t)] * N_s^t + IM_{s,x}^t + IMi_{h,s,x}^t}{[1 + 0.5 * (m_{s,-1}^t + e_{s,-1}^t + ei_{h,s,-1}^t)]} \quad (3.2)$$

$$N_s^t = r * \sum_{14}^{49} \left(\frac{P_{M,x}^t + P_{M,x+1}^{t+1}}{2} \right) * f_x^t \quad (3.3)$$

$$P_{s,100+}^{t+1} = \frac{[1 - 0.5 * (m_{s,99+}^t + e_{s,99+}^t + ei_{h,s,99+}^t)] * (P_{s,99}^t + P_{s,100+}^t) + IM_{s,99+}^t + IMi_{h,s,99+}^t}{[1 + 0.5 * (m_{s,99+}^t + e_{s,99+}^t + ei_{h,s,99+}^t)]} \quad (3.4)$$

$$P_{tot}^{t+1} = \sum_{x=0}^{100+} P_{m,x}^{t+1} + P_{h,x}^{t+1} \quad (3.5)$$

Se introducirá en dichas ecuaciones todos los estadísticos previamente recopilados, discretizados por edad y sexo, partiendo de la población de partida, igualmente discretizada por edad y sexo.

A través de la aplicación de dicho esquema de simulación, será posible obtener una proyección de la población total calculada para todos los años (t) con los que se cuente con información demográfica que permita alimentar el modelo (P_{tot}^t), la cual corresponde específicamente al total de la población fija, para la cual se engloba el grueso de la población de edades 0-100+, de ambos sexos, por lo tanto, para simplificar la terminología, se mantendrá la siguiente relación:

$$P_{tot}^t = P_{fij}(t) \quad (4.1)$$

4.2.1.2. Proyección de población no residente

Para el cálculo de la población no residente, se optó por realizar dicha proyección, a través de la aplicación del método de extrapolación de tendencias, debido a su alta practicidad y a que, además, usualmente las administraciones públicas cuentan con información limitada con respecto a la población no residente. Los tres componentes que conforman a la población residente son, la población no residente que trabaja en el municipio, la población no residente que estudia en el municipio y la población estacional que cuenta con una segunda residencia en el municipio.

Para llevar a cabo la proyección futura de la población no residente, se deberá conocer la relación que guardan dichos componentes con respecto a la población fija actual del territorio. Se podrán plantear las hipótesis necesarias con respecto a la evolución que podrá tener la relación entre la población no residente y la población fija en el futuro. Como parte de la metodología BIOLAND3, se desarrollaron las ecuaciones donde se plantean dichas relaciones y su método de proyección (4.2, 4.3, 4.4 y 4.5).

$$fT_{nr}(t) = T_{nr}(t) / P_{fij}(t) \quad (4.2)$$

Donde

$fT_{nr}(t)$ es el factor de relación Trabajadores no residentes - población fija para el año t

$T_{nr}(t)$ es la población de trabajadores no residentes para el año t

$P_{fij}(t)$ es la población fija para el año t

$$fE_{nr}(t) = E_{nr}(t) / P_{fij}(t) \quad (4.3)$$

Donde

$fE_{nr}(t)$ es el factor de relación Estudiantes no residentes - población fija para el año t

$E_{nr}(t)$ es la población de estudiantes no residentes para el año t

$P_{fij}(t)$ es la población fija para el año t

$$fR_{sv}(t) = R_{sv}(t) / P_{fij}(t) \quad (4.4)$$

Donde

$fR_{sv}(t)$ es el factor de relación Residentes por segunda vivienda - población fija para el año t

$P_{nr}(t)$ es la población de residentes por segunda vivienda para el año t

$P_{fij}(t)$ es la población fija para el año t

Una vez consideradas las hipótesis planteadas, el cálculo de la población no residente para el periodo de proyección se llevará a cabo aplicando los factores de relación calculados sobre las proyecciones de población fija calculadas, a través del método de componentes-cohorte.

$$P_{nr}(t) = P_{fij}(t) * (fT_{nr}(t) + fE_{nr}(t) + fR_{sv}(t)) \quad (4.5)$$

Donde

$P_{nr}(t)$ es Población no residente total para el año t

$P_{fij}(t)$ es la población fija para el año t

$fT_{nr}(t)$ es el factor de relación Trabajadores no residentes - población fija para el año t

$fE_{nr}(t)$ es el factor de relación Estudiantes no residentes - población fija para el año t

$fR_{sv}(t)$ es el factor de relación Residentes por segunda vivienda - población fija para el año t.

Debido al carácter fundamental de sus actividades, se considera que la población correspondiente a cada uno de estos grupos únicamente habita (pernocta) en el territorio un cierto porcentaje del año, lo cual se traduce en una reducción de la producción de residuos que dicha población generaría si se considerara que se encuentran en el territorio el 100% del tiempo.

El porcentaje de tiempo que habita el territorio cada uno de los componentes de la población no residente se calculará en base a lo siguiente:

- **Trabajadores no residentes:** se deberá considerar que la población no residente que trabaja en el territorio, únicamente se encuentra en el territorio un cierto porcentaje del año, correspondiente a la duración de la jornada laboral promedio en el territorio considerando el periodo vacacional correspondiente. En el caso de España, dicho porcentaje corresponde al 21% del año, tiempo que está asociado a la jornada laboral promedio, durante 11 meses del año [4]. Dicho porcentaje podrá ser modificado para el caso que sea necesario.
- **Estudiantes no residentes:** se deberá considerar que la población no residente que estudia en el territorio únicamente habita en el territorio el 19% del tiempo del año, asociado a una jornada de estudio estándar sobre un periodo de 10 meses al año [4]. Esto podrá ser modificado para el caso que sea necesario.
- **Residentes por segunda vivienda:** Se deberá considerar que la población no residente que habita en el territorio debido a que cuenta con una segunda residencia, únicamente pernocta en sus residencias alrededor del 33% del año, correspondiente a tres meses de verano, dos semanas de navidad y dos semanas de pascua (PIRCV) [4]. En el caso de que se cuente con una distribución de los periodos vacacionales promedio distintos para otra zona, este porcentaje podrá ser modificado por el usuario.

Por tanto, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se plantea el siguiente esquema para el cálculo de la población no residente real (4.6):

$$P_{nr}(t) = T_{nr}(t) * (f_{p1}) + E_{nr}(t) * (f_{p2}) + R_{sv}(t) * (f_{p3}) \quad (4.6)$$

Donde

$P_{nr}(t)$ es la población no residente para el año t

$T_{nr}(t)$ es la población de trabajadores no residentes para el año t

$E_{nr}(t)$ es la población de estudiantes no residentes para el año t

$R_{sv}(t)$ es la población de residentes por segunda vivienda para el año t

f_{p1} es el factor de pernoctación anual para trabajadores no residentes

f_{p2} es el factor de pernoctación anual para estudiantes no residentes

f_{p3} es el factor de pernoctación anual para residentes por segunda vivienda

4.2.1.3. Proyección de población asociada al turismo

Al igual que para la población no residente, para la proyección de la población asociada al turismo se optó por aplicar el método de extrapolación de tendencias con base en la relación existente entre la población fija y la población asociada al turismo.

Para el cálculo de la población asociada al turismo, se deberán considerar dos parámetros fundamentales: el número de plazas de alojamientos turísticos existentes en el territorio y el grado de ocupación de dichas plazas en un periodo de tiempo determinado. El grado de ocupación por plazas relaciona la capacidad de alojamiento disponible en el período de referencia y su utilización efectiva en el mismo período. Se define como la relación entre el total de las pernoctaciones y el número de plazas ofertadas por el número de días que tiene el año. El producto de ambos parámetros definiría el número de pernoctaciones que se presentan en dicho territorio para el periodo de tiempo definido, obteniendo de este modo la carga poblacional que representa la actividad turística (4.7).

$$P_{tur}(t) = N_{plazas} * G_{ocup} \quad (4.7)$$

Donde

$P_{tur}(t)$ es la población turística en el año t

N_{plazas} es el número de plazas disponibles

G_{ocup} es el grado de ocupación turístico anual

Una vez conocida la carga poblacional actual asociada al turismo, será posible establecer la relación existente entre la población asociada al turismo y la población fija. Se podrán plantear las

hipótesis necesarias con respecto a la evolución que podrá tener la relación entre la población asociada al turismo y la población fija en el futuro (4.8).

$$fP_{tur}(t) = P_{tur}(t) / P_{fij}(t) \quad (4.8)$$

Donde

$fP_{tur}(t)$ es el factor de relación población turística - población fija para el año

$P_{tur}(t)$ es la población turística para el año t

$P_{fij}(t)$ es la población fija para el año t

El cálculo de la población asociada al turismo, para cualquier año (t) del periodo de proyección, se llevará a cabo aplicando los factores de relación planteados sobre las proyecciones de población fija establecidas anteriormente a través del método de componentes-cohorte (4.9).

$$P_{tur}(t) = P_{fij}(t) * fP_{tur}(t) \quad (4.9)$$

Donde

$P_{tur}(t)$ es la población turística para el año t

$P_{fij}(t)$ es la población fija para el año t

$fP_{tur}(t)$ es el factor de relación población turística - población fija para el año t.

4.2.1.4. Carga de población futura

La proyección de la carga de población se llevará a cabo a través de la suma de los componentes de la población fija, la población no residente y la población asociada al turismo para cualquier año (t) del periodo proyectivo (4.10).

$$CP(t) = P_{fij}(t) + P_{tur}(t) + P_{nr}(t) \quad (4.10)$$

Donde

$CP(t)$ es la carga de población para el año t

$P_{fij}(t)$ es la población fija para el año t

$P_{tur}(t)$ es la población turística para el año t

$P_{nr}(t)$ es la Población no residente para el año t

4.2.2. *Proyección del comportamiento de los residuos*

Como se mencionó anteriormente, el segundo paso para la estimar los residuos que serán vertidos corresponde a la proyección de las tasas de generación y de vertido de residuos, las cuales nos permiten conocer la cantidad total de residuos que genera una cierta de población (tasa unitaria de generación de residuos) y la proporción de dichos residuos que es enviada a vertederos (tasa unitaria de vertido) [76], [77].

4.2.2.1. Proyección de la tasa unitaria de generación de RSU

La tasa unitaria de generación de residuos corresponde a la cantidad de residuos que produce un habitante al día, la cual puede medirse en kilogramos/hab/día. Para su estimación, será necesario contar con información actual/histórica demográfica a modo de conocer la carga de población que ha existido en el territorio y sus tendencias en el tiempo. Por otra parte, será necesario contar con datos acerca de la producción actual/históricos de residuos para el territorio en cuestión, la tasa unitaria de generación se calcula a través de la relación entre la producción de residuos y la carga de población (4.11).

$$tugr(t) = R(t) / CP(t) \quad (4.11)$$

Donde:

$tugr(t)$ es la tasa unitaria de generación de RSU en el año t

$CP(t)$ es la Carga de población en el año t

$R(t)$ representa los kilogramos de RSU producidos en el año t

Para su proyección, se podrán plantear las hipótesis necesarias con respecto a la evolución que podrá tener la relación entre la carga de población y la generación anual de residuos.

4.2.2.2. Proyección de la tasa unitaria de vertido de RSU

Como se mencionó en el capítulo anterior, los flujos de residuos de un determinado sector generalmente cuentan con un proceso de gestión, el cual podrá variar dependiendo la zona en la que se lleve a cabo el análisis, por lo que es posible que se tengan que llevar a cabo diferentes consideraciones para el diseño y gestión de los vertederos de RSU.

Como parte de la metodología BIOLAND3, se consideró el esquema general de flujo para los residuos generados en la Comunidad Valenciana, el cual comienza con el proceso de recogida, seguido de su transporte a plantas de compostaje, en las cuales se lleva a cabo una selección y separación de los residuos en tres categorías, valorizables, compost y rechazo, de las cuales la fracción de rechazo corresponde a la categoría que se considera apta para su eliminación [7].

Debido a esto, para el dimensionamiento se considera de suma importancia incorporar el porcentaje de residuos destinados a vertedero. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, el proceso de gestión y valorización de dichos residuos hace que no se lleve a cabo el vertido de la totalidad de los residuos generados.

Por lo anterior, la tasa unitaria de vertido de residuos se deberá calcular como el producto de la tasa unitaria de generación de residuos y el porcentaje de residuos destinados a depósito controlado (4.12).

$$tuvr(t) = tugar(t) * R_{dc}(t) \quad (4.12)$$

Donde

$tuvr(t)$ es la tasa unitaria de vertido de RSU en el año t

$tugar(t)$ es la tasa unitaria de generación de RSU en el año t

$R_{dc}(t)$ es el porcentaje de residuos destinados a depósito controlado en el año t. Toma valores entre 0 y 1 dependiendo de las políticas y la eficiencia en la gestión de cada región

Para su proyección, se podrán plantear las hipótesis necesarias con respecto a la evolución que podrá tener el porcentaje de residuos destinados a depósito controlado, en función de posibles políticas de gestión, ambientales u otros factores.

4.2.3. Estimación de los RSU vertidos

A partir de las proyecciones realizadas para la carga de población y las tasas unitarias de vertido de RSU, se podrá estimar la cantidad de residuos urbanos que será necesario localizar dentro del vertedero a construir. Se deberá sumar el producto de la carga de población y la tasa unitaria de vertido para cada uno de los años del periodo proyectivo (4.13), considerando que la carga de población corresponde a los habitantes equivalentes que generan residuos destinados a vertedero a lo largo de un año y que la tasa unitaria de vertido es el peso de residuos vertidos por habitante al día.

$$PR_{tot} = \sum_{t=1}^n PR(t) = \sum_{t=1}^n CP(t) * 365 * tuv(t) \quad (4.13)$$

Donde

PR_{tot} es la producción de residuos para el periodo proyectivo de n años (expresada en kg)

$PR(t)$ es la producción de residuos para el año t (expresada en kg)

$CP(n)$ es la carga de población para el año n (expresada en habitantes)

$tuv(t)$ es la tasa unitaria de vertido de residuos para el año n (expresada en kg/hab/día)

4.2.4. Volumen necesario para el emplazamiento (dimensionamiento)

Finalmente, para calcular el volumen necesario que requerirá el vertedero para el depósito de los residuos estimados, será necesario establecer una densidad promedio específica para los residuos que serán vertidos, la cual dependerá del método de depósito de los residuos.

Los tres métodos principales de depósito de RSU en vertederos son: depósito a granel, depósito en balas y depósito con compactación in situ [78]. En la tabla 4.1, se presentan las densidades promedio asociadas a cada uno de estos métodos.

Tabla 4.1.- Densidad de los residuos según el método de depósito

Método	Densidad (t/m ³)
Granel	0,6 -0,7
Balas	0,9 - 1
Compactación in situ	1,2 - 1,3

El cálculo del volumen de residuos que serán depositados se llevará a cabo conforme a lo establecido en la ecuación (4.14).

$$V_r = \frac{PR * 0,001}{\rho} \quad (4.14)$$

Donde

V_r es el volumen total de residuos generados en el periodo proyectivo (m³)

PR(n) es la producción de Residuos para el periodo proyectivo (kg)

ρ es la densidad media de los residuos (t/m³)

4.3. GENERACIÓN DE BIOGÁS

Con el objetivo de proveer de una herramienta para la toma de decisiones en la gestión diaria de vertederos, respondiendo a las necesidades reales a las que debe enfrentarse los operadores de dichos emplazamientos, la metodología BIOLAND3 propone como parte de su esquema metodológico la elaboración de un estudio de modelación para el cálculo de la máxima producción de biogás en vertederos a escala mensual a través del uso del modelo BIOLEACH [79]. Esta información se considera altamente valiosa debido a que permitirá establecer las condiciones necesarias para llevar a cabo un adecuado aprovechamiento del biogás generado, de forma tal que se reduzca al mínimo el daño o deterioro del medio ambiente y el riesgo para la salud humana, teniendo en especial consideración la contribución al cambio climático.

4.3.1. Modelo BIOLEACH

De acuerdo con lo establecido previamente, la segunda parte de la metodología BIOLAND3 corresponde a la aplicación del modelo BIOLEACH, un modelo matemático de gestión para vertederos fundamentado en la ecuación de balance hídrico que permite realizar la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU, que además cuenta con la posibilidad de analizar el comportamiento del vertedero como biorreactor. En su totalidad, dicho modelo permite responder a las necesidades en la gestión real de cualquier vertedero de RSU sometido a determinadas condiciones meteorológicas, que recibe una cantidad conocida de RSU previamente caracterizados y que dispone de una balsa de almacenamiento de lixiviados. Para esto, el usuario debe disponer a escala mensual de datos relacionados con la cantidad y tipología de los residuos gestionados en el vertedero, datos procedentes de la estación climatológica local (precipitación y evaporación), así como las dimensiones del vertedero y la balsa de lixiviados. El modelo BIOLEACH se ha concebido desde su origen para ser una herramienta de apoyo a la gestión del vertedero que pueda ser utilizada por el operador del mismo [79].

En este trabajo, como parte de la metodología BIOLAND3, se considera únicamente el **módulo de cálculo de la máxima producción de biogás** que forma parte del modelo BIOLEACH. Dicho módulo permite estimar la máxima cantidad de biogás que es posible obtener para la tipología de residuos depositados en el vaso en condiciones óptimas, basado en un modelo de cinética triangular.

El modelo BIOLEACH estima la máxima producción mensual de biogás a partir de los siguientes cuatro factores, los cuales deben ser conocidos por el usuario:

- Composición mensual de los RSU, procedente habitualmente de ensayos de caracterización realizados en las plantas de tratamiento.
- Análisis químico elemental de los RSU mensualmente depositados en el vertedero.
- Masa total de RSU (kg) depositados en el vertedero mensualmente.
- Temperatura media mensual de la masa de residuos

Alimentado de estos datos, el módulo de producción de biogás del modelo BIOLEACH calcula la máxima producción de biogás a escala mensual de forma independiente para la fracción de residuos rápidamente biodegradables y lentamente biodegradables en condiciones óptimas, basándose en la ecuación estequiométrica de Tchobanoglous [40] y un modelo de cinética triangular (figura 4.3).



Figura 4.3.- Diagrama de flujo del módulo de producción de biogás propuesto del modelo BIOLEACH [79]

A continuación, se describe la metodología propuesta para la estimación de la producción de biogás en vertederos, a través de la aplicación de BIOLEACH.

4.3.1.1. Cálculo de la máxima producción de biogás

La metodología establecida para el cálculo de la máxima producción de biogás se basa en dos etapas principales:

- Recopilación de información
- Aplicación del modelo BIOLEACH

4.3.1.1.1. Recopilación de información

Cuantificación y caracterización de los RSU

Como primer paso para el cálculo de la máxima producción de biogás, se deberá realizar una recopilación de información relacionada con la caracterización y la cuantificación de los residuos aportados al vertedero. Los datos que se deben conocer son los siguientes:

- Masa de residuos depositada mensualmente.
Se deberá conocer la cantidad de residuos que se depositan mensualmente en kg.
- Temperatura media mensual de la masa de residuos.
Se deberá contar con un registro de la temperatura medida en el interior de la masa de residuos a escala mensual en °C.
- Composición de los residuos.
Se deberá realizar mensualmente una categorización de los porcentajes de residuos que se depositan en el vertedero con base en la tabla 4.2, a través de ensayos de caracterización.

Tabla 4.2.- Composición por categorías de RSU propuesta en BIOLEACH

<i>Categorías</i>
Restos comida
Papel - cartón
Residuos Jardín
Madera
Textiles
Goma
Cuero
Plásticos
Vidrio
Metales férricos
No férricos
Otros

[79]

Se deberá caracterizar la composición de los residuos y clasificarlos además en residuos rápidamente biodegradables (RRB) y residuos lentamente biodegradables (RLB), debiendo conocer el porcentaje que cada una de estas categorías representa (tabla 4.3).

Tabla 4.3 - Composición por categorías de los RRB y RLB

<i>Residuos rápidamente biodegradables</i>	<i>Residuos lentamente biodegradables</i>
Restos comida	Residuos Jardín (40%)
Papel - cartón	Madera
	Textiles
Residuos Jardín (60%)	Goma
	Cuero

[79]

El porcentaje de cada categoría se deberá calcular con base en las ecuaciones 4.15 y 4.16.

$$RRB = [RC + PC + RJ(60\%)]/RB_{tot} \quad (4.15)$$

Donde

RRB es el porcentaje de residuos rápidamente biodegradables, con valor entre 0 y 1

RC es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como restos comida

PC es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como papel-cartón

RJ(60%) es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como restos jardín (60%)

RB_{tot} es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como restos comida, papel-cartón, residuos jardín, madera, textiles, goma y cuero

$$RLB = [M + T + G + C + RJ(40\%)]/RB_{tot} \quad (4.16)$$

Donde

RLB es el porcentaje de residuos lentamente biodegradables, con valor entre 0 y 1

M es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como madera

T es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como textiles

G es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como goma

C es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como cuero

RJ(40%) es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como restos jardín (40%).

RB_{tot} es el peso en seco (kg) de los residuos clasificados como restos comida, papel-cartón, residuos jardín, madera, textiles, goma y cuero

Para cada uno de los componentes mencionados anteriormente, tanto orgánicos como inorgánicos, se deberá conocer el porcentaje de humedad en el caso que corresponda.

- Composición química de los residuos depositados.
Se deberán conocer las proporciones molares de C, H, O y N presentes en cada una de las categorías que componen el residuo a escala mensual, lo cual deberá realizarse a través de ensayos de caracterización y análisis químico elemental. Estos ensayos permitirán introducir al modelo el porcentaje de cada una de las tipologías o grupos de residuos de residuos realmente disponibles para su degradación para cada mes.

Una vez desarrollados los estudios de caracterización, cuantificación y análisis químico de los residuos depositados en el vertedero, se deberá introducir dicha información dentro del módulo de cálculo de la máxima producción de biogás del modelo BIOLEACH.

4.3.1.1.2. Aplicación del modelo BIOLEACH

A partir de los datos previamente recopilados, se realizarán los cálculos necesarios para obtener la producción de biogás por unidad de masa de RSU, para lo cual, el modelo BIOLEACH es capaz de distinguir entre el biogás producido por los RRB y por los RLB a escala mensual [79].

Los datos a introducir al modelo son:

- Cantidad mensual de residuos depositados
- Porcentaje de RRB y RLB
- Temperatura media de la masa de residuos
- Composición química ($C_aH_bO_cN_d$) de las fracciones RRB y RLB y su porcentaje de humedad
 - a, b, c, d son las proporciones molares de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, respectivamente

Una vez ingresados los datos, el módulo de cálculo de la máxima producción de biogás estimará la producción de biogás óptima, a través de la ecuación estequiométrica (3.17), un modelo degradación triangular, de forma independiente para los RRB y los RLB, un sub-módulo que permite calcular el agua consumida en la formación de biogás y un sub-módulo que permite calcular el vapor de agua producido durante la generación de biogás. Se considerará para cada instante, la edad de los residuos depositados en el vertedero, debido a que como se mencionó anteriormente, las tasas de producción de biogás varían en función del tiempo. El procedimiento de aplicación se describe a continuación.

En primera instancia, el modelo llevará a cabo el ajuste de la ecuación estequiométrica que rige la formación del biogás, el cual va a ser considerado por el modelo como una mezcla de metano, dióxido de carbono y amoníaco exclusivamente [79]. Para esto, es necesario introducir al modelo, la masa de cada uno de los componentes químicos elementales calculados anteriormente. El usuario debe calibrar cuál es el porcentaje de RSU que está efectivamente disponible para ser degradado (RRB y RLB).

Dicho proceso concluirá con la determinación de los valores de los coeficientes a, b, c y d, que son las proporciones molares de C, H, O y N, respectivamente para los RRB y los RLB (ecuación 3.17). A partir de todos los datos anteriores, BIOLEACH genera los valores de los volúmenes de biogás ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) producidos por cada kg de RRB y RLB, considerando que el peso específico del CH_4 y del CO_2 se mantienen constantes con valores de $0,717 \text{ kg/m}^3$ y $1,978 \text{ kg/m}^3$, respectivamente.

Posteriormente, el modelo procede a calcular automáticamente la masa de agua consumida durante el proceso de formación de biogás, la cual se obtiene a partir de la ecuación estequiométrica, del mismo modo como se obtuvo la cantidad de biogás. Además, el modelo calcula la cantidad de vapor de agua producida en el proceso de formación de biogás utilizando la ley de los gases perfectos.

El módulo de cálculo de la producción mensual óptima de biogás se completa con la implementación del modelo de cinética triangular, de forma independiente para los residuos rápida y lentamente biodegradables. A partir de los valores de los volúmenes de biogás producidos por cada kg de RRB y RLB en los RSU, BIOLEACH ajusta automáticamente los parámetros del modelo triangular de forma que determina la tasa mensual de producción de biogás por cada kg de RRB y RLB para cada mes (m^3/kg). De esta forma, el modelo calcula 60 valores mensuales (cinco años) de estas tasas para el caso de la fracción RRB y 180 valores mensuales (quince años) para el caso de la fracción RLB (figuras 4.4 y 4.5).

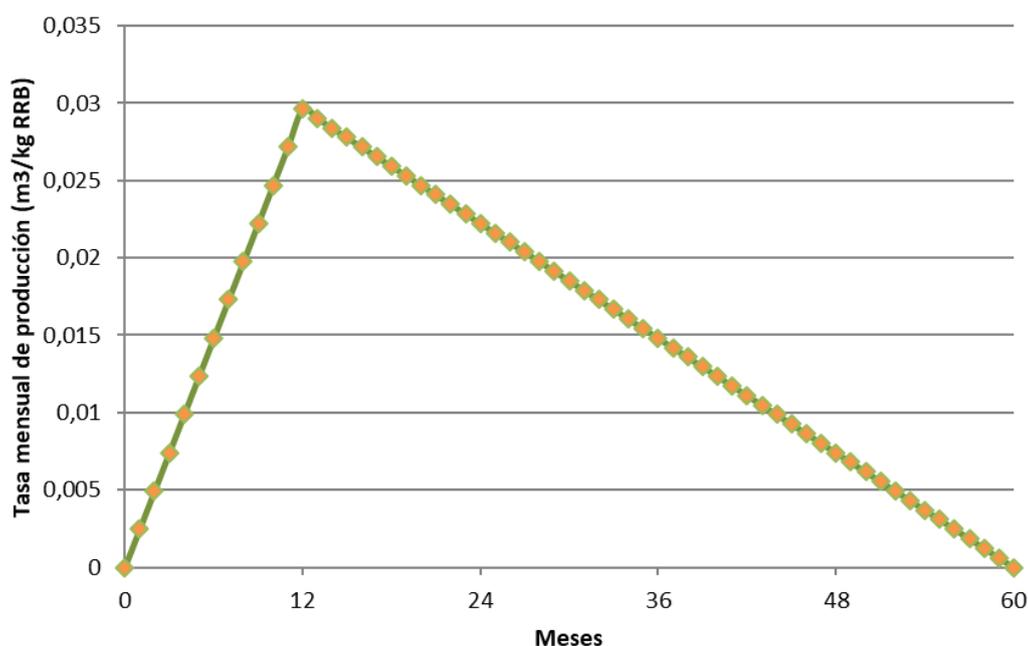


Figura 4.4.- Modelo de degradación triangular para los RRB

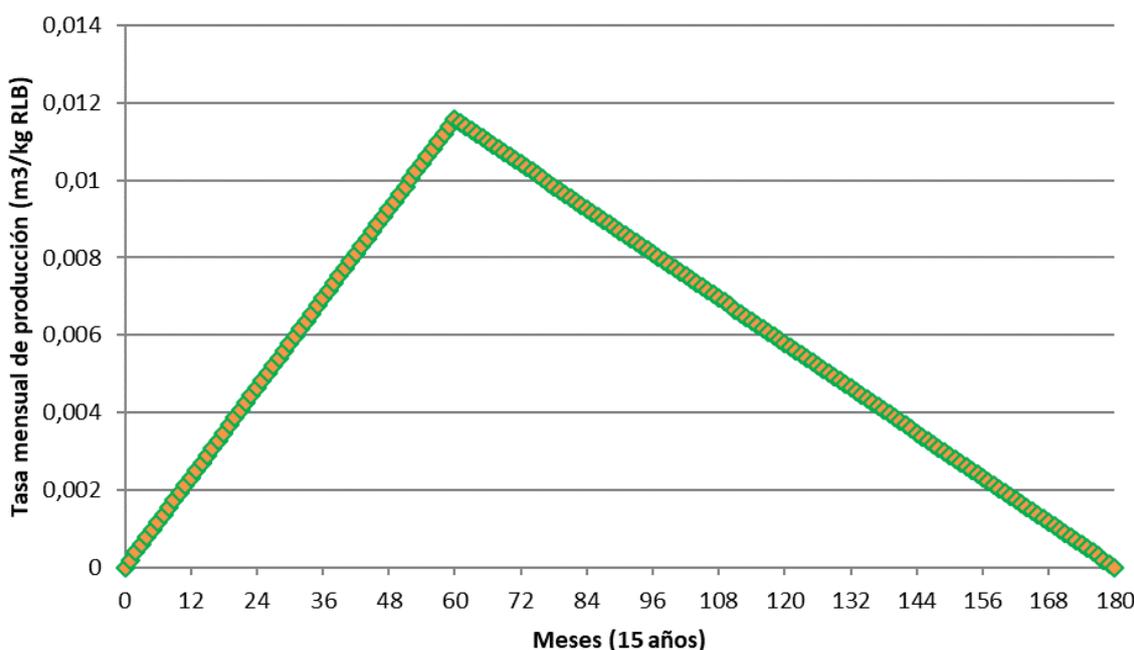


Figura 4.5.- Modelo de degradación triangular para los RLB

Una vez se han obtenido las tasas mensuales de biogás por kg de RSU, el modelo procede a calcular el volumen de biogás generado en condiciones óptimas por la degradación completa de los residuos considerando, para cada mes, la masa de RSU depositada.

La máxima producción de biogás (m³ biogás/mes) en un determinado instante se obtiene como convolución de todas las producciones de ambas fracciones de residuo (RRB y RLB) que hubieran sido depositadas en el vertedero, desde su puesta en funcionamiento hasta la fecha de cálculo.

4.4. MONITORIZACIÓN AMBIENTAL

Como se mencionó anteriormente, contar con un adecuado control ambiental de los efectos generados por la operación de vertederos de RSU, es fundamental para garantizar el equilibrio de los ecosistemas y la protección del medio ambiente. Para esto, la metodología BIOLAND3 propone el desarrollo de un estudio de monitorización ambiental como parte de su esquema metodológico, a través de la implementación del *Weighted Environmental Index* o índice WEI [62], el cual permite realizar un análisis ambiental de los usos de suelo del territorio basado en técnicas GIS.

El esquema metodológico propuesto para el control ambiental del ámbito geográfico asociado a vertederos de RSU consiste en la aplicación del índice WEI sobre un área con radio de 5 km alrededor del vertedero. Para esto, es necesario obtener los mapas de uso de suelo asociados a dicha área y posteriormente, determinar los valores del índice WEI para los usos de suelo con base en los factores de evaluación propuestos, los pesos asignados y la ponderación espacial de los valores del índice para cada polígono de uso de suelo existente dentro del radio de 5km.

Combinando ambos inputs, a través de una ponderación espacial utilizando sistemas de información geográfica, será posible obtener el valor del índice WEI para un año determinado (figura 4.6).

Finalmente, por medio de la comparación de los diferentes valores obtenidos para los años de operación del vertedero, será posible conocer la evolución que ha tenido dicho territorio en términos ambientales asociado a la construcción del vertedero.

Monitoreo Ambiental

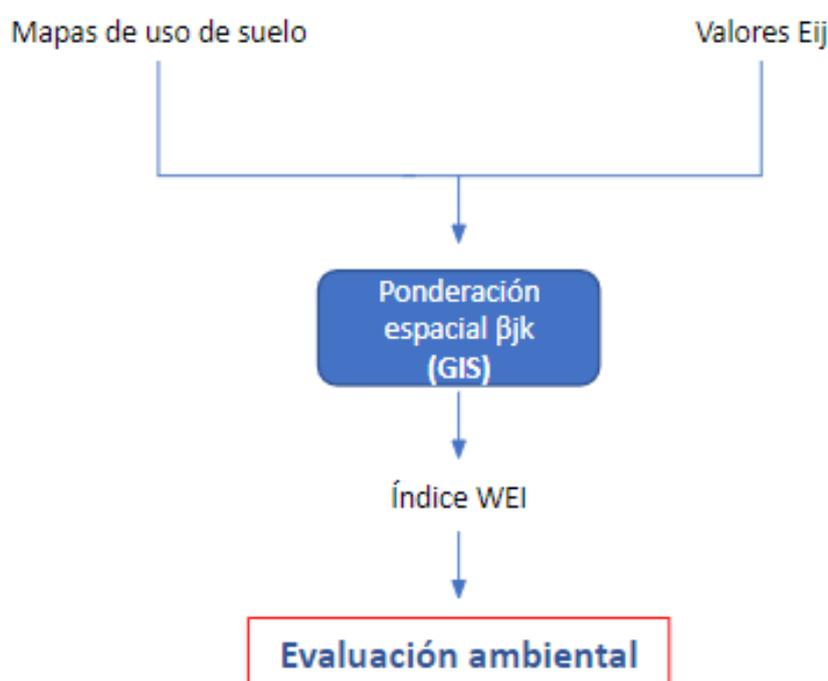


Figura 4.6.-Metodología para el monitoreo ambiental de vertederos.

4.4.1. Índice ambiental WEI

El índice WEI calcula el valor ambiental de una determinada área a través un análisis ambiental de los diferentes usos de suelo existentes en el territorio. Este análisis consiste en la evaluación de las características ambientales principales de dichos usos de suelo, a través de la valoración de 5 factores de evaluación, para los cuales se asigna un valor numérico con base en juicio de experto, los cuales son ponderados a través de factores de ponderación o pesos asignados por el usuario.

4.4.1.1. Índice Ambiental WEI y usos de suelo SIOSE

Como parte del desarrollo del índice WEI, en [62] se establecieron una serie de valores del índice en base a los factores de evaluación mencionados anteriormente, para la base de datos de uso de suelo de SIOSE (tabla 4.4) Como se mencionó en el estado del arte, los valores del índice WEI fueron obtenidos como resultado de la combinación lineal de los cinco factores de evaluación (F_i) considerados en la definición del índice, considerando iguales los valores de los pesos asociados a cada factor ($\alpha_i = 0,2$).

La lista de valores originales del índice WEI para la base de datos de SIOSE se presentan a continuación:

Tabla 4.4 –Valores asociados a los factores de evaluación (F_i) y los valores finales del índice WEI (WEI_k) para cada una de las clases existentes en la base de datos de uso de suelo de SIOSE

WEI - SIOSE								
Grupo	No. Clase	Descripción	F1	F2	F3	F4	F5	WEI_k
Cobertura artificial	101	Edificación	20	40	20	15	5	20
	102	Zona Verde Artificial y Arbolado Urbano	60	65	70	80	75	70
	103	Lámina de Agua Artificial	65	85	85	65	50	70
	104	Vial, Aparcamiento o Zona Peatonal sin Vegetación	20	40	20	15	5	20
	111	Otras Construcciones	20	40	20	15	5	20
	121	Suelo No Edificado	35	50	50	50	15	40
	131	Zonas de Extracción o Vertido	0	50	0	0	0	10
Cultivos	211	Arroz	60	10	80	45	55	50
	212	Cultivos Herbáceos distintos de Arroz	60	65	80	75	70	70
	222	Frutales Cítricos	60	65	80	75	70	70
	223	Frutales No Cítricos	60	65	80	75	70	70
	231	Viñedo	60	65	80	75	70	70
	232	Olivar	60	65	80	75	70	70
	241	Otros cultivos Leñosos	60	65	80	75	70	70
	290	Prados	80	80	90	100	100	90
Pastizal	300	Pastizal	80	80	80	80	80	80
Arbolado forestal	312	Fronosas Caducifolias	100	100	100	100	100	100
	313	Fronosas Perennifolias	100	100	100	100	100	100
	316	Coníferas	100	100	100	100	100	100
Matorral	320	Matorral	70	70	70	70	70	70
Terrenos sin vegetación	331	Playas, dunas y arenales	100	100	50	100	100	90
	333	Suelo Desnudo	70	50	20	20	40	40
	334	Zonas Quemadas	0	50	0	0	0	10
	336	Ramblas	20	50	20	50	60	40

	351	Acantilados Marinos	100	50	50	100	100	80
	352	Afloramientos Rocosos y Roquedos	80	50	30	30	60	50
	353	Canchales	80	50	40	40	40	50
	354	Coladas Lávicas	90	30	30	40	60	50
Coberturas húmedas	411	Zonas Pantanosas	80	50	30	80	60	60
	412	Turberas	80	50	30	80	60	60
	413	Salinas Continentales	90	30	40	80	60	60
	421	Marismas	90	60	70	90	90	80
	422	Salinas Marinas	90	60	70	90	90	80
Cobertura de agua	511	Cursos de Agua	100	100	100	100	100	100
	513	Lagos y Lagunas	100	100	100	100	100	100
	514	Embalses	10	100	100	100	90	80
	521	Lagunas Costeras	100	100	100	100	100	100
	522	Estuarios	100	100	100	100	100	100
	523	Mares y Océanos	100	100	100	100	100	100
No Predefinida	600	No Predefinida	50	50	50	50	50	50
Dehesas	701	Dehesas	80	80	80	80	80	80
Olivar-viñedo	702	Olivar-Viñedo	60	65	80	75	70	70
Asentamiento Agrícola Residencial	703	Asentamiento Agrícola Residencial	40	50	60	50	50	50
Huerta Familiar	704	Huerta Familiar	60	65	75	70	80	70
Urbano mixto	811	Casco	30	30	10	20	10	20
	812	Ensanche	30	30	10	20	10	20
	813	Discontinuo	30	30	10	20	10	20
Industrial	821	Polígono Industrial Ordenado	30	30	10	20	10	20
	822	Polígono Industrial sin Ordenar	30	30	10	20	10	20
	823	Industrial Aislada	30	30	10	20	10	20
Primario	831	Agrícola, Ganadero	60	60	70	50	60	60
	832	Forestal Primario	100	100	100	100	100	100
	833	Minero Extractivo	10	10	10	10	10	10
	834	Piscifactoría	30	60	60	50	50	50
Terciario	841	Comercial y Oficinas	20	20	20	20	20	20
	842	Complejo Hotelero	20	20	20	20	20	20
	843	Parque Recreativo	20	20	20	20	20	20
	844	Camping	20	40	40	50	50	40
Equipamiento/dotacional	851	Administrativo Institucional	20	20	20	20	20	20
	852	Sanitario	20	20	20	20	20	20
	853	Cementerio	20	20	20	20	20	20
	854	Educación	20	20	20	20	20	20
	855	Penitenciario	20	20	20	20	20	20

	856	Religioso	20	20	20	20	20	20
	857	Cultural	20	20	20	20	20	20
	858	Deportivo	25	15	20	20	20	20
	859	Campo de Golf	40	10	70	50	80	50
	860	Parque Urbano	60	65	70	80	75	70
Transporte	881	Red Viaria	10	10	10	10	10	10
	882	Red Ferroviaria	10	10	10	10	10	10
	883	Portuario	10	10	10	10	10	10
	884	Aeroportuario	10	10	10	10	10	10
Energía	891	Eólica	10	10	10	100	20	30
	892	Solar	10	10	10	100	20	30
	893	Nuclear	0	0	0	0	0	0
	894	Eléctrica	0	0	0	0	0	0
	895	Térmica	0	0	0	0	0	0
	896	Hidroeléctrica	10	10	10	10	10	10
	897	Gaseoducto/Oleoducto	10	10	10	10	10	10
Telecomunicaciones	900	Telecomunicaciones	0	0	0	0	0	0
Suministro de agua	911	Depuradoras y Potabilizadoras	10	20	10	100	10	30
	912	Conducciones y Canales	0	0	0	0	0	0
	913	Desalinizadora	0	0	0	0	0	0
Residuos	921	Vertederos y Escombreras	0	50	0	0	0	10
	922	Plantas de Tratamiento	0	10	0	30	10	10

[62]

4.4.1.2. Aplicación del Índice WEI

La aplicación de valores del índice ambiental EI_j se llevará a cabo sobre una discretización en polígonos irregulares de superficie variable, los cuales de manera conjunta constituyen la totalidad del área de estudio, para la cual se propone un área circular con radio de 5 km a partir del centro del vertedero (3.25).

$$A_{total} = \sum_{k=1}^{n_{pol}} A_k = 7853 \text{ Ha} \tag{3.25}$$

De esta forma, el índice WEI_k total del área de influencia del vertedero (7853 Ha) se obtendrá a través de la sumatoria del producto de los valores del índice ambiental EI_j asociados al uso de suelo (j) que define cada polígono (k) presente en la zona de estudio y los factores de ponderación espacial (β_{jk}) asociados a dichos polígonos (3.26). El valor para el índice ambiental ponderado (WEI_k) adopta valores que pueden variar entre 0 y 100, siendo que los valores cercanos a 0 indican un valor ambiental muy bajo, mientras que los valores cercanos a 100 indican un alto valor ambiental.

$$\beta_{jk} = \frac{A_{jk}}{A_k} \quad k = 1 \dots n_{pol} \quad (3.26)$$

$$WEI_k = \sum_{j=1}^{n_{jk}} \beta_{jk} EI_j \quad j = 1 \dots n_{jk} \quad (3.27)$$

4.5. MODELO CONCEPTUAL BIOLAND3

Los tres componentes que conforman la metodología BIOLAND3 representan en su conjunto una herramienta capaz de analizar la factibilidad que puede tener un cierto emplazamiento al momento de diseñar un vertedero de RSU, la eficiencia en la gestión del vertedero relacionada con la producción de biogás y la calidad ambiental del territorio asociado a éste (figura 4.7).

Con respecto al periodo de factibilidad o diseño, el modelo poblacional basado en el método de componentes-cohorte que conforma una de las componentes principales de la metodología BIOLAND3, nos permite, de la mano de la tasa unitaria de vertido de residuos, estimar el área que será necesaria considerar para el emplazamiento del vertedero. En segundo lugar, el modelo BIOLEACH permite estimar la producción máxima de biogás que podrá generar un vertedero en condiciones óptimas de operación.

La metodología BIOLAND3 también permite llevar a cabo una mejor gestión de dichos emplazamientos durante su fase de operación, a través de la aplicación del modelo BIOLEACH y el Índice WEI. El modelo BIOLEACH no solo sirve para hacer estimaciones futuras, ya que, si se alimenta con los datos obtenidos a través de ensayos durante la operación de los vertederos, permite conocer las condiciones reales de los emplazamientos, lo cual generando de esta manera un emplazamiento más eficiente y sostenible a futuro, el cual utilizará menos recursos y generará una mayor cantidad de biogás que podrá aprovecharse energéticamente. Por otra parte, la implementación del índice ambiental WEI durante la fase de operación, permitirá conocer los efectos actuales que generan las actividades relacionadas al vertedero sobre el medio ambiente, especialmente, en cuanto al paisaje, la disponibilidad de recursos hídricos, la naturaleza antrópica de las actividades relacionadas con los usos de suelo, la degradación de los suelos y la estabilidad de los ecosistemas. Se recomienda que dicha evaluación ambiental continúe durante la fase de clausura del vertedero ya que se conoce que dichos emplazamientos pueden generar efectos negativos sobre el medio ambiente aun después de su clausura.

Finalmente, el uso del índice ambiental WEI nos permitirá evaluar el impacto ambiental que podría tener en un futuro el emplazamiento y de ser necesario, tomar las acciones necesarias para la mitigación de posibles efectos negativos.

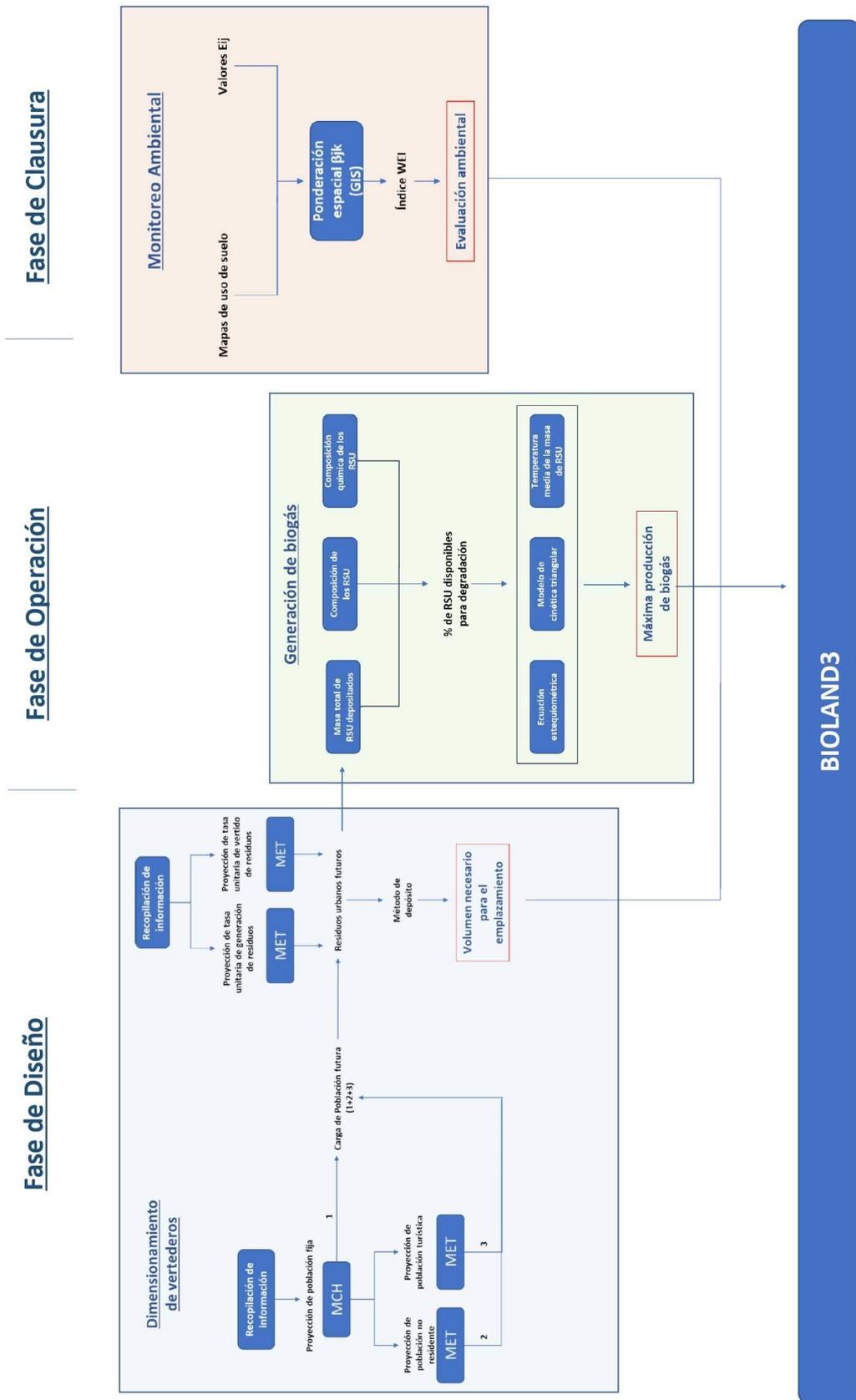


Figura 4.7.- Modelo conceptual de BIOLAND3

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE BIOLAND3

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología BIOLAND3, con el objetivo de demostrar sus aptitudes en relación al diseño, gestión y monitorización de vertederos de RSU.

En primera instancia, como parte de la aplicación de la metodología BIOLAND3, se llevó a cabo una proyección de los residuos sólidos urbanos que serán destinados a vertedero durante el periodo (2021-2034) para la Zona Castellón 1, a través de un estudio de modelación basado en los conceptos de “carga de población” y “tasa unitaria de vertido de residuos”.

La segunda parte de la metodología consiste en la estimación de la producción de biogás que tendrá el vertedero hipotético previamente dimensionado, que recibirá los aportes generados por la población asociada a la Zona Castellón 1, durante el periodo 2021-2034. Esto se llevó a cabo a través de un estudio de modelación, para el cual se implementó el módulo de cálculo de la máxima producción de biogás, que forma parte del modelo BIOLEACH.

Finalmente, se presenta un ejemplo de aplicación del índice ambiental WEI para el control ambiental en vertederos, a través del cual se llevó a cabo un análisis de la evolución del estado ambiental del territorio asociado a los vertederos de la Comunidad Valenciana, durante el periodo 2005-2015.

5.1. ÁREA DE ESTUDIO

El ámbito de aplicación que se considerará para el presente estudio se encuentra situado en la porción norte de la Comunidad Valenciana, en la provincia de Castellón y corresponde al sector administrativo denominado Zona Castellón 1, en adelante ZC1 [5].

5.1.1. Zona Castellón 1

Para llevar a cabo una correcta ejemplificación de una situación real a escala sub-regional, se optó por llevar a cabo la aplicación de la metodología BIOLAND3 con base en lo establecido en la Ley 10/2000, de Residuos de la Comunidad Valenciana, cuyo objetivo es coordinar la actuación de las diferentes administraciones públicas en aras de una adecuada gestión de los residuos.

Para lograr esto, en el ámbito autonómico se establecen dos tipos de planes, el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana y 11 diferentes Planes Zonales, ambos de obligado cumplimiento para todas las administraciones públicas y particulares, mediante los cuales se distribuyen en el territorio de la Comunidad Autónoma el conjunto de instalaciones necesarias para garantizar el respeto de los principios de autosuficiencia y proximidad.

En el presente estudio se considerará como área de estudio a la Zona Castellón 1, la cual, forma parte de la jurisdicción establecida dentro del Plan Zonal 1 de la Comunidad Valenciana.

De acuerdo con lo establecido en el PIRCV, la Zona I corresponde al sector norte de la provincia de Castellón, en la cual se incluyen las comarcas de Els Ports (Área 1), Alt Maestrat (Área 2), Baix Maestrat (Área 3) y parte de la Plana Alta (Área 5), junto con los municipios de Oropesa y Cabanes (figura 5.1).

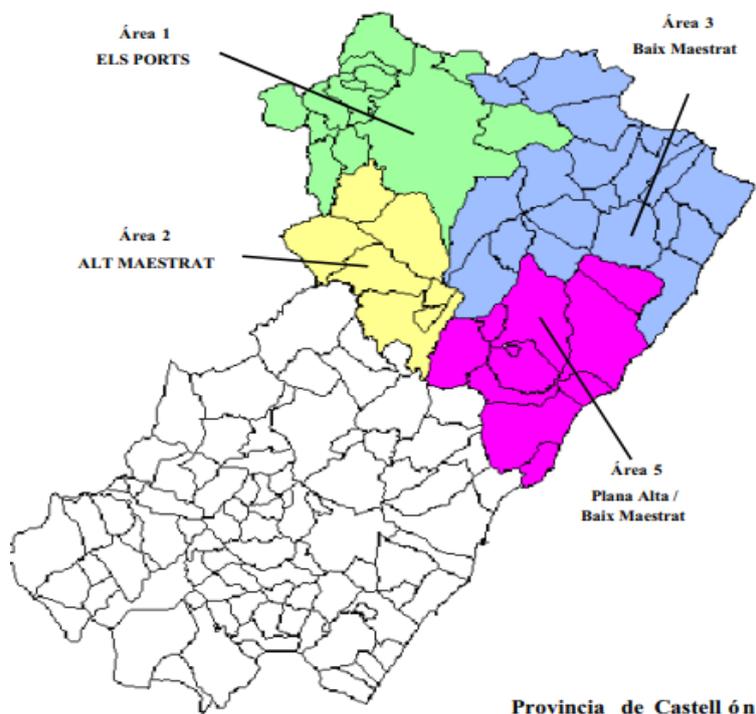


Figura 5.1.- Ámbito territorial de la Zona Castellón 1

En total, la Zona Castellón 1 se encuentra conformada por 49 municipios (tabla 5.1), dentro de los cuales existe una población empadronada de 117.258 habitantes (2021) [5].

Tabla 5.1 - Municipios ZC1

Municipios		
Albocàsser	Herbés	La Serratella
Alcalà de Xivert	La Jana	Sierra Engarcerán
Ares del Maestrat	La Mata de Morella	Tírig
Benassal	Morella	Todolella
Benicarló	Olocau del Rey	La Torre d'En Besora
Benlloc	Oropesa del Mar	La Torre d'en Doméneç,
Cabanes	Palanques	Torreblanca
Càlig	Peñíscola	Traiguera
Canet lo Roig	La Pobra de Benifassà	Vallibona
Castell de Cabres	Portell de Morella	Villafranca del Cid
Castellfort	Herbés	Vilanova d'Alcolea
Catí	Rossell	Vilar de Canes
Cervera del Maestre	La Salzadella	Villores
Cintorres	San Rafael del Río	Vinaròs
Les Coves de Vinromà,	San Jorge	Xert
Culla	Sant Mateu	Zorita del Maestrazgo
Forcall	Santa Magdalena de Pulpis	

A continuación, se presenta una caracterización de las principales características observadas dentro de la ZC1 en relación a su demografía y a la gestión de los RSU.

5.1.1.1. Demografía ZC1

En los últimos 23 años, la población empadronada en los municipios que comprenden la ZC1 ha tenido una evolución con distintas tendencias de crecimiento. El primer registro que se tiene corresponde al año 1998, para el cual se contaba con una población empadronada de 90.726 habitantes. Durante el periodo 1998-2009 se observó un crecimiento de tipo exponencial, con el cual la ZC1 pasó a tener un total de 123.828 habitantes para el año 2009. Posteriormente, el análisis de los datos del padrón permite observar que durante el periodo 2009-2018, la población sufrió una disminución hasta llegar a un total de 114.420 habitantes para el año 2018, significando una pérdida de aproximadamente 10.000 habitantes. Finalmente, en los últimos años, se ha vuelto a observar una tendencia al alza, teniendo incrementos pequeños año con año, hasta alcanzar los valores observados en el último registro de población, correspondiente al año 2021, en el cual se registró un total de 117.258 habitantes (tabla 5.2 y figura 5.2) [80].

Tabla 5.2.- Población empadronada Zona Castellón 1, 1998-2021

<i>Año</i>	<i>Población empadronada (habitantes)</i>	<i>Año</i>	<i>Población empadronada (habitantes)</i>
1998	90.726	2010	123.050
1999	92.265	2011	122.710
2000	93.690	2012	122.481
2001	96.279	2013	121.647
2002	99.560	2014	117.860
2003	102.386	2015	116.690
2004	104.291	2016	115.723
2005	108.329	2017	114.554
2006	112.976	2018	114.420
2007	117.070	2019	115.187
2008	123.030	2020	115.975
2009	123.828	2021	117.258

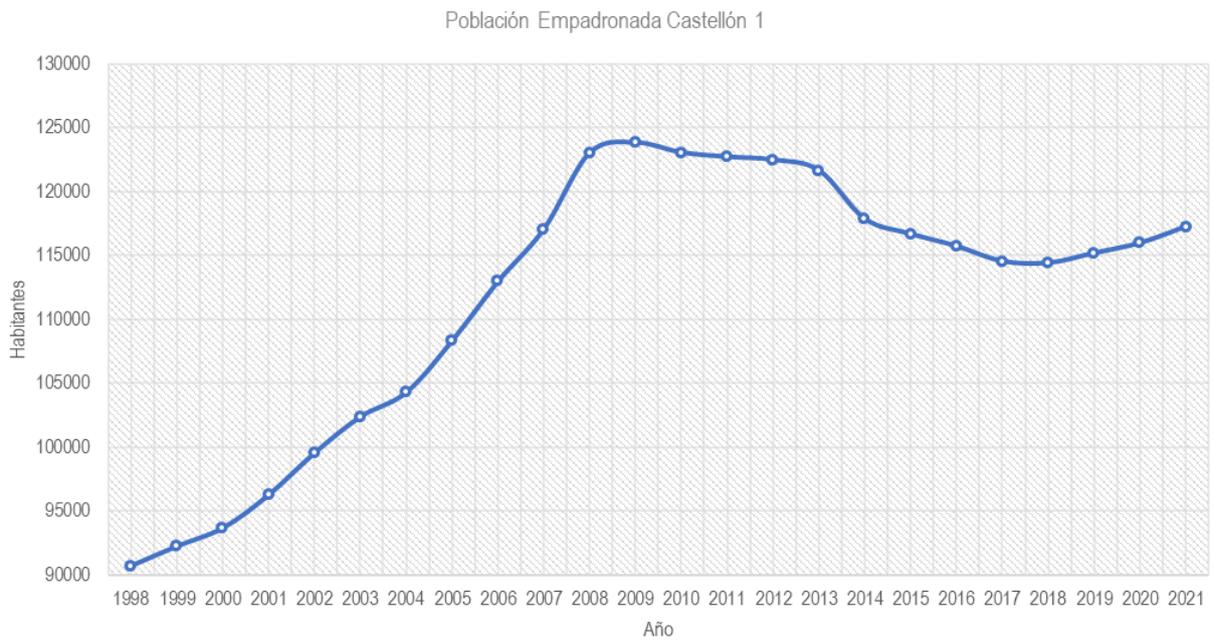


Figura 5.2 - Población empadronada Zona Castellón 1 (1998-2021)

5.1.1.2. Producción de residuos ZC1

Asociado a la evolución de la población en la ZC1, se han producido cambios relacionados con la producción de residuos, la cual ha tenido una evolución compleja en los últimos años.

De acuerdo con la información publicada por el Consorcio C1, el cual es corresponde a la entidad encargada de gestionar los residuos producidos en la ZC1, durante el periodo 2014-2017, la producción de residuos de la ZC1 contaba con una tendencia de crecimiento acelerada, a pesar de que la población contaba con una tendencia decreciente en dicho periodo. No obstante, a partir del año 2017, el análisis de la información permitió observar una disminución importante en la generación de RSU para la ZC1, lo cual representa una situación positiva, la cual puede deberse a numerosos factores como la implementación de políticas de reciclado, estrategias de gestión de residuos o los efectos relacionados con la pandemia de COVID-19 (figura 5.3).

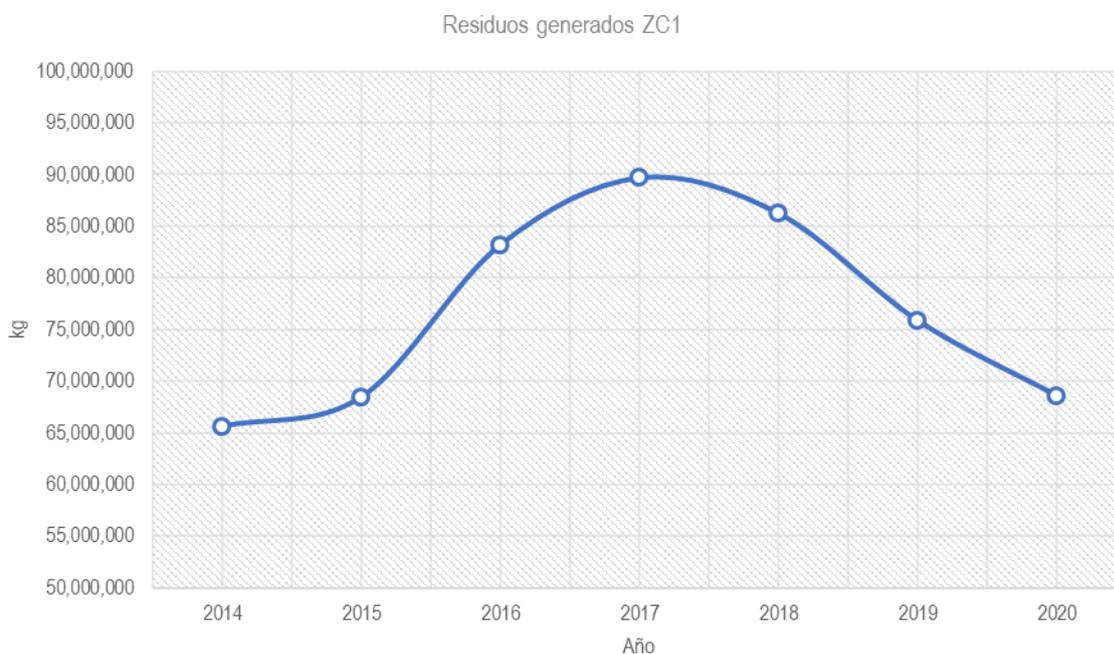


Figura 5.3.- Kg de residuos generados en la ZC1 (2014-2020)

La generación de RSU en la Zona Castellón 1 cuenta con una distribución mensual relativamente uniforme, con un periodo punta en los meses de verano (julio y agosto), donde el mes de agosto es el mes de mayor producción (13% del total) (figura 5.4) [81].

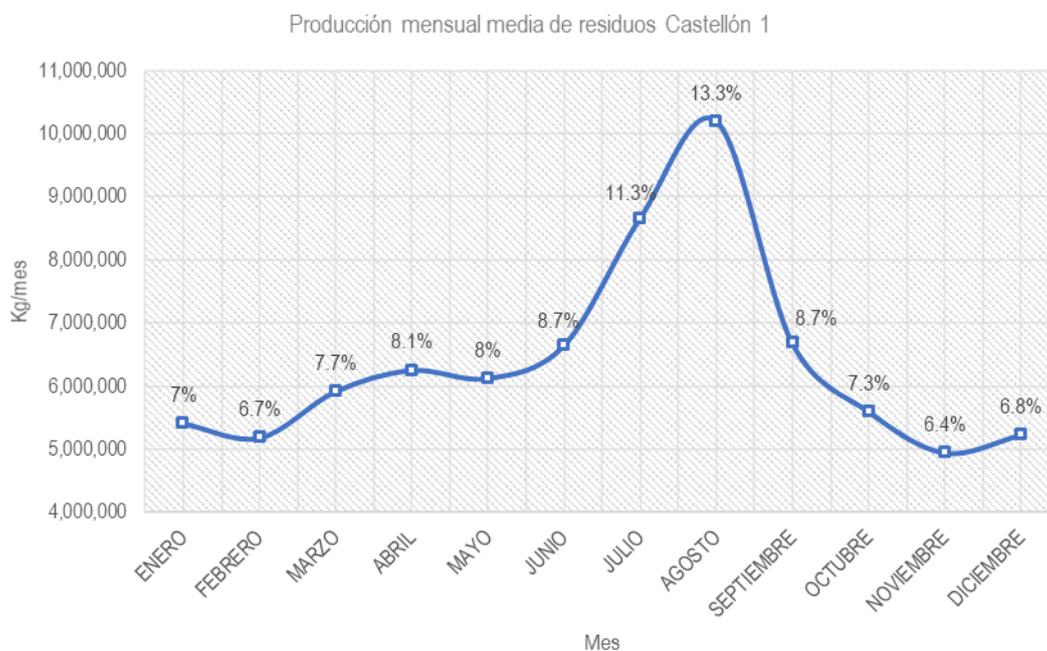


Figura 5.4.- Distribución mensual promedio de la producción de residuos en la ZC1
Elaboración propia, con datos de [81]

En relación al porcentaje de residuos que son enviados a vertedero con respecto al total, el Plan Zonal 1 fijaba el año 2012 como fecha máxima para alcanzar el objetivo establecido por el Plan Nacional de Residuos, dentro del cual se buscaba alcanzar un porcentaje del 33,1% para la fracción de residuos destinados a vertedero. El Plan Zonal estableció una proyección de dicho porcentaje para el periodo 2012-2020 en la ZC1, en la cual, se estimó un porcentaje de vertido del 26,9% para el año 2020.

5.2. CALCULO DE RESIDUOS VERTIDOS

La estimación futura de los residuos sólidos urbanos que serían destinados a vertedero para el periodo (2021-2034) en la Zona Castellón 1, se desarrolló en base al esquema conceptual propuesto en el capítulo anterior, el cual se comprende de dos elementos principales, la proyección de la carga de población y la proyección del comportamiento de los residuos.

5.2.1. *Periodo Proyectivo*

Se optó por llevar a cabo la proyección del volumen de residuos vertidos en la ZC1 para un periodo futuro de 14 años (2021-2034), debido a que la información disponible relacionada con los principales estadísticos demográficos a escala provincial se encuentra proyectada hasta el año 2034 [23]. No obstante, se considera adecuado dicho periodo considerando los tiempos de operación de vertederos y los alcances del estudio.

5.2.2. *Proyección de la carga de población*

Para la proyección de la carga de población, es necesario realizar en primera instancia la proyección de la población fija, ya que a partir de dicha proyección se llevarán a cabo las proyecciones de los otros componentes que conforman la carga de población, la población no residente y población asociada al turismo.

5.2.2.1. Proyección de la Población fija

Para la proyección de la población fija, se llevó a cabo una simulación estadística de la población que residirá en el área de estudio en los próximos años basada en el método de componentes-cohorte, partiendo de ciertas hipótesis sobre el devenir de los fenómenos de migración, fecundidad y mortalidad, los cuales son los que determinan el crecimiento y estructura de la población.

5.2.2.1.1. Método de componentes-cohorte

El método general de cálculo para la proyección de la población fija propuesto en la metodología BIOLAND3, consiste en dos etapas, una etapa de recopilación y formulación de hipótesis y una etapa de aplicación.

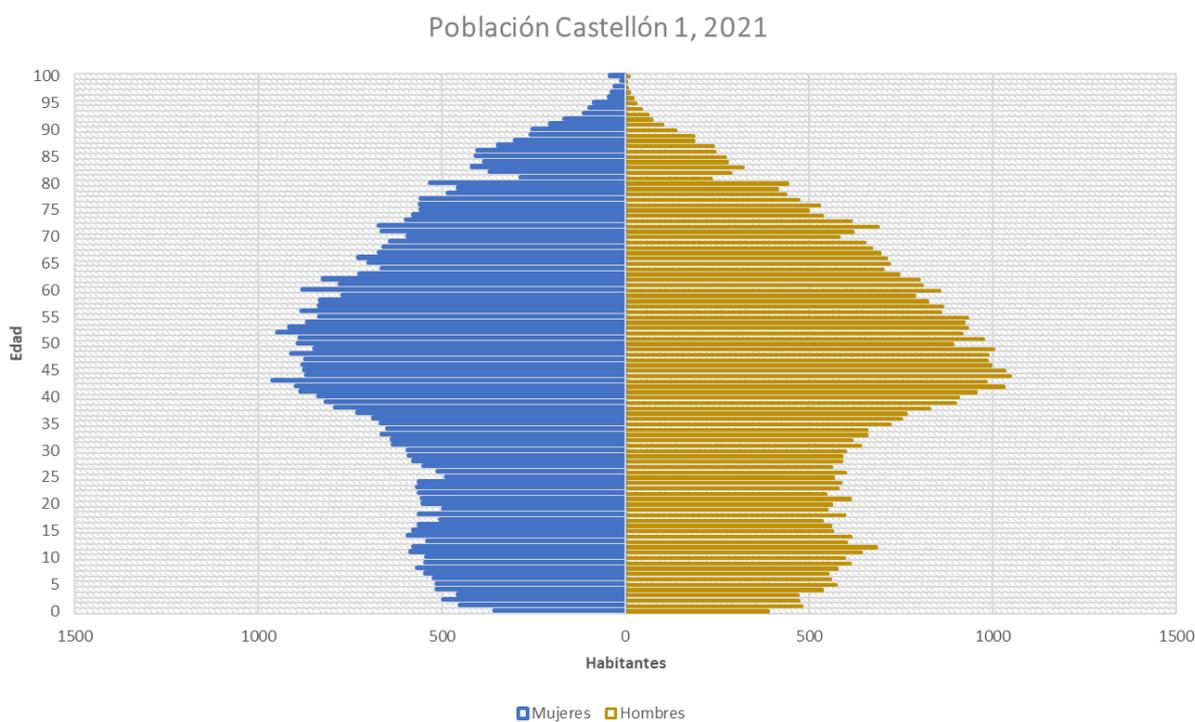
Recopilación de información y formulación de hipótesis

La información de partida y las hipótesis planteadas conforman la base para cualquier estudio de proyección de población. Es necesario contar con información confiable y detallada para poder desarrollar de manera óptima las hipótesis relacionadas con los componentes demográficos principales (mortalidad, fecundidad y migración). De igual forma, tener una caracterización precisa de la población de partida es fundamental para evitar errores en la estimación de la población. En el presente estudio, se recopiló la información necesaria para la representación actual de la población que conforma la ZC1, a través de datos del padrón municipal, proporcionados por el INE [80] y datos oficiales con respecto a los fenómenos de mortalidad, fecundidad y migración y su evolución futura para la Provincia de Castellón, dentro de la cual se localiza la ZC1 [23]

Población de partida

La información utilizada para el cálculo de la población fija asociada a la ZC1 se obtuvo a partir de los datos del padrón municipal, los cuales corresponden a un registro administrativo que se actualiza a escala anual conformado por los vecinos registrados de un determinado municipio [80]. A partir de esta información, se obtuvieron datos de la población discretizados por edad y sexo para el año 2021.

Con base en el análisis de los datos recopilados, se pudo observar que para el año 2021, la Zona Castellón 1 contaba con un total de 117.258 habitantes de los cuales 58.311 eran mujeres (49,7%) y 58.947 hombres (50,3%). La distribución de edades de dicha población es bastante similar en ambos sexos, teniendo en cuenta que el grueso de la población se concentra en el rango de 30-70 años (56% del total) (figura 5.5) [80].



*Figura 5.5.- Distribución por edades y número de habitantes de la población empadronada en la ZC1
Elaboración propia, con datos de [80]*

En la figura 5.5 se puede apreciar cómo la población de la ZC1 en el año 2021 cuenta con una distribución piramidal de tipo regresiva, en la cual el grueso de la población son adultos jóvenes/mayores. Esto se puede asociar a una baja natalidad y mortalidad.

Componentes demográficos básicos

Con respecto a la información asociada a los fenómenos de fecundidad, mortalidad y migración, se llevó a cabo una recopilación de información a través de fuentes oficiales, dentro de las cuales, se optó por utilizar los estadísticos e indicadores generados por el INE, como parte del estudio de Proyecciones de Población a Largo Plazo 2020-2070 (PPLP) [23].

A través de un análisis histórico de cada uno de los fenómenos demográficos mencionados anteriormente, el INE en su estudio de PPLP estableció 3 hipótesis principales sobre la incidencia futura de estos fenómenos a escala provincial. Con base en estas hipótesis, se generó una proyección futura, cuantificando dichas hipótesis en tasas específicas de fecundidad por edad, tasas específicas de mortalidad por sexo y edad, tasas de emigración al exterior e interprovinciales por sexo y edad y finalmente, flujos de inmigración exterior e interprovinciales para cada sexo y edad.

Las hipótesis principales son:

- Fecundidad

Las tasas de fecundidad utilizadas en el presente estudio corresponden a los datos asociados a la proyección desarrollada por [23] con respecto a la fecundidad de las mujeres para el periodo 2021-2034. Esta proyección fue basada en el planteamiento de diversas hipótesis sobre la evolución futura del nivel general de fecundidad, lo cual se ve sintetizado por el Indicador Coyuntural de Fecundidad (ICF) o número medio de hijos por mujer. De igual forma, se establecieron hipótesis sobre la evolución de los parámetros que sintetizan su distribución por edad, los cuales corresponden a la edad media a la maternidad (EMM) y la varianza de la EMM.

La proyección se llevó a cabo mediante el ajuste de una distribución de probabilidad Beta de parámetros ICF, EMM y varianza de EMM, con lo que se podrán calcular las tasas de fecundidad futuras. En [23] se consideró el uso de la función Beta debido a que las curvas de fecundidad por edad observadas corresponden a curvas continuas, acampanadas, unimodales y ligeramente desviadas a la derecha, por lo que la función de distribución de probabilidad Beta, corregida por límites para las edades mínima y máxima de fecundidad se ajusta de manera adecuada.

Por lo tanto, para obtener la proyección de la curva de fecundidad fue necesario obtener los parámetros de la distribución Beta para cada uno de los años del periodo proyectivo. En [23] se realizó esta proyección siguiendo una interpolación lineal entre el último valor observado (2019) y la media aritmética de una serie de proyecciones basadas en diferentes hipótesis, las cuales se obtuvieron a través de una encuesta realizada a demógrafos de toda España. Esta encuesta se realizó durante 2020 y participaron en ella 33 expertos. En las tablas 5.3 y 5.4 se presentan los últimos valores observados y los valores obtenidos a partir de la encuesta.

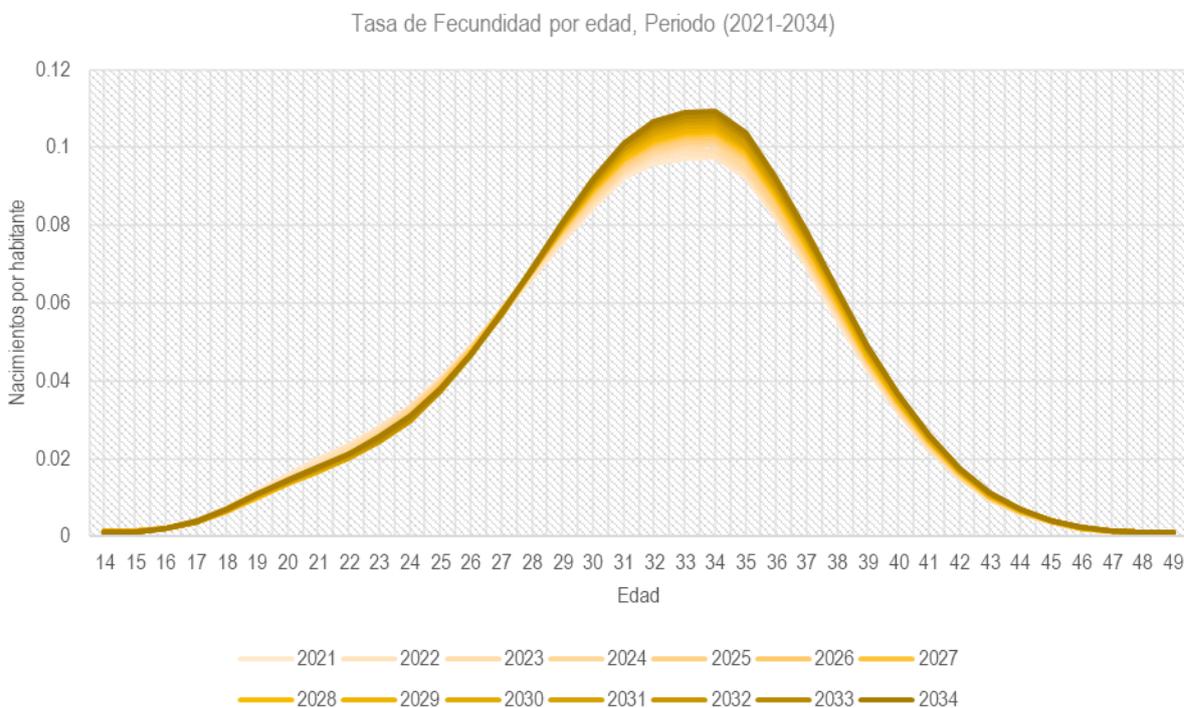
Tabla 5.3.- Indicador coyuntural de fecundidad y edad media a la maternidad, año 2019

Año 2019	Valor
ICF	1,17
EMM	32,9

Tabla 5.4.- Resultados de la encuesta a expertos para el ICF y el EMM futuros

Parámetro	Media	Desviación Típica
ICF dentro de 15 años	1,30	0,099
ICF dentro de 50 años	1,42	0,190
EMM dentro de 15 años	33,0	0,988
EMM dentro de 50 años	33,1	2,327

Como parte de los resultados generados en la PPLP 2020-2070, se obtuvieron los datos correspondientes a la tasa de fecundidad para mujeres entre 14 y 49 años para la Provincia de Castellón [23]. Se utilizaron estos datos para la Zona Castellón 1, asumiendo la hipótesis que plantea la homogeneidad de este fenómeno a lo largo de toda la provincia (figura 5.6).



*Figura 5.6.- Tasa de Fecundidad por edad en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]*

Se puede observar que para la tasa de fecundidad para las mujeres se proyecta un aumento durante el periodo 2021-2034, alcanzando su valor más alto en 0,10925, para las mujeres de 34 años en el año 2034, representando un aumento del 12% con respecto al valor establecido para el año 2021 (0,09734).

- Ratio de masculinidad

Con respecto al ratio de masculinidad al nacimiento proyectado, se utilizó el ratio proyectado por el INE en su PPLP para el periodo 2021-2034 a escala nacional para la Zona Castellón 1, asumiendo la hipótesis que plantea la homogeneidad de este fenómeno a lo largo de toda la provincia. La proyección realizada asume que dicho ratio se mantendrá constante para el periodo proyectivo, contando con un valor de 0,515201.

- Mortalidad

Para representar el comportamiento de la mortalidad de la población asociada a la ZC1, se utilizaron las tasas de mortalidad generadas por el INE para la Provincia de Castellón y el periodo 2021-2034 discretizadas por edad y sexo.

Estas tasas de mortalidad fueron calculadas con base en una proyección de la esperanza de vida al nacimiento, proyectada mediante la regresión lineal de una función logística frente al tiempo, el uso de tablas tipo de mortalidad [82] y los resultados obtenidos a través de encuestas realizadas a expertos a la pregunta de qué valor consideraban ellos que alcanzaría la esperanza de vida al nacimiento para los hombres y las mujeres residentes en España, separadamente, dentro de 50 años [23].

Se tomó como punto de partida, las defunciones observadas en el reporte de Movimiento Natural de Población del año 2019, publicado por el INE (tabla 5.5) [83].

Tabla 5.5.- Esperanza de vida para hombres y mujeres del año 2019

<i>Últimos datos disponibles (año 2019)</i>	<i>Valor</i>
Esperanza de vida hombres	80,9
Esperanza de vida mujeres	86,2

Tabla 1.6.- Resultados de la encuesta a expertos para la esperanza de vida futura

<i>Parámetro</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación Típica</i>
Esperanza de vida hombres dentro de 50 años	85,8	2,619
Esperanza de vida mujeres dentro de 50 años	90,0	2,386

Como parte de los resultados generados en la PPLP 2020-2070, se obtuvieron los datos correspondientes a las tasas de mortalidad proyectadas para la población asociada a la Provincia de Castellón, discretizadas por edad y sexo durante el periodo 2021-2034. Se utilizaron estos datos para la Zona Castellón 1, asumiendo la hipótesis que plantea la homogeneidad de este fenómeno a lo largo de toda la provincia (figuras 5.7 y 5.8).

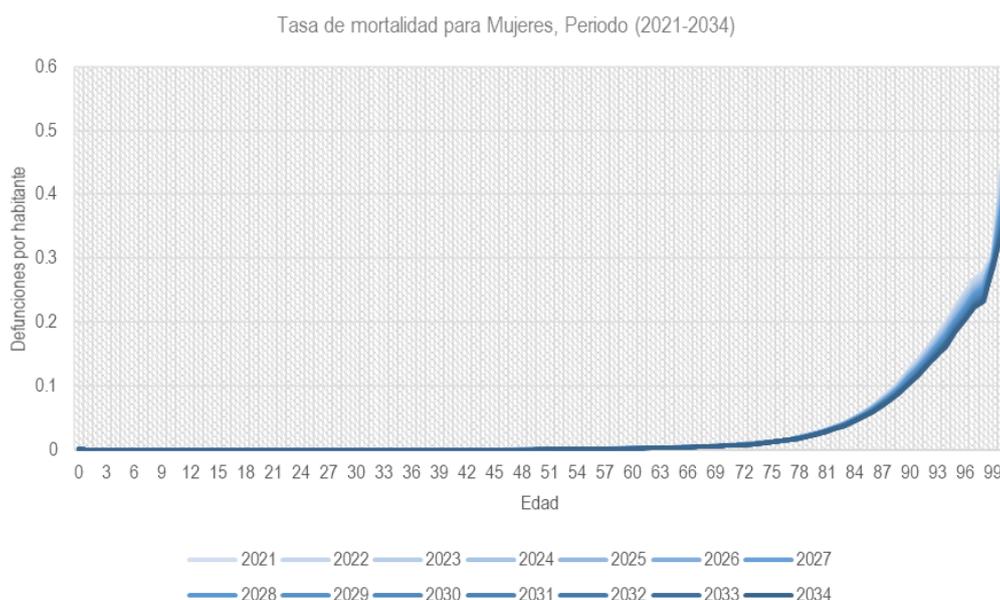


Figura 5.7.- Tasa de Mortalidad por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

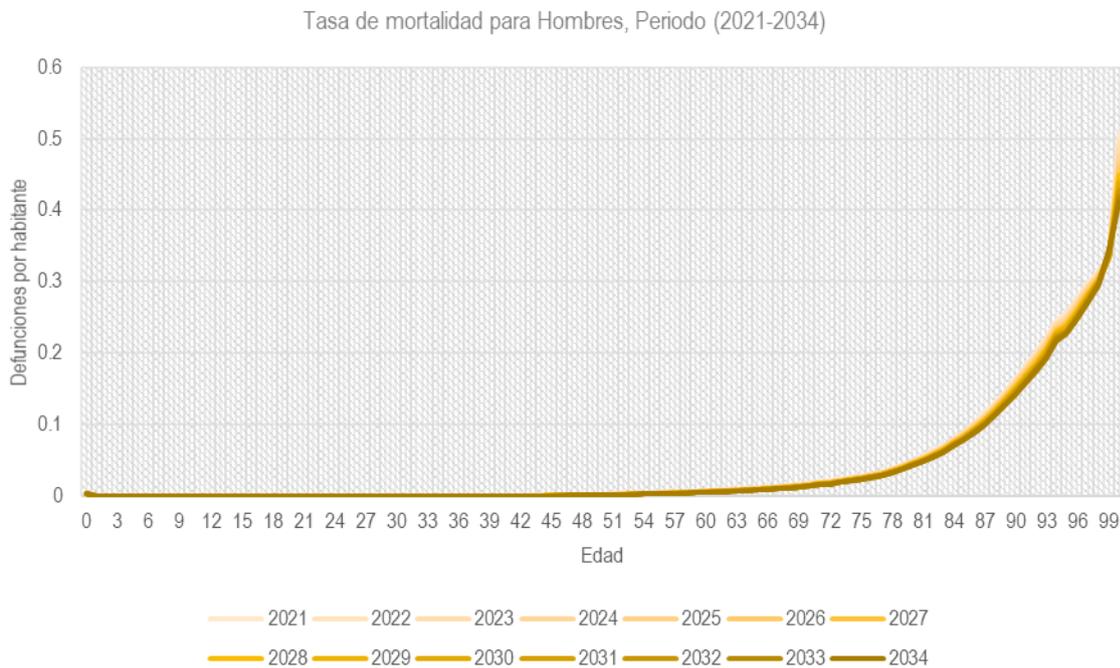


Figura 5.8.- Tasa de Mortalidad por edad para hombres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

Se observa que las tasas de mortalidad alcanzan mayores valores para la población de hombres de edad mayor, teniendo un valor de 0,41 para hombres de edad >100 en el año 2034 y un valor de 0,33 para las mujeres en el mismo año de la misma edad. Se observa también una tendencia decreciente asociada a una mayor esperanza de vida de la población, las tasas toman valores menores conforme aumenta la temporalidad del periodo proyectivo, tanto para hombres como para mujeres.

- Migraciones

Emigración exterior

Para representar el comportamiento futuro de la emigración al extranjero en la ZC1 durante el periodo proyectivo, se optó por utilizar los resultados de las proyecciones generadas por el INE correspondientes a las tasas de emigración para la Provincia de Castellón, en el periodo (2021-2034) discretizadas por edad y sexo.

Las tasas de emigración exterior futuras se calcularon proyectando cada uno de sus componentes, estos son: la intensidad de la emigración del año (índice sintético de emigración exterior), un diferencial provincial y una distribución por generaciones de dicha intensidad a escala provincial. La proyección se realizó a partir del análisis de los datos asociados a dichos componentes de los últimos cinco años y los resultados obtenidos según una encuesta realizada a expertos (índice sintético de emigración exterior).

La distribución etaria, el diferencial provincial y la distribución por sexo se proyectaron de acuerdo al análisis de las proporciones observadas en los últimos cinco años de la Estadística de Migraciones, considerando que dicha proporción se mantendrá para el periodo proyectivo (2021-2034).

Se utilizaron estos datos para la Zona Castellón 1, asumiendo la hipótesis que plantea la homogeneidad de este fenómeno a lo largo de toda la provincia (figuras 5.9 y 5.10).

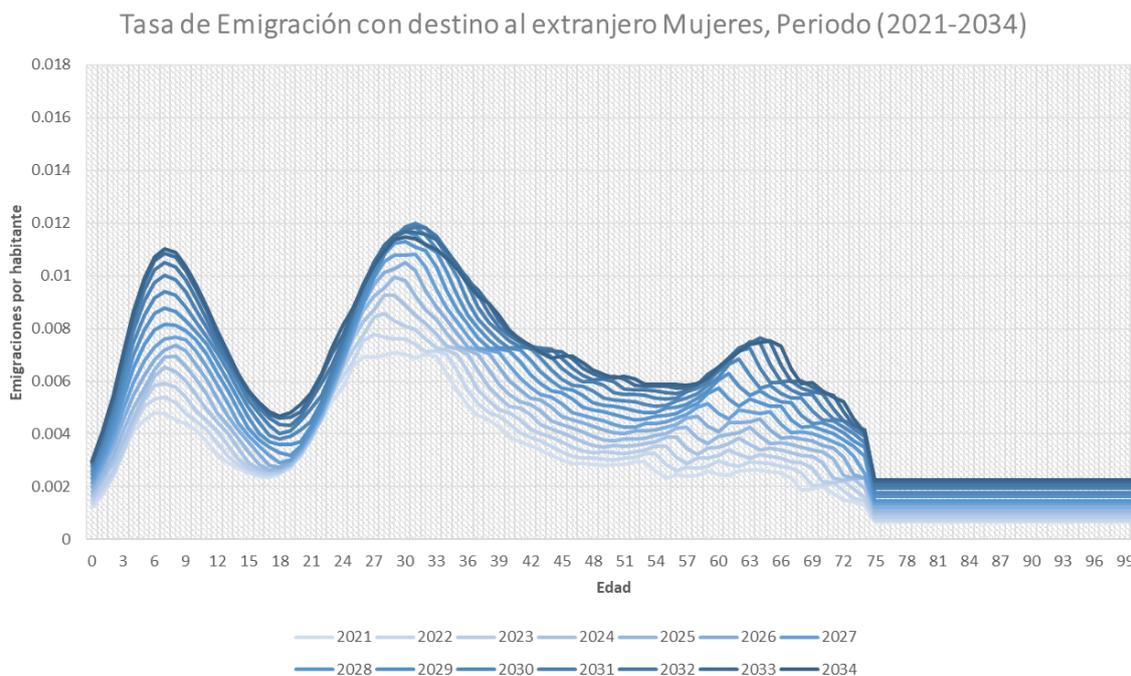


Figura 5.9.- Tasa de emigración con destino al extranjero por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

Los valores obtenidos a partir de la recopilación de información permiten observar que el comportamiento de la población asociada a la ZC1 con respecto a la emigración cuenta con una tendencia al alza, tanto para los hombres como para las mujeres, no obstante, se observan comportamientos distintos para los diferentes rangos de edades, donde los mayores aumentos se presentan para la población de edad media 25-50. Finalmente, las proyecciones realizadas por el INE asumen que, a partir de los 75 años, las tasas de emigración al exterior se mantienen constantes para la población, tanto para mujeres como para hombres, lo cual se puede apreciar claramente en las figuras 5.9 y 5.10.

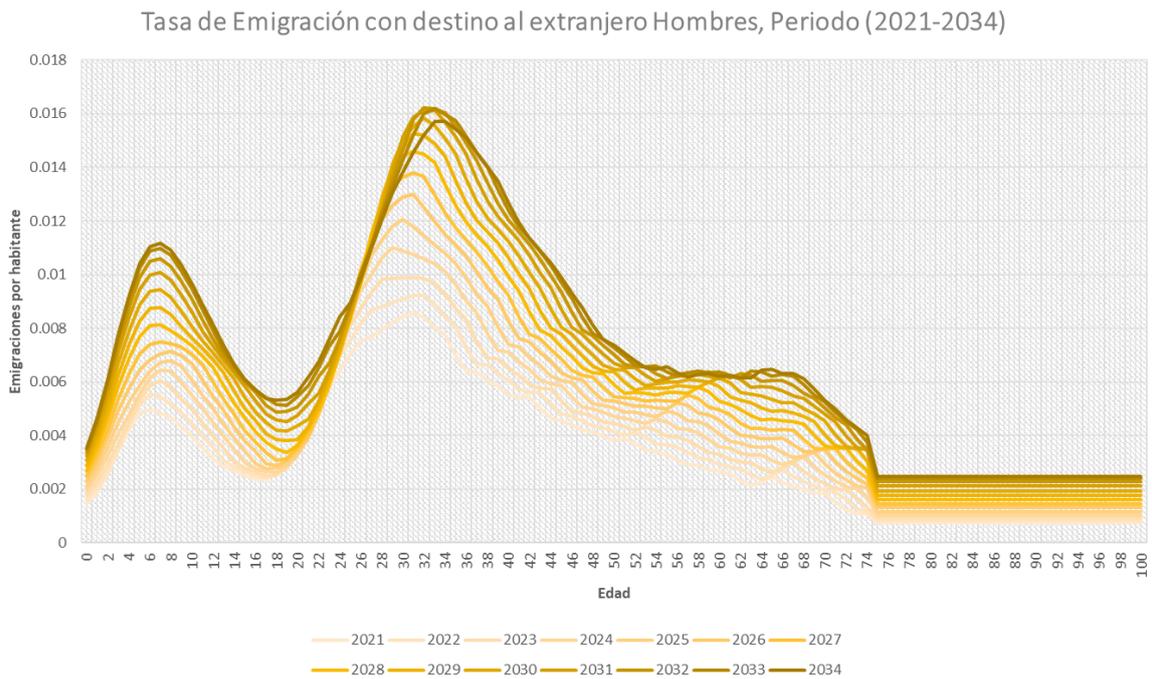


Figura 5.10.- Tasa de emigración con destino al extranjero por edad para hombres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

Inmigración exterior

Para representar el comportamiento futuro de la inmigración proveniente del extranjero en la ZC1 durante el periodo proyectivo, se optó por utilizar los resultados de las proyecciones generadas por el INE correspondientes a los flujos de inmigración exterior para la Provincia de Castellón, en el periodo (2021-2034) discretizadas por edad y sexo.

El cálculo llevado a cabo por el INE se basa en el establecimiento de una intensidad de inmigración global para cada año del periodo proyectivo. Estos flujos se reparten a su vez por sexo, generación y provincia, con distribuciones promedio obtenidas a partir de las correspondientes a los últimos cinco años 2015-2019 de la Estadística de Migraciones. Para evitar la variabilidad propia de un mayor nivel de detalle para un conjunto de datos menor, estas distribuciones proyectadas se mantienen constantes a lo largo de la proyección.

Así, la proyección del flujo de inmigración exterior que llegaría en los próximos 15 años se llevó a cabo a través de una Proyección de los flujos anuales de inmigración exterior desarrollada a través de la interpolación lineal entre el valor actual y el valor asignado según la encuesta a los expertos, obtenidos como la media aritmética de las respuestas.

Se asume una distribución por sexo del 49,2% de hombres y 50,8% de mujeres y una distribución etaria basada en el promedio de la estructura de los últimos 5 años, a la cual se le aplicó una transformación para obviar la extrema variabilidad que presentan los datos en las edades más avanzadas y un proceso de suavizado a través de medias móviles con el

objetivo de evitar posibles comportamientos aleatorios de carácter coyuntural. Para la distribución por provincias, el cálculo se llevó a cabo aplicando un coeficiente de reparto provincial constante durante todo el periodo proyectivo, el cual se obtuvo a través del promedio de dicho valor observado en los últimos cinco años.

Como parte de los resultados generados en la PPLP 2020-2070, se obtuvieron los datos correspondientes a los flujos de inmigración procedentes del extranjero proyectados para la población asociada a la Provincia de Castellón, discretizadas por edad y sexo durante el periodo 2021-2034. Se utilizaron estos datos para la Zona Castellón 1, asumiendo la hipótesis que plantea la homogeneidad de este fenómeno a lo largo de toda la provincia (figuras 5.11 y 5.12).

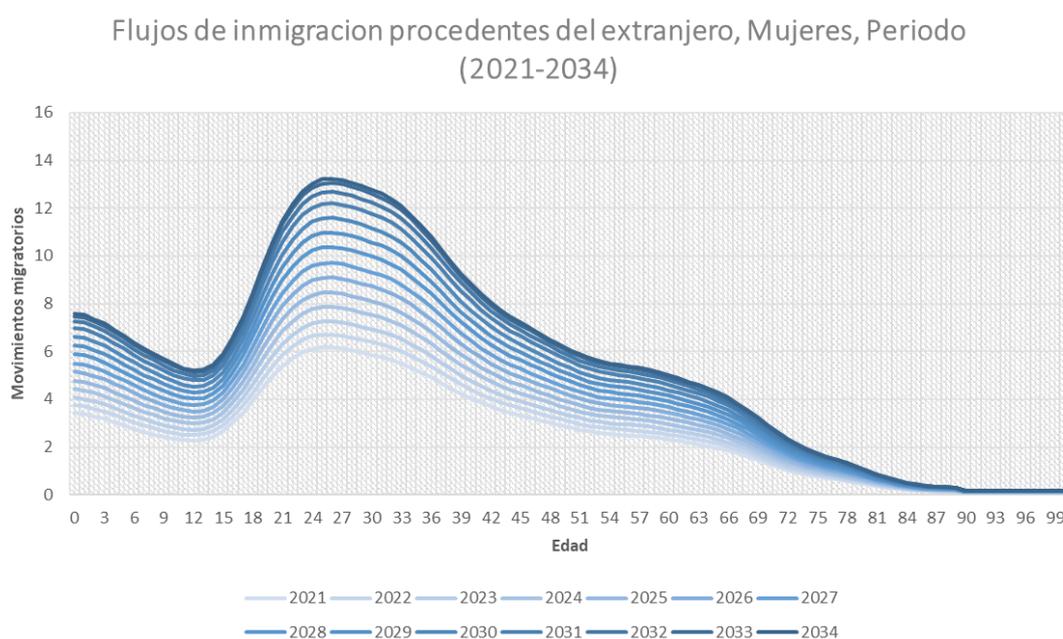


Figura 5.11.- Flujos de inmigración procedentes del extranjero por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

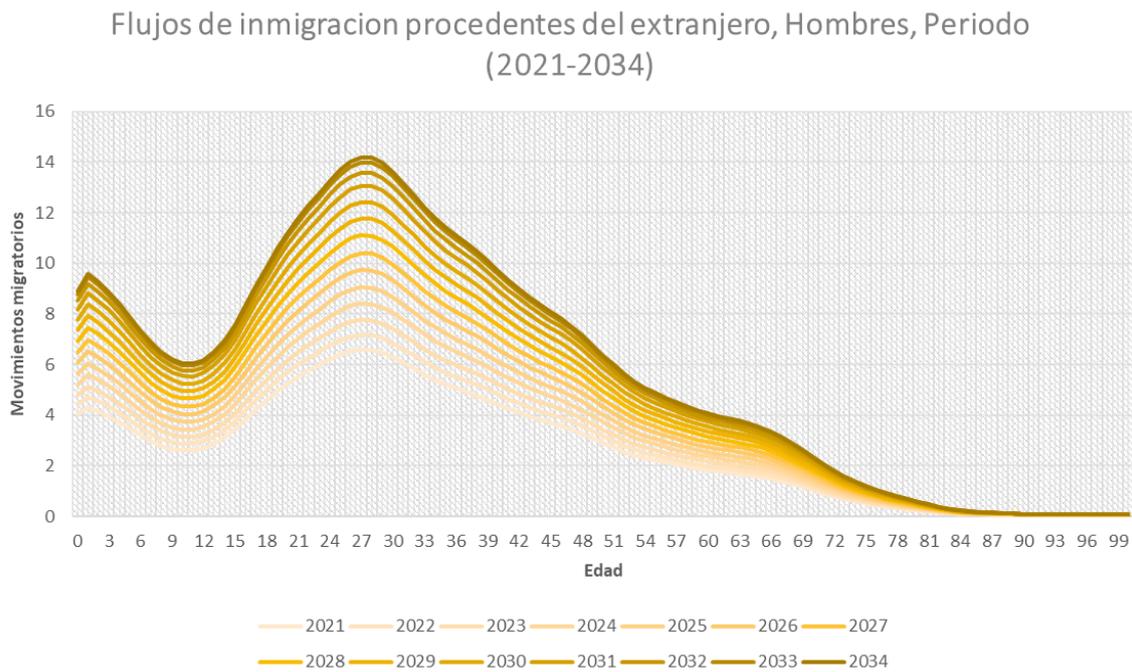


Figura 5.12.- Flujos de inmigración procedentes del extranjero por edad para para hombres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

Se puede observar que la proyección realizada contempla un incremento gradual de los flujos de inmigración para el periodo 2021-2034, donde los mayores incrementos se observan para el rango de edades de 18-45, el cual además representa la mayoría de los flujos del total de la población, teniendo que, para las edades de 78 en adelante, se cuentan con valores menores a 1 movimiento migratorio anual para todos los grupos etarios pertenecientes a dicho rango de edad.

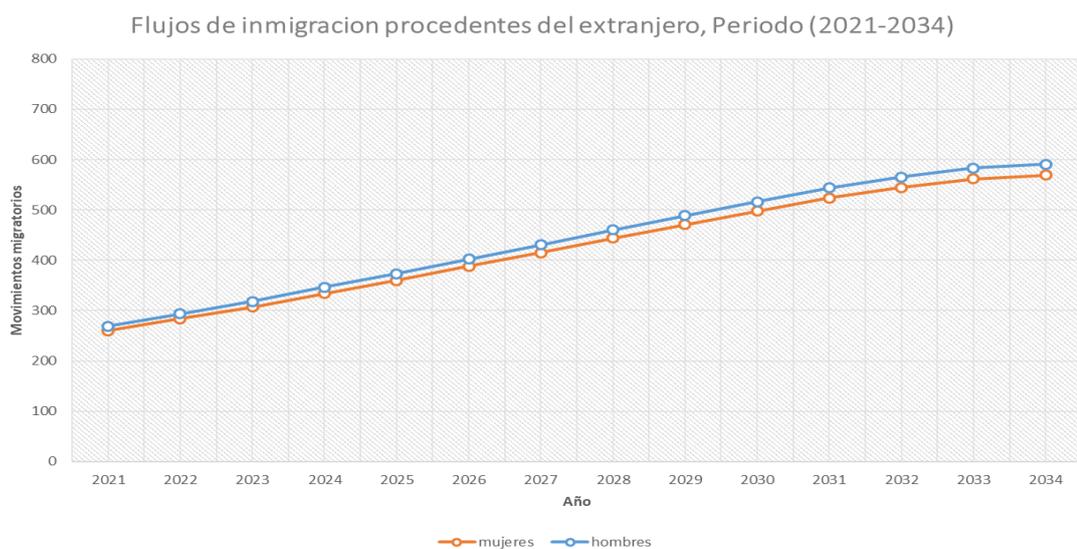


Figura 5.13.- Flujos de inmigración procedentes del extranjero para mujeres y hombres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

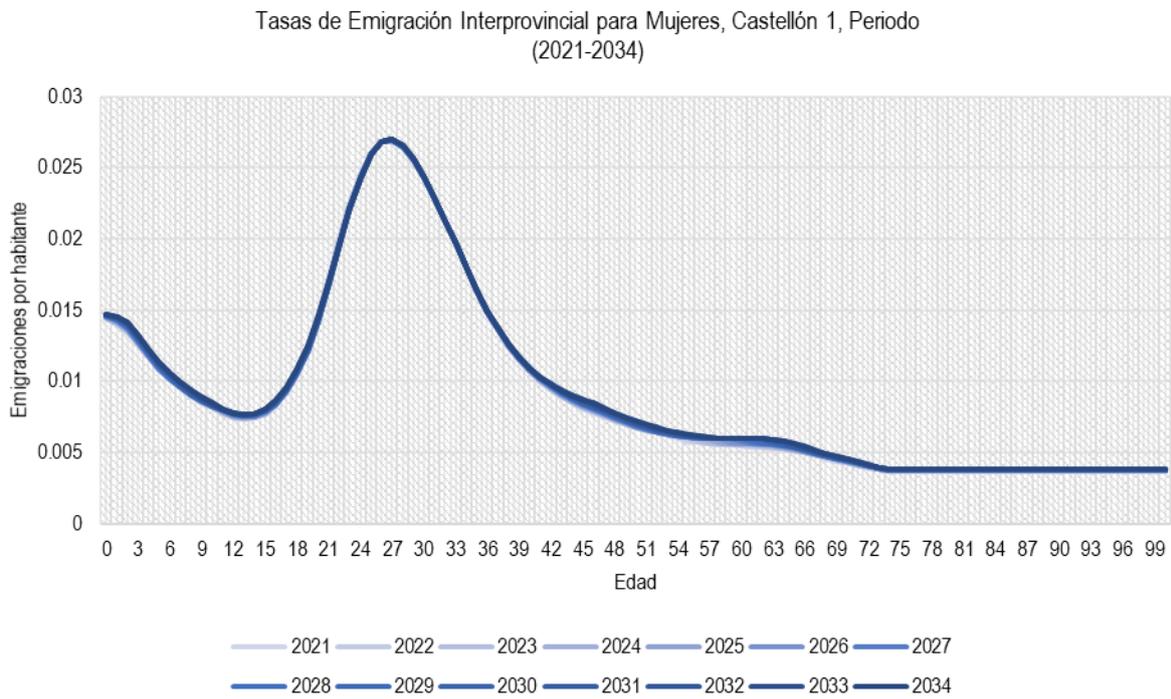
En cuanto a la evolución temporal, se llevó a cabo un análisis del total de los flujos tanto para hombres como para mujeres (figura 5.13). Se observa una clara tendencia al aumento hasta el año 2033, la cual disminuye para el año 2034. En total, se tiene un aumento de la inmigración extranjera del 119% tanto para hombres como para mujeres.

Emigración interior

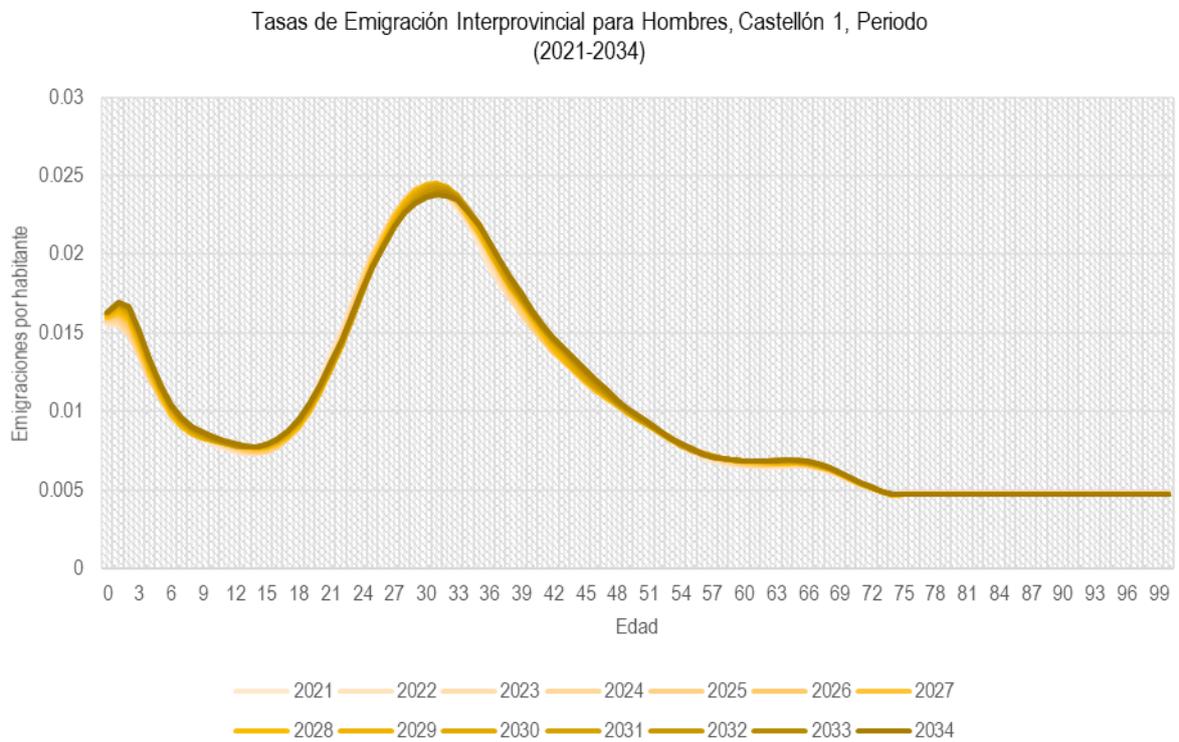
Para representar el comportamiento futuro de la emigración interprovincial en la ZC1, durante el periodo proyectivo, se optó por utilizar los resultados de las proyecciones generadas por el INE correspondientes a las tasas de emigración internas para la provincia de Castellón, en el periodo (2021-2034) discretizadas por edad y sexo.

Las tasas de emigración exterior futuras se calcularon proyectando cada uno de sus componentes, estos son: la intensidad de la emigración del año (índice sintético de emigración interior), un coeficiente de reparto de la migración por provincia de destino, una distribución por edades de dicha intensidad a escala provincial y una distribución por generaciones de dicha intensidad a escala provincial. La proyección se realizó a partir del análisis de los datos asociados a dichos componentes de los últimos cinco años obtenidos de la Estadística de Migraciones, considerando que dicha proporción se mantendrá para el periodo proyectivo (2021-2034), a excepción de la proyección de la intensidad de emigración, la cual se basó en el análisis de los últimos tres años para evitar la variabilidad en los datos propia de las áreas geográficas más pequeñas.

Como parte de los resultados generados en la PPLP 2020-2070, se obtuvieron los datos correspondientes a las tasas de emigración internas proyectados para la población asociada a la Provincia de Castellón, discretizadas por edad y sexo durante el periodo 2021-2034 (figuras 5.14 y 5.15). Se utilizaron estos datos para la Zona Castellón 1, asumiendo la hipótesis que plantea la homogeneidad de este fenómeno a lo largo de toda la provincia.



*Figura 5.14.- Tasas de inmigración interprovincial por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]*



*Figura 5.15.- Tasas de inmigración interprovincial por edad para hombres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]*

Se puede observar que la proyección realizada contempla que las tasas de emigración interprovincial se mantendrán prácticamente constantes durante el periodo 2021-2034. La distribución etaria de este fenómeno demográfico refleja que la población que cuenta con mayores tasas de emigración se divide en dos rangos de edades, la población con edades de 0-3 años y la población con edades entre los 22 y los 42 años.

Inmigración interior

Para representar el comportamiento futuro de la inmigración proveniente del resto de España en la ZC1 durante el periodo proyectivo, se optó por utilizar los resultados de las proyecciones generadas por el INE correspondientes a los flujos de inmigración interior para la Provincia de Castellón, en el periodo (2021-2034) discretizadas por edad y sexo.

El cálculo de estos flujos fue llevado a cabo por el INE en su estudio de PPLP 2020-2070 y se basa en la aplicación de las tasas de emigración interna mencionadas anteriormente a la proyección de población realizada por el INE para España en el periodo 2021-2034 [23]. Debido a que dichos flujos se proyectan a escala provincial, fue necesario adaptar el cálculo a la escala del presente estudio, lo cual se llevó a cabo a través de la aplicación de un coeficiente de reparto interprovincial, el cual se calculó a través del análisis de la población provincial y de la Zona Castellón 1 para los últimos 5 años, estableciendo un promedio de la relación entre las poblaciones de ambas áreas. Se consideró que dicha proporción se mantendrá constante para el periodo proyectivo.

Como parte de los resultados generados en la PPLP 2020-2070, se obtuvieron los datos correspondientes a los flujos de inmigración procedentes del resto de España proyectados para la población asociada a la Provincia de Castellón, discretizadas por edad y sexo durante el periodo 2021-2034 (figuras 5.16 y 5.17). Se utilizaron estos datos para la Zona Castellón 1, asumiendo la hipótesis que plantea la homogeneidad de este fenómeno a lo largo de toda la provincia.

Flujos de inmigración interprovinciales, Castellón 1 Mujeres, Periodo (2021-2034)

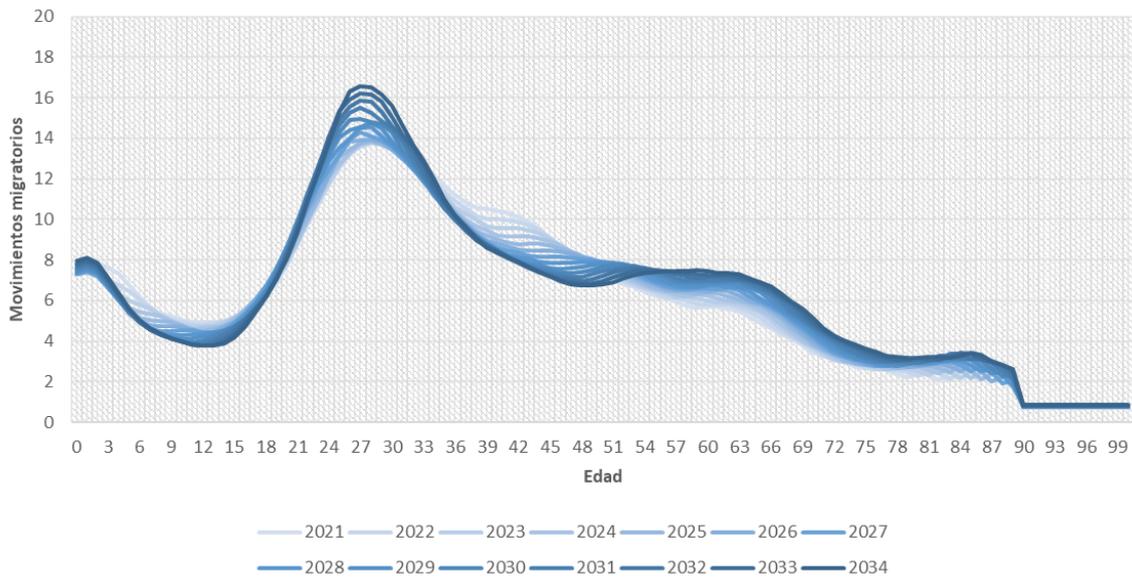


Figura 5.16.- Flujos de inmigración interprovincial por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

Flujos de inmigración interprovinciales, Castellón 1 Hombres, Periodo (2021-2034)

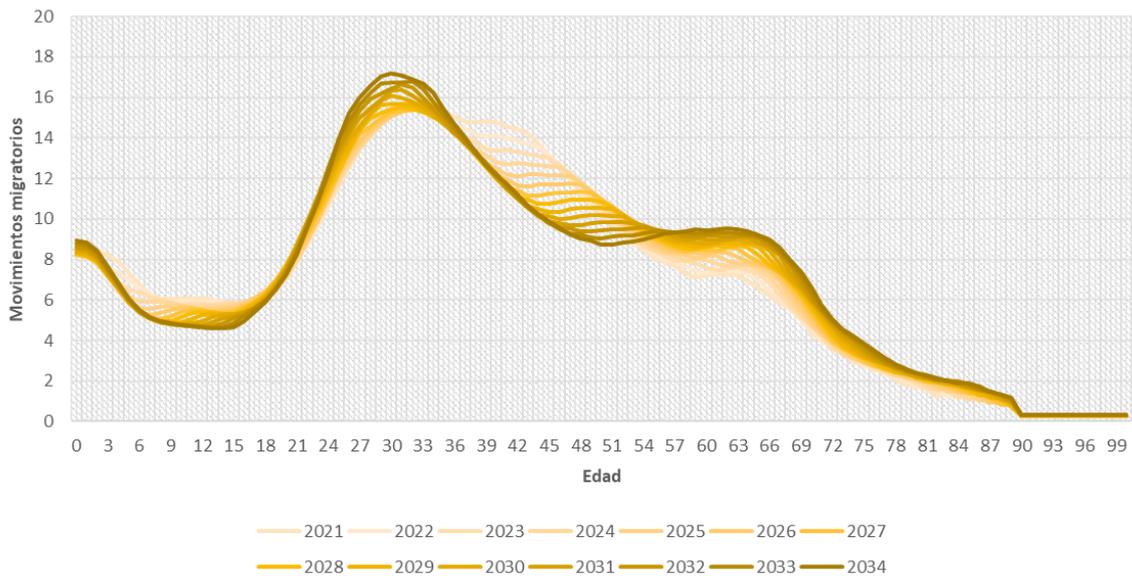


Figura 5.17.- Flujos de inmigración interprovincial por edad para mujeres en la ZC1 (2021-2034)
Elaboración propia, con datos de [23]

Se puede observar que la proyección realizada contempla distintas tendencias respecto a la evolución de los flujos de inmigración interprovinciales. Para el grupo de hombres, se observa una disminución a través del tiempo para los grupos de edades de 2-20 años y 36-56 años, por otra parte, para los grupos de edades de 20-36 y 56-99 años, se observan incrementos graduales durante el periodo 2020-2034.

Para el grupo de mujeres, se observa una disminución a través del tiempo para los grupos de edades de 2-23 años y 34-56 años, por otra parte, para los grupos de edades de 23-34 y 56-99 años, se observan incrementos graduales durante el periodo 2020-2034.

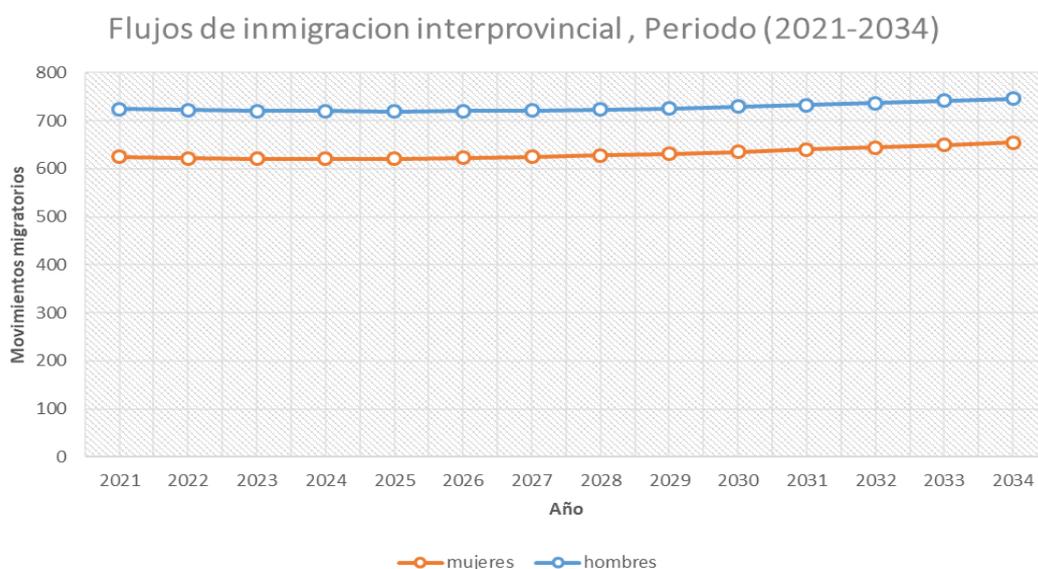


Figura 5.18.- Flujos de inmigración interprovincial para mujeres y hombres en la ZCI (2021-2034)
Elaboración propia, Elaboración propia, con datos de [23]

En cuanto a la evolución temporal, se llevó a cabo un análisis del total de los flujos tanto para hombres como para mujeres (figura 5.18). Se observa que los flujos se mantienen prácticamente estables durante el periodo proyectivo. En total, se tiene un aumento de la inmigración extranjera del 4,8% para mujeres y del 2,9% para hombres.

Aplicación del modelo

Una vez realizadas las hipótesis sobre los componentes que condicionan la evolución demográfica de la Zona Castellón 1, habiendo recopilado la información necesaria, se procedió al desarrollo de la simulación estadística de la población que residirá de manera permanente en el área de estudio en los próximos años (2021-2034), en caso de mantenerse las tendencias y comportamientos demográficos actuales, a través del método clásico de componentes-cohorte.

Dicho lo anterior, el esquema de simulación propuesto, parte de la población fija del año 2021 (año t) existente en el área de estudio (Zona Castellón 1), la cual se encuentra discretizada por sexo (s) y edad (x) y cuyos datos provienen del padrón municipal

La proyección de dicha población fija se obtuvo calculando el número de habitantes de edad $x+1$ y sexo s para el año $t+1$ ($P^{t+1}_{s,x+1}$), partiendo de una población de partida para el año 2020 (t). De esta forma, la población base avanza para cada año de proyección, utilizando tasas de mortalidad, emigración y fecundidad y los flujos de inmigración internos y externos. En cada año futuro, se añadió un nuevo grupo poblacional de edad 0 (natalidad), aplicando las tasas de fecundidad a la población de mujeres.

El cálculo de la población fija fue dividido en 3 grupos etarios de acuerdo con lo establecido en la metodología BIOLAND3, los son:

- La población de edades a 1 de enero del año de partida $x = 0, 1, 2, \dots, 98$
- Los infantes nacidos durante el año en curso (t)
- El grupo de población de edad abierto de 100 o más años

El esquema mencionado se desarrolló a través de una hoja de cálculo de Excel, cuyos resultados se presentan a continuación:

Tabla 5.7.- Resultados de la proyección de la población fija para el periodo 2021-2034

<i>Año</i>	<i>Hombres</i>	<i>Mujeres</i>	<i>Total</i>
2021	58.947	58.311	117.258
2022	58.915	58.326	117.242
2023	58.889	58.366	117.255
2024	58.857	58.395	117.251
2025	58.823	58.422	117.245
2026	58.790	58.451	117.241
2027	58.759	58.477	117.237
2028	58.733	58.510	117.243
2029	58.713	58.550	117.263
2030	58.701	58.595	117.295
2031	58.697	58.648	117.344
2032	58.702	58.710	117.413
2033	58.717	58.787	117.504
2034	58.744	58.871	117.616

En primera instancia, los resultados de la proyección permiten observar que, debido a las hipótesis planteadas sobre los componentes demográficos básicos, la población asociada a la ZC1 se mantiene en un rango estable, dentro del cual se proyecta únicamente un aumento de la población del 0,3% (figura 5.19).

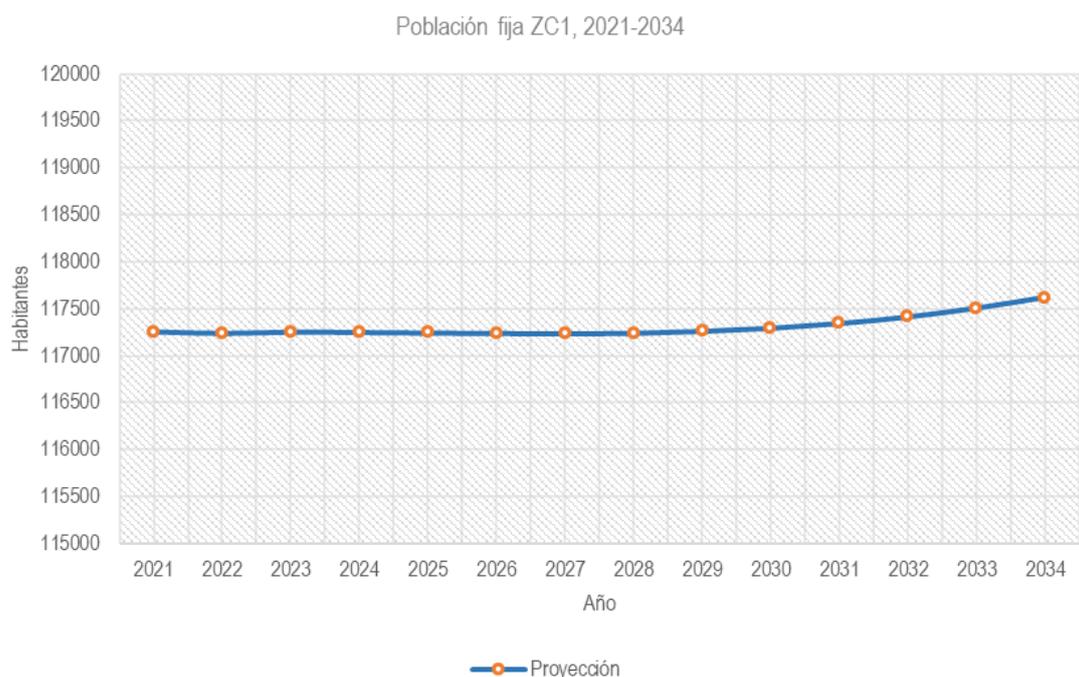


Figura 5.19.- Proyección de la población fija (2021-2034)

Se llevó a cabo una comparativa entre la proyección realizada en el presente estudio para la ZC1 y la proyección de población fija realizada por el INE para la Provincia de Castellón, además de las proyecciones, se incluyeron los registros de población obtenidos para el periodo 1998-2020, tanto para la ZC1 como para la Provincia de Castellón (figuras 5.20 y 5.21).

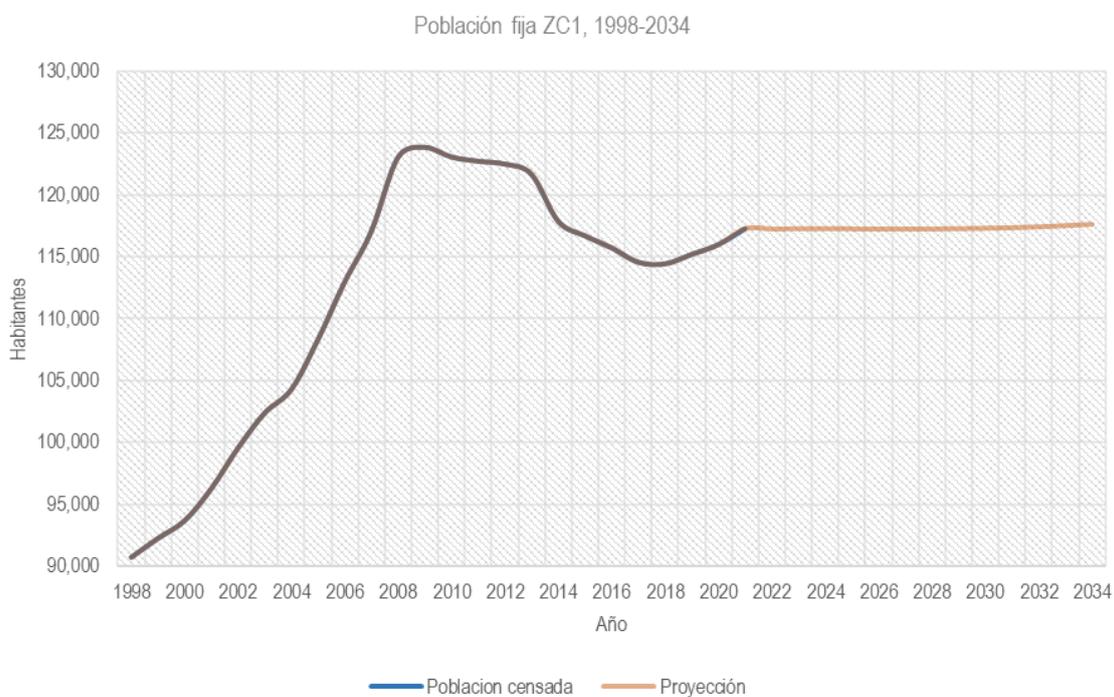


Figura 5.20.- Población fija histórica (1998-2020) y proyectada para la ZC1 (2021-2034)

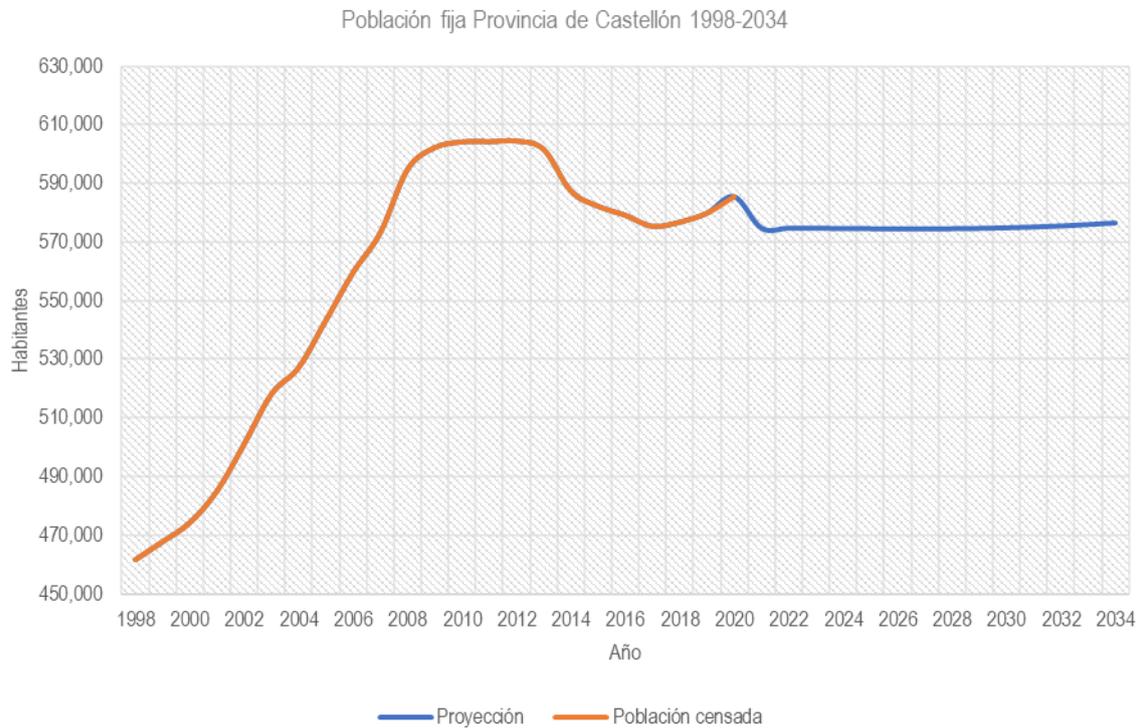


Figura 5.21.- Población fija histórica (1998-2020) y proyectada para la provincia de Castellón (2021-2034)

Se puede apreciar que los patrones demográficos obtenidos a partir del registro histórico (1998-2020) y de las proyecciones realizadas (2021-2034) por el INE y los obtenidos en el presente estudio cuentan con tendencias muy similares. La similitud observada en las proyecciones se debe a que la mayoría de las tasas asociadas a los componentes demográficos básicos utilizadas en el presente estudio fueron tomadas de los datos generados para la provincia de Castellón, implementándolos sobre la población de la ZC1, considerando la homogeneidad a escala provincial de dichos componentes.

5.2.2.2. Proyección de población no residente

Para el cálculo de la población no residente futura, la metodología BIOLAND3 establece la necesidad de contar con información relacionada a los tres componentes que conforman dicho conjunto poblacional en un periodo inicial, con el objetivo de calcular la relación existente entre dichos componentes poblacionales y la población fija. Estos componentes son, la población no residente que trabaja en el municipio, la población no residente que estudia en el municipio y la población estacional que cuenta con una segunda residencia en el municipio. Para esto, se utilizaron los datos publicados en el Censo de Población del año 2011 [16], debido a que actualmente, dichos datos corresponden al registro más actualizado con respecto a la población no residente. A partir de esto, se obtuvieron valores de los habitantes asociados a cada uno de los componentes de la población no residente para cada uno de los municipios que conforman a la ZC1 (tabla 5.8).

Tabla 5.8 - Población no residente asociada a la ZC1 (2011)

Año	Trabajadores no residentes	Estudiantes no residentes	Residentes por segunda vivienda
2011	4.835	976	19.369

Se aplicaron los factores de pernoctación anuales asociados a cada uno de estos componentes, con el objetivo de estimar la población no residente real (pernoctaciones anuales) que afecta al territorio de la ZC1.

f_{p1} = factor de pernoctación anual para trabajadores no residentes = 0,21

f_{p2} = factor de pernoctación anual para estudiantes no residentes = 0,19

f_{p3} = factor de pernoctación anual para residentes por segunda vivienda = 0,33

De esta forma es posible calcular la población no residente real del territorio (tabla 5.9).

Tabla 5.9 – Pernoctaciones anuales de la población no residente asociada a la ZC1 (2011)

Año	Trabajadores no residentes	Estudiantes no residentes	Residentes por segunda vivienda
2011	1015.35	185.44	6391.77

Finalmente, a través de los datos del Padrón Municipal [80], se obtuvo la población fija asociada a la ZC1 para el año 2011 (tabla 5.10).

Tabla 5.10 – Población fija empadronada en la ZC1 (2011)

Año	Población fija ZC1
2011	122,710

Utilizando el valor de la población fija para el año 2011 y los valores de la población no residente real calculados previamente, se generaron los factores de relación para la población no residente en la Zona Castellón 1.

f_{Tnr} = factor Trabajadores no residentes = $1015/122.710 = 0,0082$

f_{Enr} = factor Estudiantes no residentes = $976/122.710 = 0,0015$

f_{Rsv} = factor Residentes por segunda vivienda = $19.369/122.710 = 0,0520$

De esta forma, la proyección de la población no residente se realizó a partir de los resultados de la proyección de la población fija obtenidos en el apartado anterior, considerando que la relación entre los componentes de la población no residente y la población fija se mantendrán constantes durante el periodo proyectivo. Los resultados de la proyección se muestran a continuación (tabla 5.11 y figura 5.22).

Tabla 5.11.- Proyección de la población no residente para la ZC1 (2021-2034)

Año	Población fija	Trabajadores no residentes	Estudiantes no residentes	Residentes segunda vivienda	Pob. no residente total
2021	117.258	961,52	175,89	6097,42	7234,82
2022	117.242	961,38	175,86	6096,57	7233,81
2023	117.255	961,49	175,88	6097,27	7234,65
2024	117.251	961,46	175,88	6097,07	7234,40
2025	117.245	961,41	175,87	6096,77	7234,05
2026	117.241	961,38	175,86	6096,53	7233,76
2027	117.237	961,34	175,85	6096,31	7233,50
2028	117.243	961,39	175,86	6096,63	7233,88
2029	117.263	961,56	175,89	6097,67	7235,13
2030	117.295	961,82	175,94	6099,34	7237,11
2031	117.344	962,22	176,02	6101,91	7240,15
2032	117.413	962,78	176,12	6105,46	7244,37
2033	117.504	963,53	176,26	6110,22	7250,01
2034	117.616	964,45	176,42	6116,01	7256,88

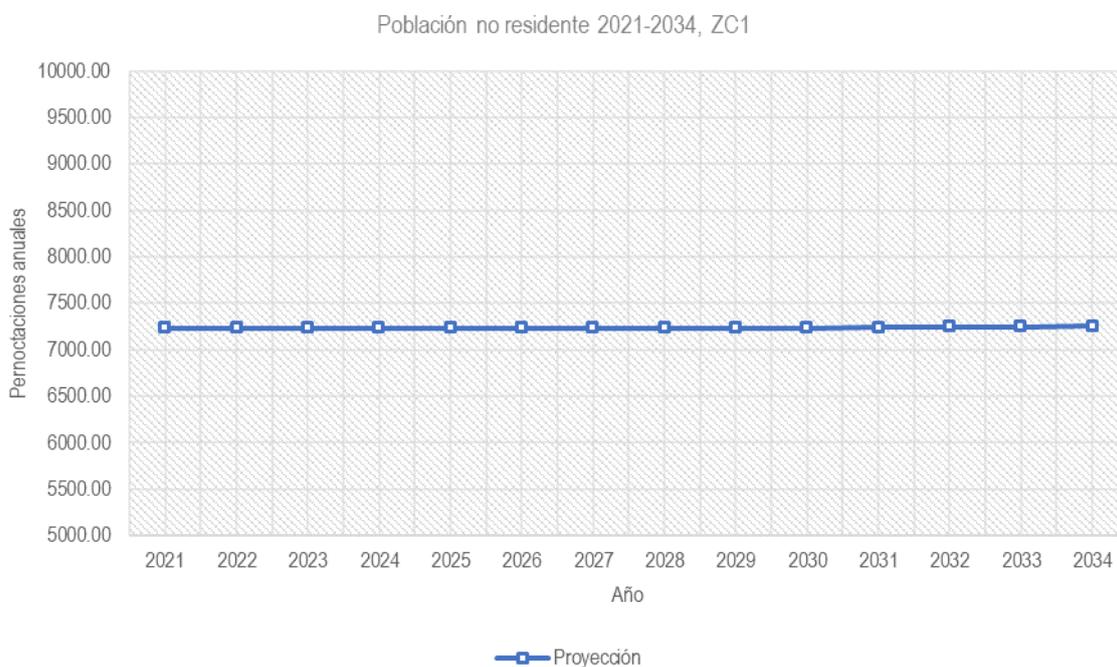


Figura 5.22.- Proyección de la población no residente para la ZC1 (2021-2034)

Debido a que la proyección de la población fija tiene una tendencia estable, para la cual no se proyectan mayores aumentos y a que la población no residente se encuentra directamente ligada a esta, mediante las relaciones planteadas, la población no residente mantendrá las mismas tendencias que la población fija, contando valores de alrededor de 7200 para la ZC1.

5.2.2.3. Proyección de población asociada al turismo

Para el cálculo de la población turística futura, la metodología BIOLAND3 establece la necesidad de considerar dos parámetros fundamentales asociados a dicho componente poblacional: el número de plazas de alojamientos turísticos existentes en el territorio (ZC1) y el grado de ocupación de dichas plazas en un periodo de tiempo determinado. El producto de ambos parámetros definiría el número de pernотaciones que se presentan en dicho territorio para el periodo de tiempo definido, obteniendo de este modo la carga poblacional que representa la actividad turística.

Para esto, se utilizaron los datos publicados en la Oferta turística municipal y comarcal de la Comunidad Valenciana 2020, en la cual se realiza un registro a nivel municipal del número de plazas existentes por tipo de alojamiento [17] (tabla 5.12). Por otra parte, con respecto al grado de ocupación, se consideró la información publicada en la Encuesta de Ocupación de alojamientos turísticos de la Comunidad valenciana, la cual cuenta con un registro para el periodo 2016-2020 [18] (tabla 5.13).

En cuanto al número de plazas, se tiene que para el año 2020, la ZC1 contaba con una disponibilidad acuerdo a lo siguiente:

Tabla 5.12.-2 Número de plazas disponibles para la ZC1 de acuerdo al tipo de alojamiento (2020)

<i>Tipo de Alojamiento</i>	<i>Plazas</i>
Hoteles	15456
Hostales	668
Pensiones	387
Apartamentos	63319
Campings	14754
Casas rurales	2036
Albergues rurales	428
Total	97048

Con respecto al grado de ocupación, se consideró para la proyección, un promedio de los grados de ocupación para cada tipo de alojamiento con respecto a los valores observados para el periodo 2016-2020, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 5.13.- Grado de ocupación promedio anual por tipo de alojamiento para la Comunidad Valenciana

<i>Año</i>	<i>Hoteles</i>	<i>Hostales</i>	<i>Pensiones</i>	<i>Apartamentos</i>	<i>Campings</i>	<i>Casas rurales</i>	<i>Albergues rurales</i>
2016	49,81%	49,81%	49,81%	23,93%	45,31%	9,23%	32,41%
2017	53,31%	53,31%	53,31%	25,79%	47,01%	9,38%	38,73%
2018	52,75%	52,75%	52,75%	21,32%	47,69%	9,57%	37,74%
2019	52,36%	52,36%	52,36%	22,23%	45,79%	8,55%	37,46%
2020	32,21%	32,21%	32,21%	13,45%	36,60%	11,05%	15,85%
Promedio	52,06%	52,06%	52,06%	23,32%	46,45%	9,18%	36,59%

De esta manera, aplicando dichos grados de ocupación promedio para las plazas disponibles en el último año de registro (2020) fue posible obtener el total de la población turística que afectó al territorio de la ZC1 para el año 2020, el cual corresponde a un total de 11.186.344,73 pernoctaciones (tabla 5.14).

Tabla 5.14.- Pernoctaciones anuales según alojamiento para la población asociada a la ZC1 (2020)

2020			
Tipo de alojamiento	Número de Plazas	% ocupación	Población turística
Hoteles	15.456	0,526	2.967.397,44
Hostales	668	0,526	128.249,32
Pensiones	387	0,526	74.300,13
Apartamentos	63.319	0,2332	5.389.586,642
Campings	14.754	0,4645	2.501.430,045
Casas rurales	2036	0,0918	68.220,252
Albergues rurales	428	0,3659	57.160,898
Total			11.186.344.73

Posteriormente, se obtuvieron los datos del Padrón Municipal asociados a la ZC1 [80], publicados para el mismo año, con lo cual fue posible estimar la relación entre dichos componentes y la población fija (tabla 5.15).

Tabla 5.15.- Población fija empadronada en la ZC1 (2020)

Año	Población fija ZC1
2020	115,975

Finalmente, habiendo calculado la población asociada al turismo y contando con la información respectiva a la población fija para la ZC1 en el año 2020, fue posible determinar el factor de relación población turística – población fija.

$$fP_{tur} = \text{factor población turística} = 1.015/115.975 = \mathbf{0,2642}$$

De esta forma, la proyección de la población turística se realizó a partir de los resultados de la proyección de la población fija obtenidos a través del método de componentes-cohorte, considerando que la relación entre los componentes de la población turística y la población fija se mantendrán constantes durante el periodo proyectivo (tabla 5.16 y figura 5.23).

Tabla 5.16.- Proyección de la población no residente para la ZC1 (2021-2034)

Año	Población fija	Población turística
2021	117.258	30979,56
2022	117.242	30975,24
2023	117.255	30978,83
2024	117.251	30977,79
2025	117.245	30976,26
2026	117.241	30975,04
2027	117.237	30973,93
2028	117.243	30975,55
2029	117.263	30980,88
2030	117.295	30989,36
2031	117.344	31002,37
2032	117.413	31020,45
2033	117.504	31044,61
2034	117.616	31074,02

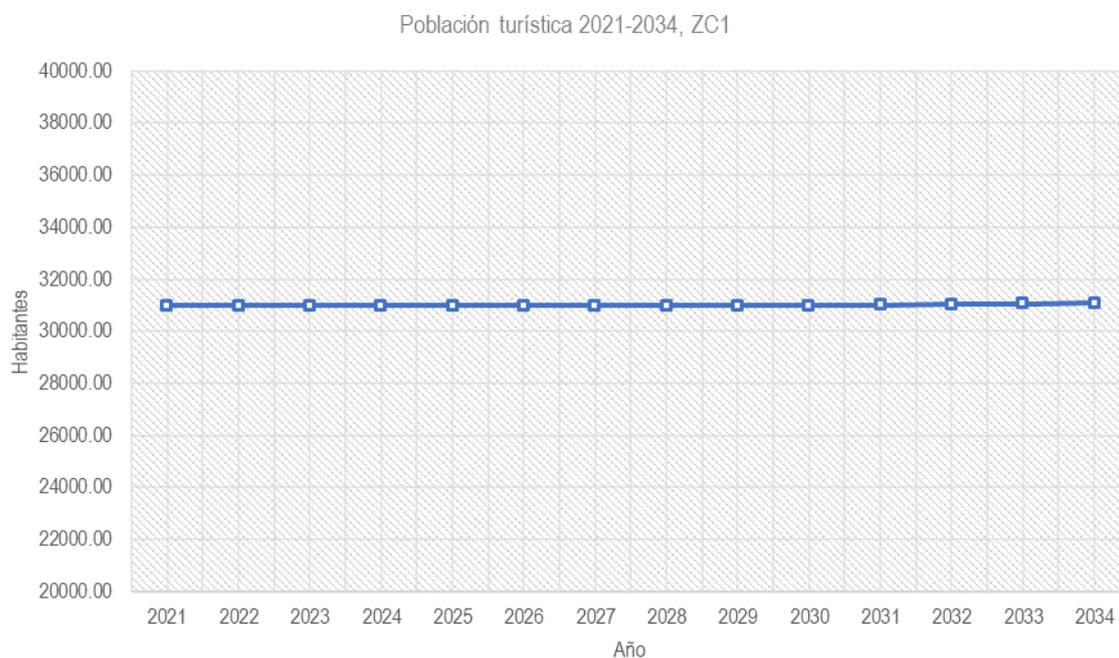


Figura 5.23.- Proyección de la población no residente para la ZC1 (2021-2034)

Debido a que la proyección de la población fija tiene una tendencia estable, para la cual no se proyectan mayores aumentos, y a que la población turística se encuentra directamente ligada a ésta, mediante el factor de relación propuesto, la población turística mantendrá las mismas tendencias que la población fija, contando con valores de alrededor de 31.000 para la ZC1.

5.2.2.4. Carga de población futura

Para la estimación de la carga de población futura de cada uno de los años del periodo proyectivo, se llevó a cabo la suma de las proyecciones realizadas para cada uno de sus componentes, los cuales son la población fija, la población no residente total y la población turística (tabla 5.17 y figura 5.24).

Tabla 5.17.- 3)

Año	Población fija	Trabajadores no residentes	Estudiantes no residentes	Residentes segunda vivienda	Pob. no residente total	Población turística	Carga de Población
2021	117.258	961,52	175,89	6.097,42	7.234,82	30.979,56	155.472,38
2022	117.242	961,38	175,86	6.096,57	7.233,81	30.975,24	155.450,69
2023	117.255	961,49	175,88	6.097,27	7.234,65	30.978,83	155.468,70
2024	117.251	961,46	175,88	6.097,07	7.234,40	30.977,79	155.463,49
2025	117.245	961,41	175,87	6.096,77	7.234,05	30.976,26	155.455,80
2026	117.241	961,38	175,86	6.096,53	7.233,76	30.975,04	155.449,70
2027	117.237	961,34	175,85	6.096,31	7.233,50	30.973,93	155.444,09
2028	117.243	961,39	175,86	6.096,63	7.233,88	30.975,55	155.452,26
2029	117.263	961,56	175,89	6.097,67	7.235,13	30.980,88	155.478,97
2030	117.295	961,82	175,94	6.099,34	7.237,11	30.989,36	155.521,53
2031	117.344	962,22	176,02	6.101,91	7.240,15	31.002,37	155.586,85
2032	117.413	962,78	176,12	6.105,46	7.244,37	31.020,45	155.677,58
2033	117.504	963,53	176,26	6.110,22	7.250,01	31.044,61	155.798,84
2034	117.616	964,45	176,42	6.116,01	7.256,88	31.074,02	155.946,41

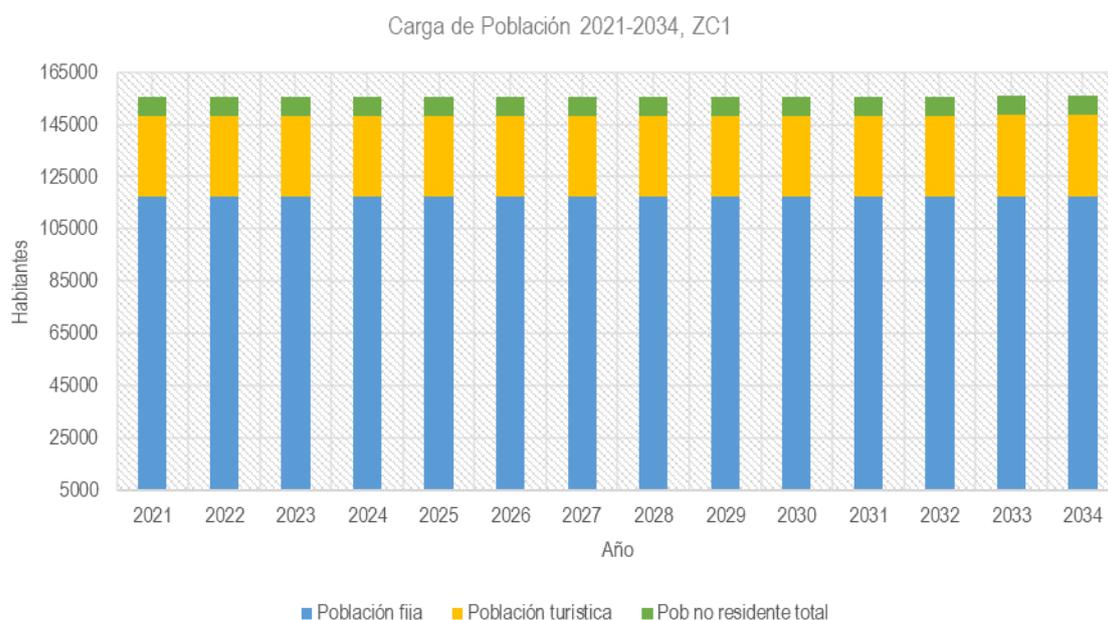


Figura 5.24.- Estimación de la Carga de Población para la ZC1 (2021-2034)

Los resultados de las proyecciones realizadas para la carga de población permiten observar que los componentes de la población asociada a la ZC1 se mantendrán constantes durante el periodo proyectivo, teniendo que, la población fija representa el mayor componente de la carga de población, seguido de la población turística y finalmente, la población no residente, cuenta con aportes menores para la carga del territorio.

5.2.3. *Proyección del comportamiento de los residuos*

El segundo paso para la estimación los residuos que serán depositados en el vertedero corresponde a la proyección de las tasas de generación y de vertido de residuos, las cuales nos permiten conocer la cantidad total de residuos que genera una cierta de población y la proporción de dichos residuos que es enviada a vertederos.

5.2.3.1. Proyección de la tasa unitaria de generación de RSU

Para la proyección de la tasa unitaria de generación de RSU asociada a la ZC1, en primera instancia, se realizó un análisis de la producción histórica de residuos en el territorio, para el cual se tomaron los datos publicados por el Consorcio C1 [81]. El dato más reciente corresponde a la producción de residuos registrada para el año 2020, el cual se utilizará como referencia. Por otra parte, se obtuvieron los datos asociados a la Carga de Población para el año 2020 en la ZC1, a través de la metodología utilizada anteriormente.

Al contar con estas dos variables es posible estimar la relación entre la generación de residuos y la carga de población, lo cual da como resultado, la tasa unitaria de generación de residuos para el año 2020 (tabla 5.18).

Tabla 5.18.- Cálculo de la tasa unitaria de generación de residuos para la ZC1 (2020)

<i>Año</i>	<i>Carga de Población (hab/año)</i>	<i>Residuos (kg)</i>	<i>Tasa (kg/hab/día)</i>
2020	153.771,2525	68.606.410	1,2223531

Se consideró para las proyecciones, que dicha proporción se mantendrá constante durante el periodo proyectivo (2021-2034).

5.2.3.2. Proyección de la tasa unitaria de vertido de RSU

Para la proyección de la tasa unitaria de vertido de RSU asociada a la ZC1, se utilizaron los resultados obtenidos para proyección de la tasa unitaria de generación de residuos obtenida para el periodo proyectivo, y una proyección del porcentaje de residuos destinados a depósito

controlado, la cual fue obtenida a partir de la información publicada en el Plan Zonal 1 [5]. Para esto, el Plan Zonal 1 estableció una proyección de dicho porcentaje para el periodo 2013-2020 en la ZC1, en la cual, se estimó un porcentaje de vertido del 26,9% para el año 2020 (tabla 5.19 y figura 5.25).

Tabla 5.19.- Proyección del porcentaje de residuos destinados a depósito controlado para la ZC1 (2003-2020)

Año	Porcentaje de RSU vertidos
2003	0,486
2006	0,401
2009	0,365
2012	0,331
2015	0,308
2020	0,269

A partir del análisis de las proyecciones planteadas por el Plan Zonal 1 para el periodo 2003-2020, se optó por llevar a cabo una proyección para el periodo 2021-2034, a través de una interpolación lineal entre el último valor registrado, y el valor que se considera que se alcanzará para el año 2034, debido a las políticas de gestión actuales, el cual se estima que alcanzará un valor del 20% (tabla 5.20 y figura 5.25).

Tabla.5.20.- Proyección del porcentaje de residuos destinados a depósito controlado para la ZC1 (2021-2034)

Año	Porcentaje de vertido
2021	0,264
2022	0,259
2023	0,254
2024	0,249
2025	0,244
2026	0,239
2027	0,234
2028	0,229
2029	0,224
2030	0,219
2031	0,214
2032	0,209
2033	0,204
2034	0,200

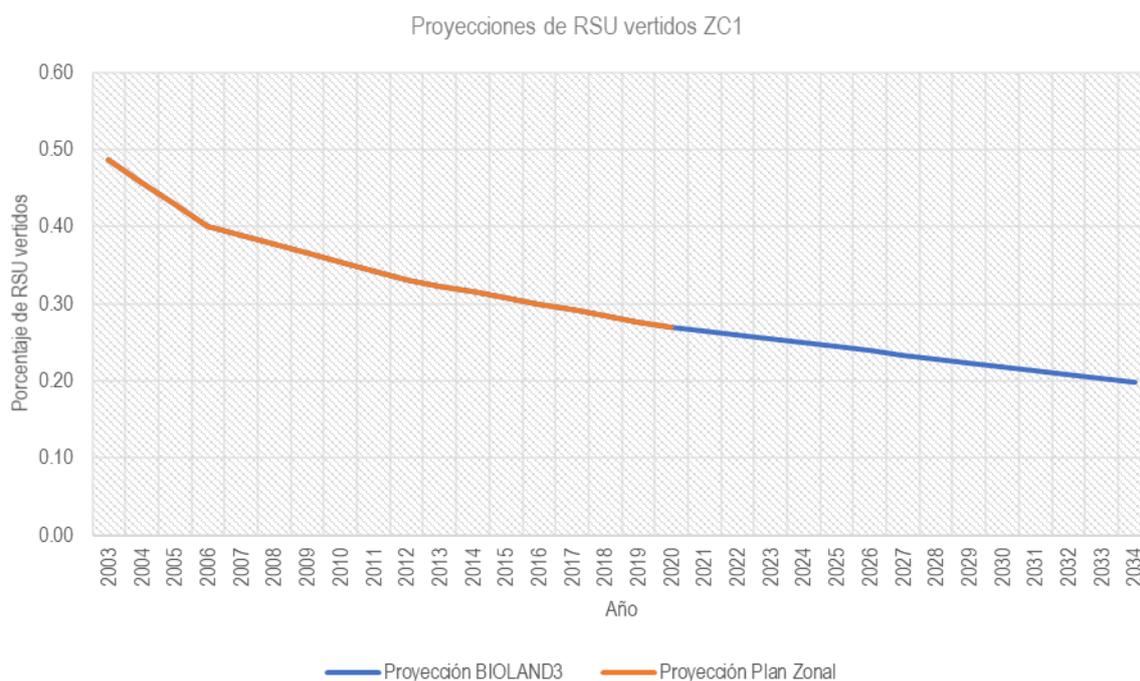


Figura 5.25.- Proyecciones del porcentaje de residuos destinados a depósito controlado para la ZC1 (2003-2034)
Elaboración propia, con datos de [5]

Una vez calculadas las proyecciones para el porcentaje de residuos vertidos durante el periodo proyectivo en la ZC1, con base en dichos porcentajes y en la proyección de la tasa unitaria de generación desarrollada anteriormente, fue posible realizar las proyecciones de la tasa unitaria de vertido, cuyos resultados se obtuvieron como el producto del porcentaje de residuos destinados en el año t y la tasa unitaria de generación de residuos en el mismo año t (tabla 5.21 y figura 5.26).

Tabla 5.21.- Proyección de la tasa unitaria de vertido para la ZC1 (2021-2034)

Año	Tasa unitaria de generación	Porcentaje de RSU vertidos	Tasa unitaria de vertido
2021	1,22	0,264	0,32208
2022	1,22	0,259	0,31598
2023	1,22	0,254	0,30988
2024	1,22	0,249	0,30378
2025	1,22	0,244	0,29768
2026	1,22	0,239	0,29158
2027	1,22	0,234	0,28548
2028	1,22	0,229	0,27938
2029	1,22	0,224	0,27328
2030	1,22	0,219	0,26718
2031	1,22	0,214	0,26108
2032	1,22	0,209	0,25498
2033	1,22	0,204	0,24888
2034	1,22	0,199	0,24278

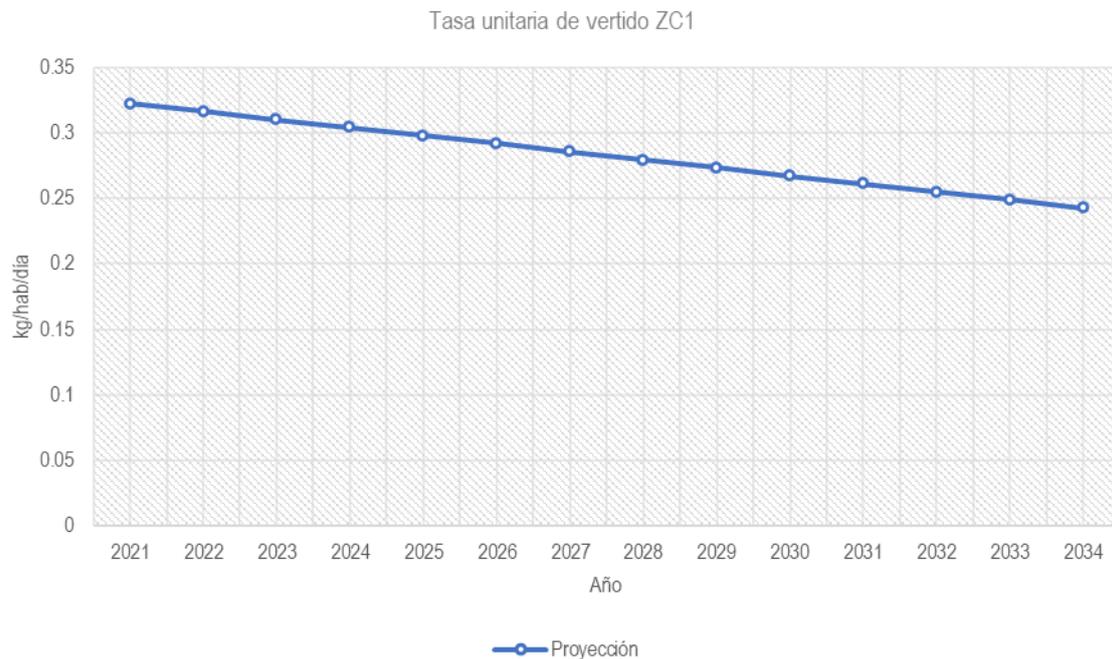


Figura 5.26.- Proyección de la tasa unitaria de vertido para la ZC1 (2021-2034)

Debido a que se considera que la tasa unitaria de generación de residuos por habitante se mantendrá constante para el periodo proyectivo y a que la proyección del porcentaje de residuos vertidos cuenta con una tendencia decreciente, las tasas unitarias de vertido de RSU proyectada disminuyen progresivamente a partir del año 2021 hasta alcanzar un valor final en el año 2034 de 0,24278 kg/habitante/día. Esta situación se considera favorable ya que los vertederos recibirán cada vez menos residuos, debido a la mejora en los procesos de valoración en planta, lo cual se refleja en las proyecciones del porcentaje de residuos vertidos.

5.2.4. Estimación de los RSU vertidos

La estimación de los RSU vertidos para el periodo 2021-2034 se llevó a cabo a través de la sumatoria de los productos de la carga de población para cada uno de los años del periodo proyectivo y sus respectivas tasas unitarias de vertido. Los resultados se presentan a continuación, considerando que la carga de población deberá ser considerada en pernoctaciones al año (tabla 5.22).

Tabla 5.22.- Proyección de los RSU vertidos en la ZC1 (2021-2034)⁴

Año	Carga de Población (Habitantes/año)	Carga de Población (pernoctaciones/año)	Tasa unitaria de vertido (kg/hab/día)	Residuos vertidos (kg)
2021	155.472	56.747.419,5	0,32208	18.277.208,9
2022	155.451	56.739.502,6	0,31598	17.928.548
2023	155.469	56.746.076,9	0,30988	17.584.474,3
2024	155.463	56.744.172,7	0,30378	17.237.744,8
2025	155.456	56.741.368,3	0,29768	16.890.770,5
2026	155.450	56.739.140,4	0,29158	16.543.998,6
2027	155.444	56.737.094,6	0,28548	16.197.305,8
2028	155.452	56.740.075	0,27938	15.852.042,2
2029	155.479	56.749.825,2	0,27328	15.508.592,2
2030	155.522	56.765.358,6	0,26718	15.166.568,5
2031	155.587	56.789.201,8	0,26108	14.826.524,8
2032	155.678	56.822.315,1	0,25498	14.488.553,9
2033	155.799	56.866.575,1	0,24888	14.152.953,2
2034	155.946	56.920.438,6	0,24278	13.819.144,1
Total				224.474.430

5.2.5. Volumen necesario para el emplazamiento (dimensionamiento)

Para el cálculo del volumen que ocuparán dichos residuos en el vertedero, fue necesario establecer el método de depósito que se utilizará para la disposición de dichos RSU. En este caso, se consideró el método de depósito en balas, para el cuál, la densidad media de los residuos se estima con un valor promedio de 0,9 t/m³. De esta forma, conociendo los kg de residuos que serán vertidos y su densidad. El cálculo del volumen de residuos que serán depositados se llevó a cabo conforme a la ecuación 4.14.

De acuerdo con lo anterior, y considerando el valor calculado previamente con respecto a la producción de residuos para el periodo 2021-2034, el cual equivale a un total de 224.474.430 kg de RSU, se llevó el cálculo del volumen total que ocuparán dichos residuos si estos son depositados mediante balas, con una densidad media de 0,9 t/m³, el cual presenta un total de:

$$Vr = 249.416,03 m^3$$

Este volumen representa la necesidad espacial que tendrá la Zona Castellón 1 para la disposición de los residuos que generará su población fija, su población no residente y los turistas que visitarán la región durante el periodo 2021-2034. A partir de este dato, se podrán tomar las decisiones necesarias para la selección de un sitio adecuado para la construcción del vertedero, considerando los requerimientos adicionales establecidos en el Plan Zonal 1.

5.3. GENERACIÓN DE BIOGÁS

Como parte de la aplicación de la metodología BIOLAND3, se llevó a cabo un estudio de modelación para el cálculo de la máxima producción de biogás que se generaría en un vertedero hipotético que recibiera los residuos calculados en el apartado anterior para la Zona Castellón1, durante el periodo 2021-2034.

Esto se desarrolló con base en el esquema conceptual propuesto en el capítulo anterior, donde se propone la implementación del modelo BIOLEACH, el cual, a través de su módulo de cálculo de producción de biogás, permite estimar la máxima cantidad de biogás que es posible obtener para la tipología de residuos depositados en el vaso en condiciones óptimas, basado en un modelo de cinética triangular.

5.3.1. *Recopilación de información*

Como primera parte del estudio, se llevó a cabo una recopilación de información relacionada con los aspectos de interés asociados con la tipología de los residuos generados en la ZC1 y las condiciones a las que dichos residuos estarán sometidos en el caso de ser depositados en un vertedero de RSU.

5.3.1.1. Cuantificación y caracterización de los RSU

Los aspectos de interés recopilados corresponden a los siguientes cuatro factores:

- **Composición mensual de los RSU**

Se utilizaron los datos obtenidos a través de ensayos de caracterización de los residuos procedentes de una planta de tratamiento mecánico-biológico con compostaje de la Comunidad Valenciana, específicamente, los valores correspondientes a su peso húmedo y al contenido en humedad de los componentes mencionados en la tabla 4.2 para una muestra de 100 kg. Esta composición se consideró homogénea para toda la Comunidad, incluyendo la ZC1 (figuras 5.27 y 5.28).

Composición de los RSU			
MUESTRA INICIAL (100 kg)			
Componente	% peso húmedo	Humedad (%)	Peso seco (kg)
Restos comida	17.4	70.0	5.2
Papel – cartón	23.8	50.0	11.9
Residuos jardín	3.9	60.0	1.6
Madera	1.1	30.0	0.8
Textiles	22.9	10.0	20.6
Goma	0.0	2.0	0.0
Cuero	0.0	10.0	0.0
Plásticos	17.1	4.0	16.4
Vidrio	7.4	2.0	7.2
Metales férricos	1.6	3.0	1.6
No férricos	0.2	3.0	0.2
Otros	4.7	30.0	3.3
TOTAL	100.0	31.29	68.7

% de RRB disponibles para degradación	50.00%
% de RLB disponibles para degradación	30.00%

Figura 5.27.- Composición de los RSU inicial, utilizada para la modelación de la producción de biogás

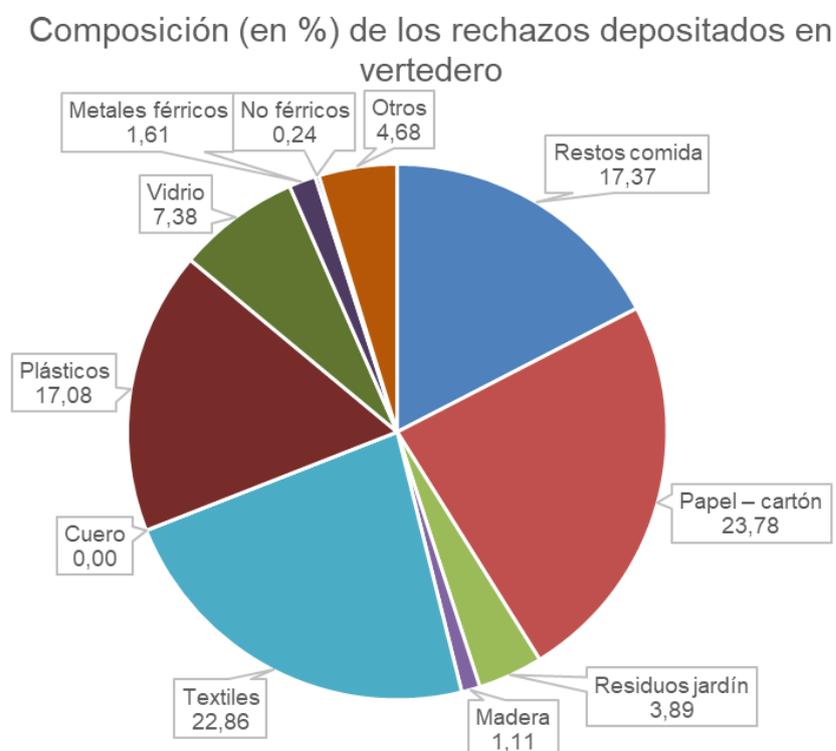


Figura 5.28.- Composición de los RSU inicial (peso húmedo), utilizada para la modelación de la producción de biogás

Se puede observar en la figura 5.28 que los RSU se componen principalmente de cuatro categorías (papel-cartón, restos de comida, plásticos y textiles), los cuales en conjunto abarcan aproximadamente el 81% de los RSU, dejando el restante 19% a las categorías de vidrio, residuos de jardín, madera, metales y otros. Se consideró un porcentaje de RRB del 50% y de 30% para los RLB.

- **Análisis químico elemental de los RSU mensualmente depositados en el vertedero.**

Tal como se establece en la metodología BIOLAND3, para la implementación del módulo de producción de biogás del modelo BIOLEACH, es necesario conocer la composición química los RSU que serán depositados, para esto, al igual que para la caracterización de los RSU, se utilizaron los datos obtenidos a través de ensayos de caracterización química de los residuos procedentes de una planta de tratamiento mecánico-biológico con compostaje de la Comunidad Valenciana (figuras 5.29 y 5.30).

RRB	Peso húmedo (kg)	Peso seco (kg)	C	H	O	N	S	Cenizas
Restos comida	17.4	5.21	2.50	0.33	1.96	0.14	0.02	0.26
Papel – cartón	23.8	11.89	5.17	0.71	5.23	0.04	0.02	0.71
Res. jardín (60%)	2.33	0.93	0.45	0.06	0.35	0.03	0.00	0.04
TOTAL	43.5	18.04	8.12	1.10	7.55	0.20	0.05	1.02
RLB								
Res. jardín (40%)	1.56	0.62	0.30	0.04	0.24	0.02	0.00	0.03
Madera	1.1	0.78	0.38	0.05	0.33	0.00	0.00	0.01
Textiles	22.9	20.58	11.32	1.36	6.42	0.95	0.03	0.51
Goma	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cuero	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	25.53	21.98	12.00	1.44	6.99	0.97	0.03	0.55
RNB	30.99							

Figura 5.29.- Composición química de los RSU caracterizados según el tipo de RSU, (RRB, RLB, RNB)

El modelo considera únicamente el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas de cada uno de los componentes biodegradables, expresadas como porcentaje en peso en base seca.

Porcentaje en peso (base seca)						
Componente	C	H	O	N	S	Cenizas
Restos comida	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Papel – cartón	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
Residuos jardín	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
Madera	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
Textiles	55.0	6.6	31.2	4.6	0.2	2.5
Goma	78.0	10.0	0.0	2.0	0.0	10.0
Cuero	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0

Figura 5.30.- Composición química de los RRB y RLB caracterizados según su porcentaje en peso (base seca)

- **Temperatura media mensual de la masa de residuos**

BIOLEACH utiliza la ley de los gases perfectos para estimar la producción de vapor de agua producido durante la formación del biogás en vertedero. Por tanto, necesario contar con una temperatura media de los residuos del vertedero. En este caso, se considerará una temperatura media de 42°C [40].

- **Masa total de RSU (kg) depositados en el vertedero mensualmente.**

Para conocer la masa de RSU que serán depositados mensualmente en el futuro vertedero, se utilizaron dos fuentes de información o estudios. En primer lugar, se utilizó la información obtenida a través del cálculo de los RSU vertidos (BIOLAND3), cuyo resultado indica la cantidad de residuos que serán depositados anualmente para el vertedero. En segundo lugar, para conocer la distribución mensual con la que serán depositados dichos residuos, se utilizó la información disponible publicada por el Consorcio C1, dentro de la cual se cuenta con información histórica relacionada con la producción mensual de RSU para la Zona Castellón 1 durante el periodo 2014-2020 [81]. Se obtuvo un promedio de la producción mensual de RSU para cada mes con base en dicha información histórica (figura 5.4).

La proyección mensual de residuos vertidos se obtuvo considerando que la distribución mensual calculada se mantendrá constante durante el periodo proyectivo. De esta forma, se aplicó dicha distribución a los valores obtenidos para la proyección de RSU vertidos durante el periodo 2021-2034, obteniendo como resultado una estimación de los residuos que serán vertidos mes con mes durante los próximos 14 años (tabla 5.23).

Tabla 5.23 – Proyección mensual de los RSU depositados en vertedero para la ZC1 (2021-2034)

Año	Total RSU vertidos (kg)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
2021	18277208,87	1286601,96	1232361,97	1407892,25	1487188,11	1456548,1	1581317,35	2060295,43	2426029,05	1589128,78	1331380,16
2022	17928548,04	1262058,41	1208853,11	1381034,93	1458818,12	1428762,6	1551151,73	2020992,7	2379749,49	1558814,14	1305982,4
2023	17584474,32	1237837,75	1185653,54	1354530,95	1430821,38	1401342,66	1521382,97	1982207,04	2334078,79	1528898,34	1280918,79
2024	17237744,77	1213430,15	1162274,9	1327822,4	1402608,53	1373711,08	1491384,44	1943122,01	2288055,57	1498751,62	1255661,71
2025	16890770,53	1189005,32	1138879,76	1301094,99	1374375,77	1346059,99	1461364,74	1904009,39	2241999,88	1468583,62	1230386,81
2026	16543998,56	1164594,72	1115498,26	1274383,17	1346159,48	1318425,03	1431362,54	1864919,58	2195971,03	1438433,21	1205126,65
2027	16197305,76	1140189,71	1092122,1	1247677,45	1317949,62	1290796,37	1401367,18	1825838,69	2149952,69	1408289,69	1179872,25
2028	15852042,16	1115885,29	1068842,3	1221081,81	1289856,06	1263281,61	1371495,48	1786918,9	2104124,06	1378270,42	1154721,96
2029	15508592,22	1091708,55	1045684,79	1194625,89	1261910,07	1235911,38	1341780,69	1748203,56	2058536,16	1348408,85	1129703,78
2030	15166568,52	1067632,21	1022623,44	1168279,82	1234080,13	1208654,81	1312189,3	1709649	2013137,57	1318671,29	1104789,5
2031	14826524,8	1043695,24	999695,602	1142086,28	1206411,3	1181556,04	1282769,22	1671317,62	1968001,8	1289105,87	1080019,45
2032	14488553,9	1019904,19	976907,523	1116052,4	1178911,14	1154622,44	1253528,47	1633219,91	1923141,16	1259720,68	1055400,38
2033	14152953,22	996279,986	954279,259	1090201,1	1151603,83	1127877,74	1224492,79	1595389,38	1878595,14	1230541,57	1030953,98
2034	13819144,08	972781,896	931771,791	1064487,8	1124442,3	1101275,81	1195612,11	1557760,79	1834286,91	1201518,23	1006638,07

5.3.1.2. Aplicación del modelo BIOLEACH

Los datos previamente recopilados se introdujeron dentro del módulo de producción de biogás de BIOLEACH, a partir del cual se realizaron los cálculos necesarios para obtener la producción de biogás por unidad de masa de RSU, distinguiendo entre el biogás producido por las dos tipologías principales de residuos, los residuos rápidamente biodegradables y los residuos lentamente biodegradables y utilizando las cinéticas de degradación propuestas en las figuras 4.5 y 4.6 [7].

Para esto, BIOLEACH utiliza la ecuación estequiométrica de degradación completa de la fracción orgánica contenida en los RSU (3.17), cuyos coeficientes se ajustan automáticamente por el modelo a partir de la masa de cada uno de los componentes químicos elementales obtenidos previamente (figuras 5.29 y 5.30), lo cual concluye con las proporciones molares de C, H, O y N, respectivamente, de forma independiente para los RRB y RLB (figura 5.31). Esta mezcla de residuos se considera invariable a lo largo de todo el periodo de simulación.

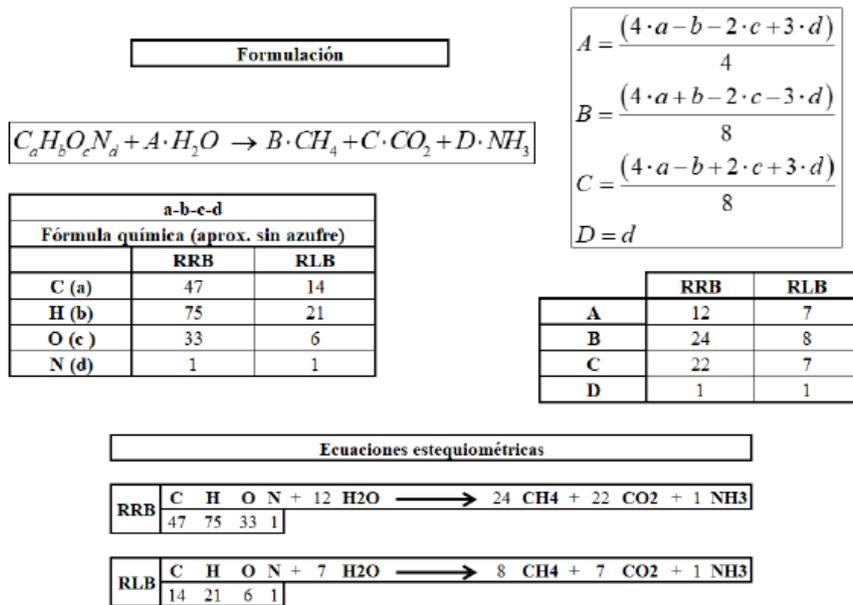
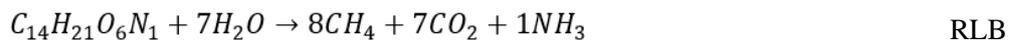
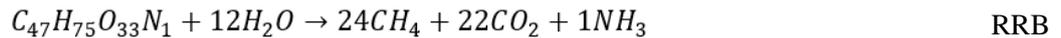


Figura 5.31.- Cálculo de la ecuación estequiométrica

Los resultados del ajuste se presentan a continuación:



A partir de los datos anteriores, BIOLEACH genera los valores de los volúmenes de biogás (CH₄ + CO₂) producidos por cada kg de RRB y RLB (figura 5.32).

Biogás por unidad de peso seco		
RRB	0,89	m³/kg RRB
RLB	1,04	m³/kg RLB

Figura 5.32.- Volumen de biogás producido para los RRB y RLB

Posteriormente, el modelo procede a calcular automáticamente la masa de agua consumida durante el proceso de formación de biogás y la cantidad de vapor de agua producida en el proceso de formación de biogás. Para esto se consideró una temperatura media de 42°C (figuras 5.33 y 5.34)

kg H₂O/ m³ biogás
TOTAL
0,31

Figura 5.33.- Agua consumida en la formación de biogás por kg de RSU

0,03318645	kg agua/m³ biogás
-------------------	-------------------------------------

Figura 5.34.- Vapor de agua producido por m³ de biogás

Finalmente, se aplicó el modelo de cinética triangular implementado como parte del modelo BIOLEACH, el cual, a partir de los valores de los volúmenes de biogás producidos por cada kg de RRB y RLB en los RSU, ajusta automáticamente los parámetros del modelo triangular de forma que determina la tasa mensual de producción de biogás por cada kg de RRB y RLB para cada mes (m³/kg).

De esta forma, el modelo calculó 60 valores mensuales (cinco años) de estas tasas para los RRB (figura 5.35) y 180 valores mensuales (quince años) para los RLB (figura 5.36).

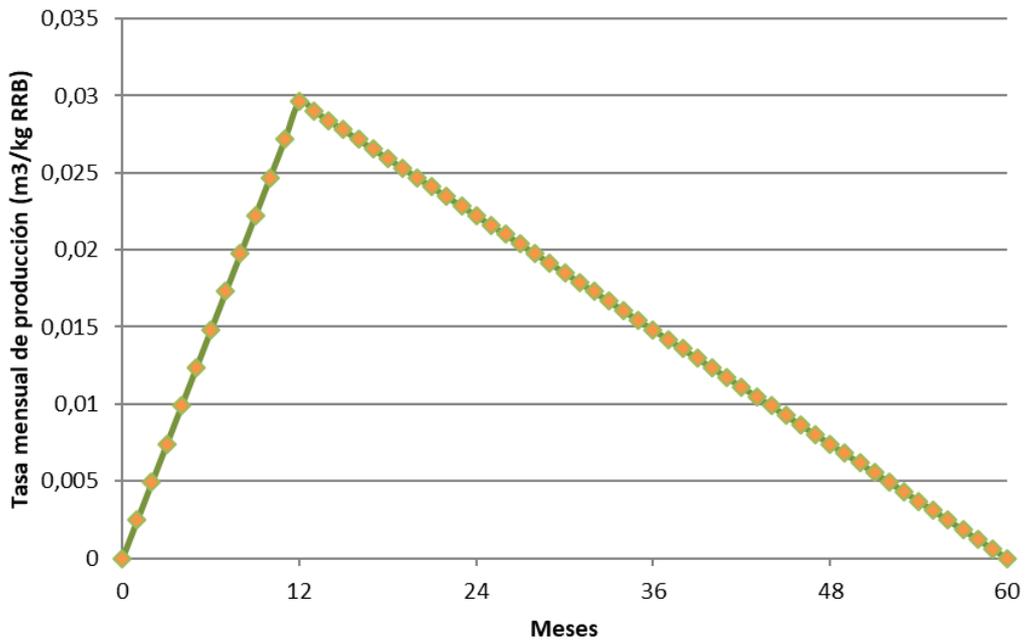


Figura 5.35.- Proyección de la tasa mensual de producción de biogás para los RRB

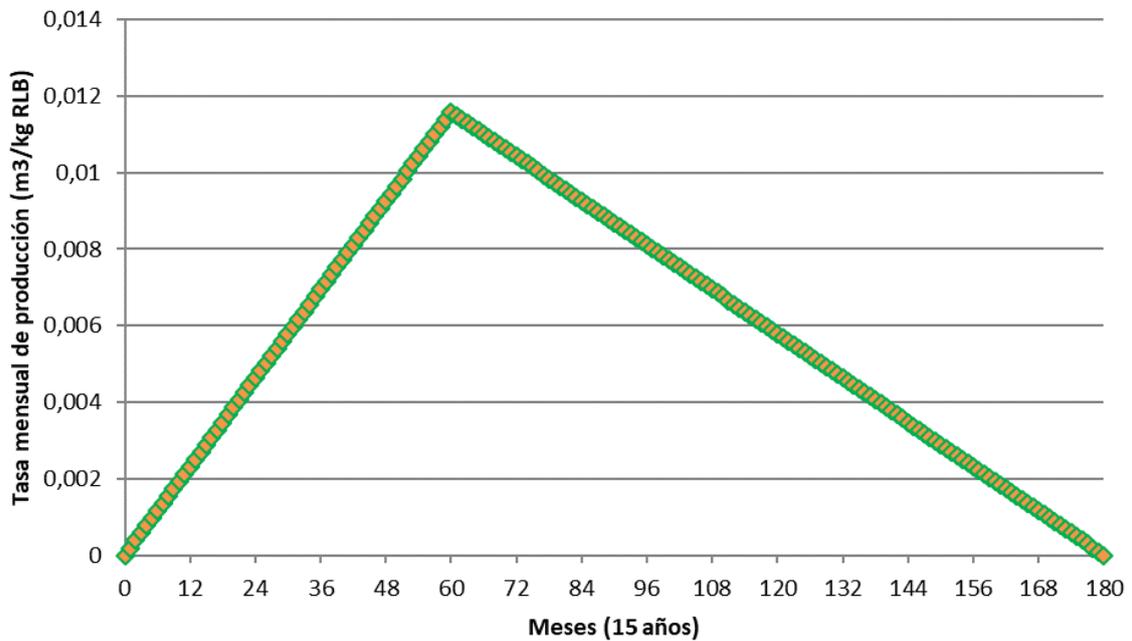


Figura 5.36.- Proyección de la tasa mensual de producción de biogás para los RLB

Una vez se han obtenido las tasas mensuales de biogás por kg de RSU y la masa de RSU depositada mensualmente (tabla 5.18), el modelo procede a calcular el volumen de biogás generado en condiciones óptimas por la degradación completa de los residuos, separadamente para los RRB y RLB (figura 5.37).

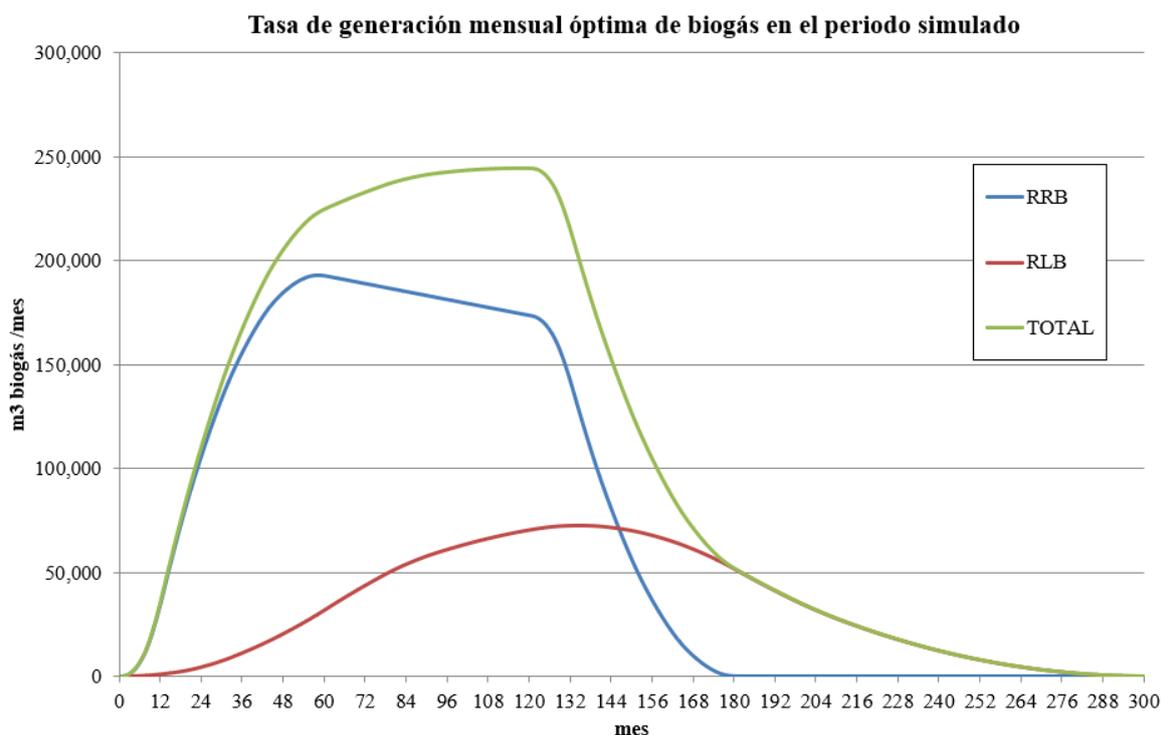


Figura 5.37.- Tasa de generación óptima de biogás para los RRB y RLB generados en la ZC1 (2021-2046)

Se observa que la máxima producción de biogás se obtiene precisamente al concluir el proceso de llenado del vertedero, diez años después de su apertura. Posteriormente, la producción de biogás se prolonga durante quince años más, ya durante la fase de vigilancia post-clausura.

La máxima producción de biogás (m^3 biogás/mes) en un determinado instante se obtuvo como convolución de todas las producciones de ambas fracciones de residuo (RRB y RLB) proyectadas a ser depositadas en el vertedero, durante un periodo de explotación de 10 años, estas se presentan en una escala mensual en series anuales (figura 5.38).

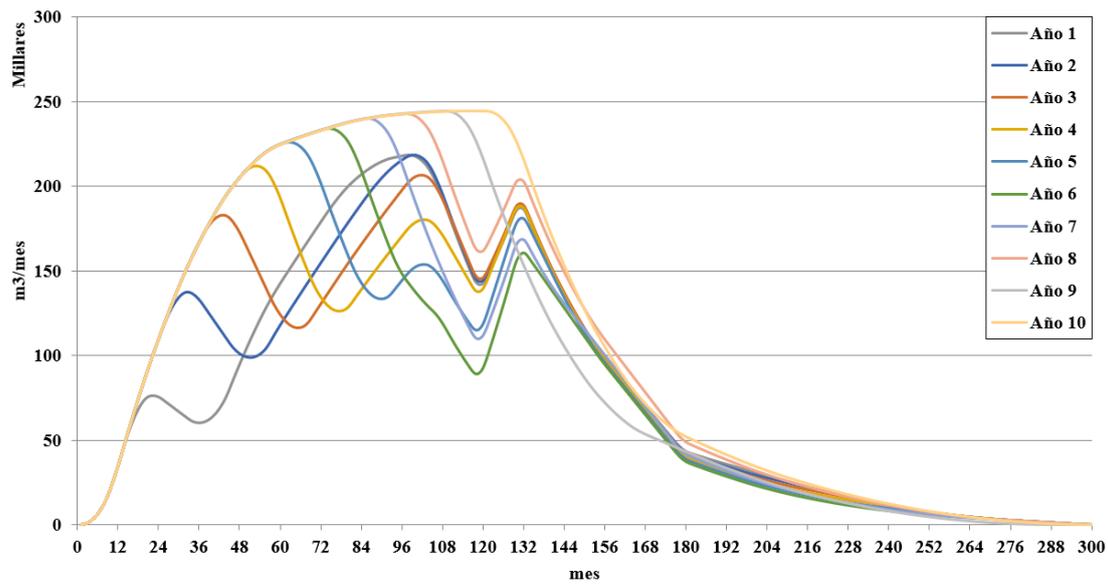


Figura 5.38.- Tasa de generación óptima de biogás para los RRB y RLB generados en la ZC1 (primeros 10 años)

La figura 5.39 muestra la producción acumulada de biogás en condiciones óptimas a lo largo del tiempo.

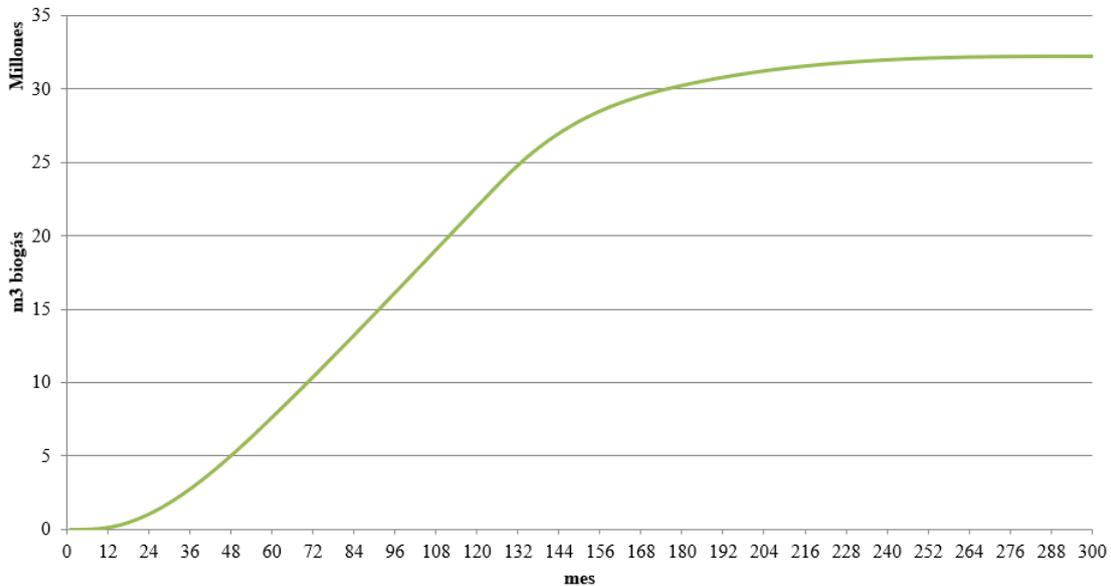


Figura 5.39.-Producción acumulada de biogás en condiciones óptimas (2021-2046)

Gracias a lo anterior, fue posible calcular la producción de biogás que se generará en el vertedero durante su vida útil (25 años), la cual corresponde a un total de 32 millones de m³ de biogás, los cuales deberán ser captados para evitar los efectos que dichos gases generan sobre el medio ambiente (efecto invernadero) y que, además, podrán ser aprovechados para generación de energía.

5.4. MONITORIZACIÓN AMBIENTAL

La aplicación de la metodología BIOLAND3 para el monitoreo ambiental de vertederos se desarrolló siguiendo el esquema conceptual propuesto en el capítulo anterior. No obstante, debido a que el vertedero que se dimensionado en la primera parte corresponde a un caso hipotético, se optó por desarrollar este análisis en un ámbito geográfico distinto. Se llevó a cabo un análisis histórico del estado ambiental del territorio asociado a todos los vertederos de RSU existentes de la Comunidad Valenciana, con el objetivo de conocer los efectos ambientales que implica la construcción de dichos emplazamientos a escala provincial, determinando las posibles variaciones que estos puedan tener a escala local. Los vertederos analizados se ubican en los siguientes municipios (tabla 5.24).

Tabla 5.24 - Ubicación de los vertederos analizados

<i>Municipios</i>	
Algimia de Alfara	Elche
El Campello	Fontcalent
Caudete de las Fuentes	Onda
Cervera de Maestre	Villena
Dos Aguas	Xixona

El análisis ambiental planteado, se llevó a cabo estableciendo un área de aplicación con radio de 5 km (7853 Ha), alrededor de todos los vertederos asociados a cada uno de los municipios mencionados, de acuerdo a lo establecido en la metodología BIOLAND3.

5.4.1. Recopilación de información

Para el análisis ambiental de los vertederos mencionados, fue necesario obtener los diferentes mapas de uso de suelo para la zona de estudio, las cuales se dividen en 10 subzonas asociadas a cada uno de los vertederos que se encuentran distribuidas a lo largo de la Comunidad Valenciana. Esta información se obtuvo a través de la plataforma SIOSE, dentro de la cual se publica información geoespacial detallada a nivel Nacional, de acuerdo con lo establecido en la metodología BIOLAND3, además de que dicha base de datos corresponde a la fuente de información de mayor escala de detalle para el territorio español (1:25.000). Se obtuvieron los mapas para los años 2005, 2009 y 2015 con los cuales se llevará a cabo el análisis (figura 5.40).

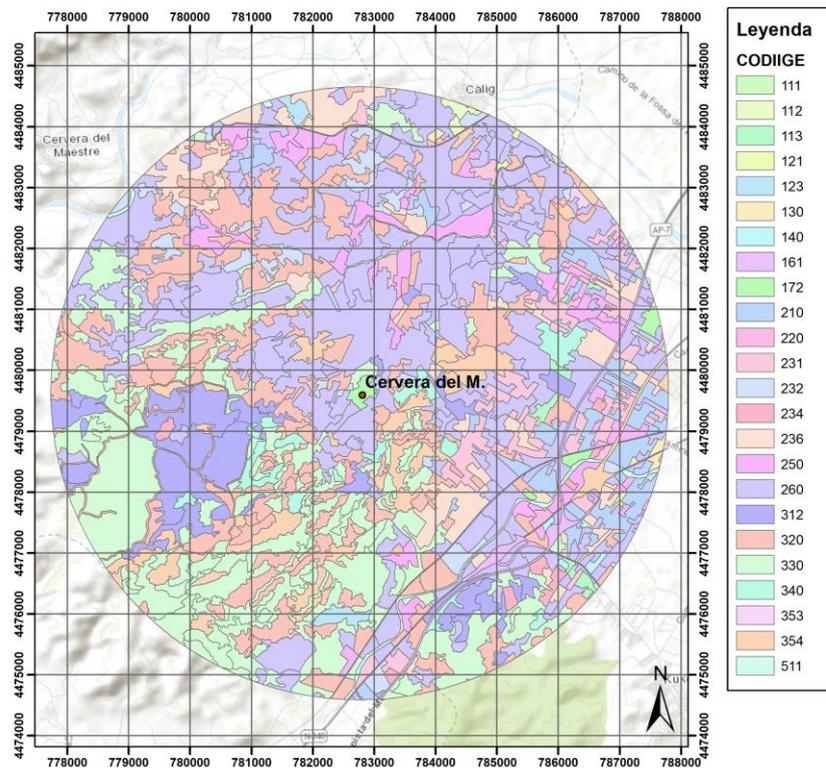


Figura 5.40.- Usos de suelo (SIOSE) para el área asociada al vertedero de Cervera del Maestre (2005)

5.4.2. Aplicación del Índice WEI

Una vez recopilada la información espacial relacionada con los usos de suelo para cada una de las áreas asociadas a los vertederos estudiados para los años 2005, 2009 y 2015, se procedió a la aplicación de la metodología BIOLAND3 para la evaluación ambiental, a través de la implementación del Índice ambiental WEI. Para esto, se utilizó la tabla de valores desarrollada en [62], donde se determinaron los valores del índice EI_j para cada uno de los usos de suelo (j) asociados a la base de datos de uso de suelo de SIOSE, los cuales se obtuvieron utilizando pesos iguales de $\alpha_i = 0,2$ para todos los factores de evaluación (i).

Combinando ambos inputs y a través de una ponderación espacial utilizando sistemas de información geográfica, fue posible obtener los valores totales, así como la distribución espacial del índice WEI en las áreas asociadas a cada uno de los vertederos mencionados para los años 2005, 2009 y 2015. Como ejemplo, esto se muestra en la figura 5.41.

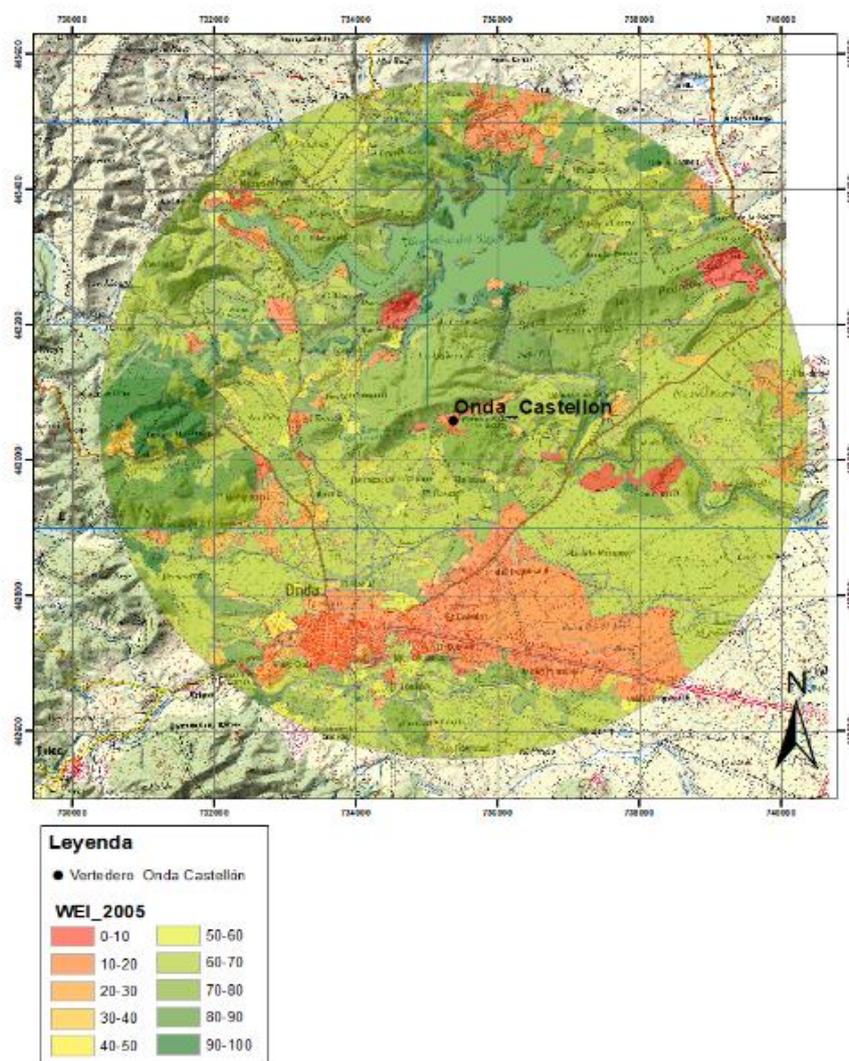


Figura 5.41.- Valores del WEI en el vertedero de Onda (2005)

Los valores finales del índice WEI asociados a cada una de las zonas para cada periodo se obtuvieron a través de una ponderación espacial de los diferentes polígonos existentes, a través de factores de ponderación (β_{jk}) que establecen la proporción del área asignada a cada uso de suelo con base en el área total.

5.4.3. Resultados y conclusiones

Realizando un análisis de los resultados arrojados por el GIS, a través de la implementación de una hoja de cálculo, se pudo obtener más información acerca de la distribución del WEI en la zona de estudio a partir de los datos del SIOSE, lo cual proporciona una visión global de la evolución del estado ambiental de los vertederos durante el periodo 2005-2015 (tabla 5.25).

Tabla 5.25.- Valores medios del índice WEI para los vertederos estudiados en los años 2005, 2009 y 2015

Ubicación	WEI		
	2005	2009	2015
Algimia	79,45	79,60	79,01
Campello	77,71	76,61	76,46
Caudete	74,21	73,82	73,06
Cervera de M.	71,63	71,49	71,04
Dos Aguas	73,31	73,35	65,54
Elche	70,69	69,76	69,16
Font Calent	66,91	66,21	65,26
Onda Castellón	69,05	68,50	67,48
Villena	69,15	68,24	68,08
Xixona	76,86	74,70	72,81
PROMEDIO	72,90	72,23	70,79

Analizando esta información, se pudo evidenciar que, en promedio, el valor del índice ambiental para todos los vertederos ha disminuido en el periodo de tiempo establecido (2005-2015), pasando de un valor inicial de 72,9 que se tenía en el año 2005 a un valor de 70,79 para el año 2015 (figura 5.42).

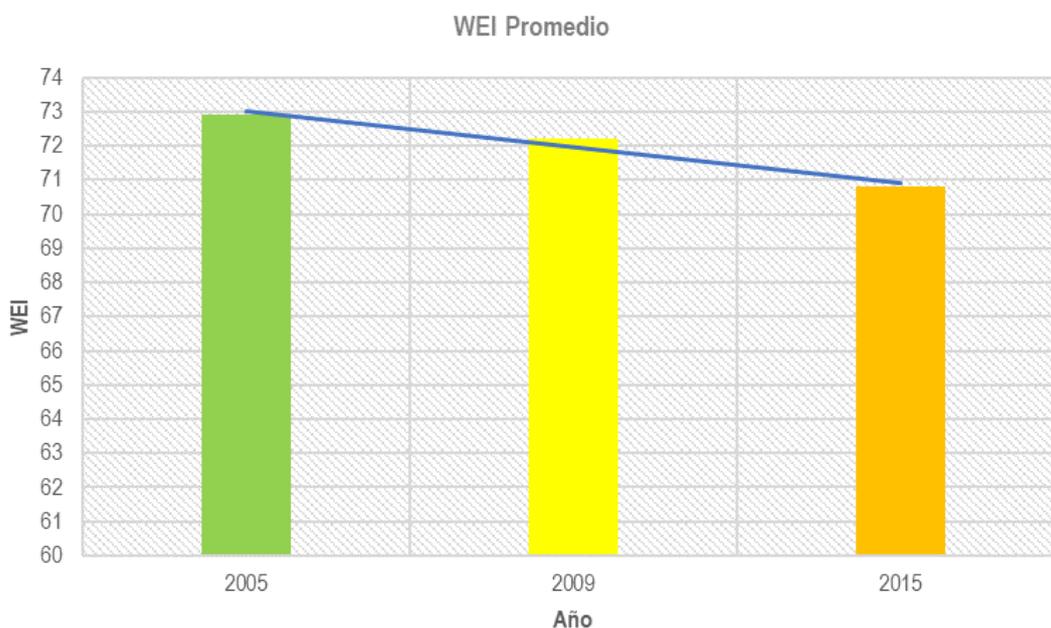


Figura 5.42 Evolución del valor medio del WEI para los vertederos estudiados

Posteriormente, se llevó a cabo una comparación de los diferentes valores del Índice WEI obtenidos para cada uno de los vertederos durante los periodos 2005-2009, 2009-2015 y el periodo total 2005-2015.

Comparando los resultados obtenidos en los diferentes años, fue posible conocer los efectos que han tenido dichos emplazamientos sobre el territorio que los rodea (tabla 5.26).

Tabla 5.26.- Diferencias entre los valores medios del WEI para los vertederos estudiados durante los periodos 2005-2009, 2009-2015 y 2005-2015

Ubicación	WEI			Evolución		
	2005	2009	2015	2005-2009	2009-2015	2005-2015
Algimia	79,45	79,60	79,01	0,19%	-0,74%	-0,55%
Campello	77,71	76,61	76,46	-1,42%	-0,19%	-1,61%
Caudete	74,21	73,82	73,06	-0,52%	-1,03%	-1,55%
Cervera de M.	71,63	71,49	71,04	-0,18%	-0,63%	-0,81%
Dos Aguas	73,31	73,35	65,54	0,06%	-10,65%	-10,59%
Elche	70,69	69,76	69,16	-1,31%	-0,87%	-2,17%
Font Calent	66,91	66,21	65,26	-1,05%	-1,42%	-2,46%
Onda Castellón	69,05	68,50	67,48	-0,80%	-1,49%	-2,28%
Villena	69,15	68,24	68,08	-1,32%	-0,23%	-1,54%
Xixona	76,86	74,70	72,81	-2,81%	-2,53%	-5,27%
PROMEDIO	72,90	72,23	70,79	-0,92%	-1,99%	-2,89%

A través de este análisis fue posible observar que el valor promedio del WEI para todos los vertederos disminuyó un 2,89% durante el periodo total 2005-2015, dentro del cual, el mayor impacto o disminución se asocia a la construcción de la Planta de Eliminación de residuos no peligrosos Dos Aguas y al Vertedero de Xixona, cuyas áreas sufrieron disminuciones del valor del WEI del 10,59% y del 5,37%, respectivamente (figura 5.43).

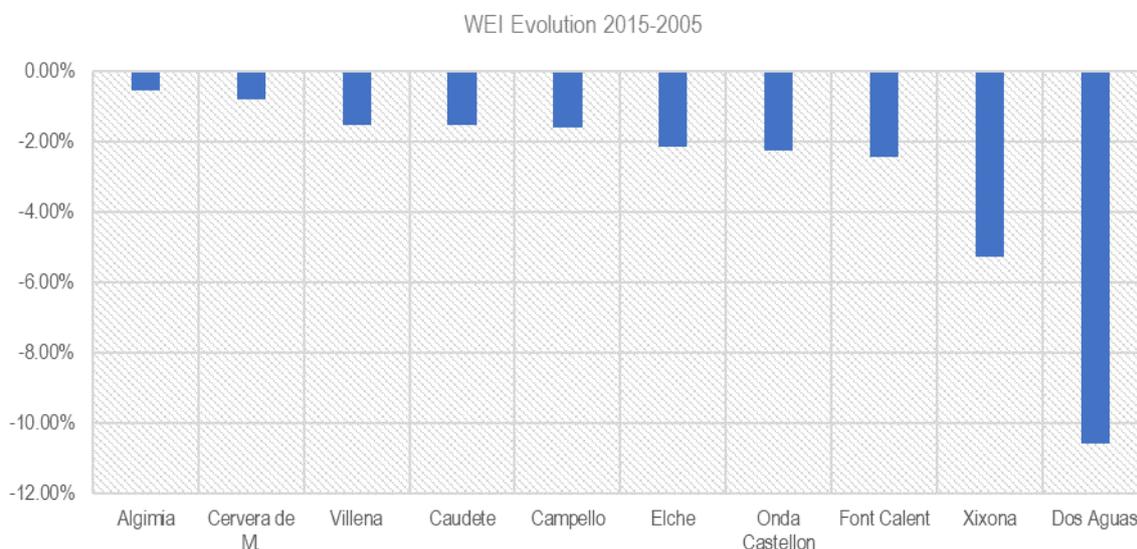


Figura 5.43.- Evolución de los valores promedio del índice WEI para los vertederos estudiados (2005-2015)

El resto de las áreas asociadas a los vertederos estudiados sufrieron disminuciones en cuanto a los valores del WEI menores al 3%.

Realizando un análisis más profundo de los resultados, se obtuvieron los valores para cada uno de los vertederos, divididos por deciles, con el objetivo de conocer los rangos de valores que aumentan y disminuyen en mayor proporción para las zonas asociadas a los vertederos.

La tabla 5.27 muestra los valores de los deciles de la función de distribución del WEI para cada uno de los años contemplados en este trabajo (que son los que contienen información del SIOSE) y sus áreas, en hectáreas y porcentaje respecto del total.

Tabla 5.27.- Evolución de valores medios del WEI por deciles para los vertederos estudiados, durante los periodos 2005-2009, 2009-2015 y 2005-2015

<i>Intervalos</i>	<i>% DE SUPERFICIE</i>			<i>Diferencias</i>		
	<i>Promedio 2005</i>	<i>Promedio 2009</i>	<i>Promedio 2015</i>	<i>2005-2009</i>	<i>2009-2015</i>	<i>2005-2015</i>
[0,10[	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
[10,20[	0,85%	1,03%	1,21%	0,19%	0,18%	0,37%
[20,30[	2,73%	3,20%	3,27%	0,47%	0,06%	0,53%
[30,40[	2,18%	2,55%	2,81%	0,37%	0,26%	0,63%
[40,50[	1,09%	1,02%	2,26%	-0,08%	1,25%	1,17%
[50,60[	1,17%	1,32%	2,61%	0,15%	1,29%	1,44%
[60,70[	4,66%	5,12%	14,66%	0,46%	9,54%	10,00%
[70,80[	54,63%	54,97%	46,49%	0,35%	-8,48%	-8,13%
[80,90[	26,91%	25,10%	21,09%	-1,81%	-4,02%	-5,83%
[90,100]	5,78%	5,69%	5,61%	-0,10%	-0,08%	-0,18%

La figura 5.44 muestra de forma gráfica las funciones de distribución acumulada para cada uno de los años estudiados de los valores promedio del WEI de todos los vertederos. Se muestran, además, los rangos asociados a los valores máximo y mínimo que ha alcanzado en cualquier año el valor del WEI promedio para cada decil.

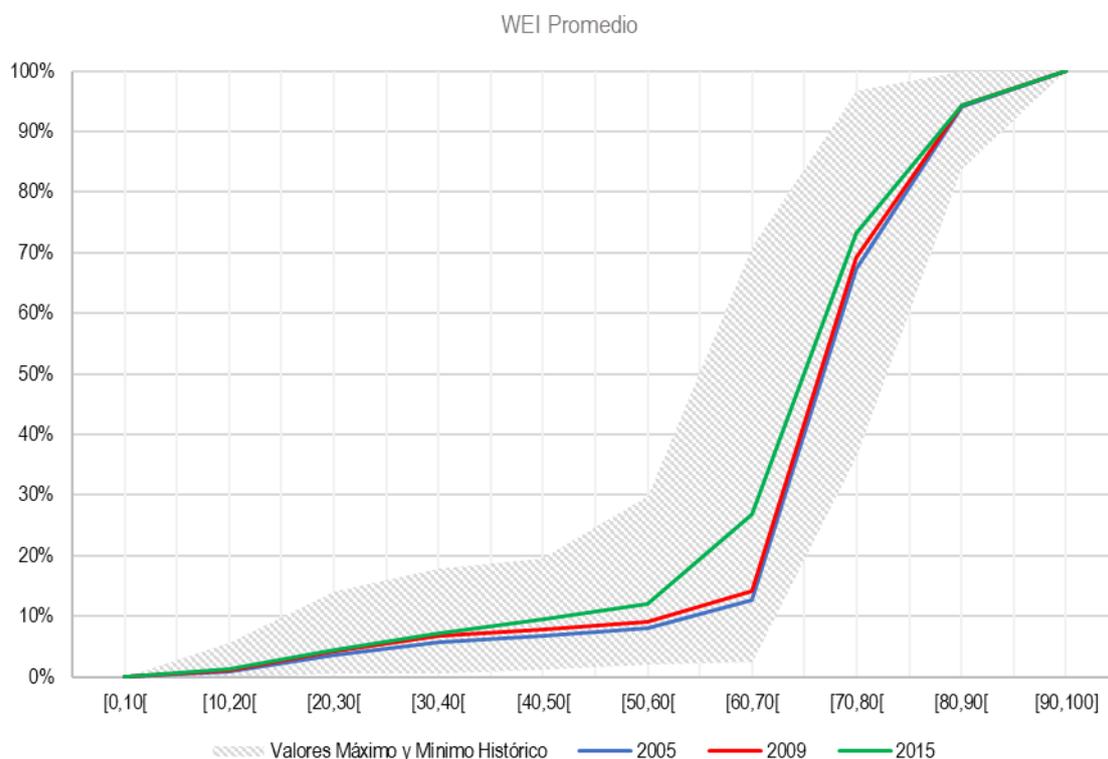


Figura 5.44.- Función de distribución acumulada del índice WEI promedio para los años 2005, 2009 y 2015, incluyendo los valores máximos y mínimos históricos.

A través del análisis de los resultados, se observa que durante el periodo 2005-2009 el valor promedio del índice WEI se mantuvo relativamente estable, sufriendo variaciones no superiores al 2% para todos los rangos.

Fue durante el periodo 2009-2015 donde se observa un fuerte cambio en el valor promedio del índice WEI. Específicamente, el rango de valores del índice WEI [70, 80] sufrió una disminución del 8,5% así como el rango de valores de [80,90] del 4%, estas clases fueron sustituidas por usos de suelo que reflejaron un aumento en los valores del WEI con rangos de [40,50], [50,60] y principalmente [60,70], lo cual se asocia a una pérdida de la calidad ambiental del territorio.

Debido a esto, es posible concluir que, en la Comunidad Valenciana, la construcción y operación de vertederos conlleva en sí un ligero deterioro ambiental del territorio (2,89% en 10 años).

La aplicación del WEI a estos casos de estudio permite observar que el índice WEI es una herramienta altamente útil, con la capacidad de ser utilizada en análisis tanto a escala regional, como a mayores escalas.

6. CONCLUSIONES

Actualmente, los vertederos de residuos sólidos urbanos siguen siendo la técnica de eliminación más comúnmente utilizada: alrededor del 40-45% de los RSU generados en España se sigue depositando en vertederos. Debido a factores como el crecimiento poblacional, la industrialización, urbanización y el crecimiento económico, la producción de RSU ha ido en aumento en una escala global durante las últimas décadas.

Debido a esto, muchos de los vertederos existentes se encuentran cerca de su capacidad máxima, lo cual representa un importante problema a tratar. Para mitigar dicha problemática, una de las acciones a llevar a cabo de manera inmediata corresponde al diseño de nuevos emplazamientos para la recepción de los RSU que serán producidos en el futuro.

Para diseñar adecuadamente un vertedero, es necesario contar con las herramientas necesarias que permitan estimar la cantidad de residuos que este recibirá a lo largo de su fase de operación. Este cálculo depende de múltiples factores, como las políticas de gestión y reciclaje, los cambios en los hábitos de consumo y principalmente de la proyección de la población futura que generará dichos residuos.

No obstante, el construir este tipo de infraestructuras conlleva efectos negativos asociados a distintos problemas ambientales. En primera instancia, la degradación de los residuos tiene como resultado la generación de lixiviados y gases, los cuales representan importantes amenazas a la salud humana y a la calidad de los ecosistemas. Por otra parte, la construcción y gestión de vertederos también genera efectos negativos sobre el paisaje debido al alto riesgo de incendios, malos olores, y efectos asociados a los cambios de uso de suelo.

Dada la relevancia de las cuestiones anteriores, tener a disposición adecuadas herramientas de análisis y modelación para cuantificar y gestionar los residuos que son depositados en vertederos y los productos que se generan a partir de su descomposición, es fundamental para que los vertederos puedan operar de manera sustentable y así cumplir los objetivos planteados por la legislación vigente.

En el presente TFM se han analizado dichas problemáticas, con el objetivo de desarrollar una nueva metodología que permita optimizar el diseño, la gestión del biogás y el control ambiental de vertederos de RSU. Todo este trabajo se engloba en la metodología BIOLAND3, que aborda los aspectos mencionados a través de la integración de tres herramientas principales de análisis y modelación.

La primera herramienta de la metodología BIOLAND3 corresponde al modelo de proyección de residuos vertidos, desarrollado a través de la proyección de la carga de población del territorio, basada en el método de componentes-cohorte y la proyección de la tasa unitaria de vertido de residuos.

En segundo lugar, se integró como una de las herramientas principales de la metodología BIOLAND3, al modelo BIOLEACH [79], a través del cual es posible llevar a cabo una proyección

de la cantidad de biogás que será generado en un vertedero, bajo condiciones óptimas. Además, dicha herramienta puede ser aplicada durante la fase de operación del vertedero, para la gestión del biogás en tiempo real.

Finalmente, como tercera y última herramienta que comprende la metodología BIOLAND3, se propone la aplicación del índice ambiental WEI [62] para el desarrollo de un estudio de monitoreo ambiental del vertedero, con el objetivo de analizar sus impactos sobre el medio ambiente.

Se verificó la aplicación de la metodología BIOLAND3, con el objetivo de demostrar sus aptitudes en relación al diseño, gestión y monitorización de vertederos de RSU y su aplicabilidad como herramienta de soporte de decisión.

En el caso práctico se llevó a cabo una proyección de los residuos sólidos urbanos que serán destinados a vertedero durante el periodo (2021-2034) para la Zona Castellón 1, a través de un estudio de modelación basado en los conceptos de “carga de población” y “tasa unitaria de vertido de residuos”. Como resultado, se obtuvo una proyección de los residuos vertidos que generará su población fija, su población no residente y los turistas que visitarán la región durante el periodo 2021-2034, equivalente a un total de 224.474.430 kg, para la cual se necesitará un área capaz de albergar un volumen total de 249.416,03 m³. A partir de este dato, se podrán tomar las decisiones necesarias para la selección de un sitio adecuado para la construcción del vertedero, considerando los requerimientos adicionales establecidos en el Plan Zonal 1.

Posteriormente, se llevó a cabo una proyección de la producción de biogás que tendrá el vertedero que recibirá los aportes generados por la población asociada a la Zona Castellón 1, durante el periodo 2021-2034 a través de la aplicación del módulo de cálculo de la máxima producción de biogás, que forma parte del modelo BIOLEACH.

La producción de biogás que se generará en el vertedero durante su vida útil (25 años) corresponde a un total de 32 millones de m³ de biogás, los cuales deberán ser captados para evitar los efectos que dichos gases generan sobre el medio ambiente (efecto invernadero) y que, además, podrán ser aprovechados para generación de energía.

Finalmente, se presenta un ejemplo de aplicación del índice ambiental WEI, a través del cual se llevó a cabo un análisis de la evolución del estado ambiental del territorio asociado a los vertederos de la Comunidad Valenciana, durante el periodo 2005-2015. A través de este análisis fue posible observar que el valor promedio del WEI para todos los vertederos disminuyó un 2,89% durante el periodo total 2005-2015, dentro del cual, el mayor impacto o disminución se asocia a la construcción de la Planta de Eliminación de residuos no peligrosos Dos Aguas y al Vertedero de Xixona, cuyas áreas sufrieron disminuciones del valor del WEI del 10,59% y del 5,37%, respectivamente.

En resumen, se considera que, mediante la aplicación de estas tres herramientas, la metodología BIOLAND3 aporta a los usuarios una potente herramienta que servirá de apoyo para la toma de decisiones, respondiendo a las necesidades reales en materia del dimensionamiento, la gestión del biogás y el control ambiental de vertederos.

7. LÍNEAS DE FUTURA INVESTIGACIÓN

Tras la conclusión del TFM y como líneas de futura investigación, se plantea la realización de las siguientes mejoras a la metodología BIOLAND3:

- Incluir, como parte de la metodología, un análisis territorial de los emplazamientos para la selección del área más adecuada para la construcción del vertedero, en función de:
 - La distribución espacial de la generación de RSU
 - La aptitud geológica de los suelos
 - Las condicionantes del transporte (accesibilidad)
 - La cercanía con zonas residenciales
 - La protección medioambiental del territorio

- La generación de una tabla con valores del índice WEI para la base de datos de uso de suelo de CORINE Land Cover debido a su aplicabilidad global, realizando un estudio de aplicación del WEI utilizando ambas fuentes de información (SIOSE y CORINE) para comprobar la bondad de la utilización de una base de datos a menor resolución, como es CORINE Land Cover.

- La integración del módulo de gestión de vertederos biorreactor y el módulo de reglas de operación del vertedero biorreactor de BIOLEACH aportaría a la metodología BIOLAND3 dos herramientas potentes para mejorar la gestión y optimización de los vertederos. A esto, se podría sumar el estudio o implementación de variables asociadas a cambio climático, para llevar a cabo proyecciones más precisas relacionadas con la humedad y temperatura a la que estarán sometidos los RSU tanto en la fase de operación como durante la fase de clausura del vertedero.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] España. Ministerio de Medio Ambiente, “Real Decreto 646/2020, del 8 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en el vertedero,” *Boletín Oficial del Estado*, 2020.
- [2] España. Jefatura del Estado, “Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular,” *Boletín Oficial del Estado*, 2022.
- [3] Comunidad Valenciana. Generalitat Valenciana, “Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de residuos de la Comunidad Valenciana,” *Boletín Oficial del Estado*, no. 5, 5 de enero de 2001, 2000.
- [4] Generalitat Valenciana, “DECRETO 81/2013, de 21 de junio, del Consell, de aprobación definitiva del Plan Integral de Residuos de la Comunitat Valenciana (PIRCV),” 2013.
- [5] Generalitat Valenciana. Conselleria de Medio Ambiente, “ORDEN de 4 de octubre de 2001, del conseller de Medio Ambiente, por la que se aprueba el Plan Zonal de residuos de la Zona I,” *Diari Oficial de la Generalitat Valenciana*, 2001.
- [6] M. E. Rodrigo-Clavero, “BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU,” Universitat Politècnica de València, 2016.
- [7] M. E. Rodrigo-Clavero, “Evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de reiduos sólidos urbanos,” PhD, Universitat Politècnica de València, 2020.
- [8] Gobierno de España, “Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015,” 2009.
- [9] Generalitat Valenciana, “DECRETO 55/2019, de 5 de abril, del Consell, por el que se aprueba la revisión del Plan integral de residuos de la Comunitat Valenciana,” 2019.
- [10] D. Laner, M. Crest, H. Scharff, J. W. F. Morris, and M. A. Barlaz, “A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills,” *Waste Management*, vol. 32, no. 3, pp. 498–512, 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2011.11.010.
- [11] M. Danthurebandara, S. van Passel, D. Nelen, Y. Tielemans, and K. van Acker, “Environmental and socio-economic impacts of landfills,” *Linnaeus Eco-Tech*, pp. 40–52, 2012.
- [12] M. El-Fadel, A. N. Findikakis, and J. O. Leckie, “Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling,” *Journal of Environmental Management*, vol. 50, no. 1, pp. 1–25, 1997, doi: 10.1006/jema.1995.0131.
- [13] R. K. Kaushal, G. K. Varghese, and M. Chabukdhara, “Municipal solid waste management in India-current state and future challenges: a review,” *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 1473–1489, 2012.

- [14] M. Sharholy, K. Ahmad, R. Vaishya, and R. Gupta, “Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India.,” *Waste Management*, vol. 4, pp. 490–496, 2007.
- [15] J. Mateu-Sbert, I. Ricci-Cabello, E. Villalonga-Olives, and E. Cabeza-Irigoyen, “The impact of tourism on municipal solid waste generation: The case of Menorca Island (Spain),” *Waste Management*, vol. 33, no. 12, pp. 2589–2593, 2013.
- [16] INE, “Censo de población y vivienda 2011,” *Instituto Nacional de Estadística*. <https://www.ine.es/dynt3/inebase/index.htm?type=pcaxis&path=/t20/e244/vinculada/&file=pcaxis&L=>
- [17] Generalitat Valenciana, “Oferta turística municipal y comarcal de la Comunitat Valenciana,” 2020. https://www.turisme.gva.es/turisme/es/files/pdf/estadistiquesdeturisme/anuarios/OTMC_2020c.pdf
- [18] Generalitat Valenciana, “Encuesta de ocupación de alojamientos turísticos,” 2020. <https://pegv.gva.es/es/temas/servicios/turismo/encuestadeocupaciondealojamientosturisticos>
- [19] Naciones Unidas, “Observatorio Demográfico de América Latina 2011: Proyecciones de población a largo plazo,” 2011.
- [20] A. Rogers, *Regional Population Projections Model*. WVU Research Repository, 2020.
- [21] N. Keyfitz, “The Social and Political Context of Population Forecasting,” in *The Politics of Numbers*, W. Alonso and P. Starr, Eds. Nueva York: Russell Sage Foundation, 1987.
- [22] E. Cannan, “The probability of a cessation of the growth of population in England and Wales during the next century,” *The Economic Journal*, vol. 5, no. 20, pp. 505–515, 1895.
- [23] INE, “Proyecciones de la Población de España 2020-2070, Metodología,” *Instituto Nacional de Estadística*, 2020. https://www.ine.es/metodologia/t20/meto_propob_2020_2070.pdf
- [24] T. Wilson, “A Review of Sub-Regional Population Projection Methods,” 2011.
- [25] J. R. Eastman, “IDRISI Andes. Guide to GIS and image processing,” Worcester, MA, 2006.
- [26] S. Hasan, W. Shi, X. Zhu, S. Abbas, and H. U. A. Khan, “Future Simulation of Land Use Changes in Rapidly Urbanizing South China Based on Land Change Modeler and Remote Sensing Data,” *Sustainability*, vol. 12, no. 11, p. 4350, 2020.
- [27] R. K. Jain, K. Jain, and S. R. Ali, “Modeling Urban Land Cover Growth Dynamics Based on Land Change Modeler (LCM) using Remote Sensing: a case study of Gurgaon, India,” *Advances in Computational Sciences and Technology*, vol. 10, no. 10, pp. 2947–2961, 2017.
- [28] R. Gupta and L. K. Sharma, “Efficacy of Spatial Land Change Modeler as a forecasting indicator for anthropogenic change dynamics over five decades: A case study of Shoolpaneshwar Wildlife Sanctuary, Gujarat, India,” *Ecological Indicators*, vol. 112, p. 106171, 2020.

- [29] A. Johari, S. I. Ahmed, H. Hashim, H. Alkali, and M. Ramli, “Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2907–2912, 2012.
- [30] T. H. Christensen, P. Kjeldsen, and B. Lindhardt, “Gas-Generating Processes in Landfill,” in *Landfilling of Waste: Biogas*, T. H. Christensen, R. Cossu, and R. Segmann, Eds. London: E & FN Spon, 1996, pp. 27–50.
- [31] G. Rettenberger and R. Stegmann, “Landfilling Gas Components,” in *Landfilling of Waste: Biogas*, T. H. Christensen, R. Cossu, and R. Stegmann, Eds. London: E & FN Spon, 1996, pp. 51–58.
- [32] H. Oonk, A. Weenk, O. Coops, and L. Luning, “Validation of landfill gas formation models,” 1994.
- [33] M. Nastev, “Modeling Landfill Gas Generation and Migration in Sanitary Landfills and Geological Formations,” Université Laval - Québec, 1998.
- [34] H. Kamalan, M. R. Sabour, and N. Shariatmadari, “A review on available landfill gas models,” *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 79–92, 2011, doi: 10.3923/jest.2011.79.92.
- [35] H. Scharff and J. Jacobs, “Applying guidance for methane emission estimation for landfills,” *Waste Management*, vol. 26, pp. 417–429, 2006, doi: 10.1016/j.wasman.2005.11.015.
- [36] IPCC, “Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,” 2006.
- [37] D. K. H. Keely, “A model for predicting methane gas generation from MSW landfills,” University of Central Florida, 1994.
- [38] M. J. J. Scheepers and B. van Zanten, “Handleiding Stortgaswinning,” Utrecht, 1994.
- [39] Golder Associates, “GasSim Manual 2.5,” 2012.
- [40] G. Tchobanoglous, H. Theisen, and S. Vigil, *Gestión integral de residuos sólidos*. Madrid: McGraw-Hill, 1994.
- [41] H. Oonk, “Literature review: Methane from landfills. Methods to quantify generation, oxidation and emission,” 2010.
- [42] D. R. Reinhart, A. A. Faour, and H. You, “First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills,” 2005.
- [43] OECD, “Environmental Indicators: Towards Sustainable Development,” Paris, 2001.
- [44] AEMA, “Conjunto básico de indicadores de la AEMA,” 2006.
- [45] DNP, “Guía para la construcción y análisis de indicadores,” Bogotá, 2018.

- [46] J. C. Simón Zarzoso, R. García Moral, G. del Barrio Escribano, A. Ruiz Moreno, S. Márquez Barraso, and M. E. Sanjuán Martínez, “Diseño de una metodología para la aplicación de indicadores del estado de conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España,” Madrid, 2013.
- [47] M. Sánchez Rivero and J. I. Pulido Fernández, “Medida de la sostenibilidad turística. Propuesta de un índice sintético,” Madrid, 2008.
- [48] J. M. Castro, “Indicadores de desarrollo sostenible urbano. Una aplicación para Andalucía,” Sevilla, 2004.
- [49] C. Bockstaller and P. Girardin, “How to validate environmental indicators,” *Agricultural Systems*, vol. 76, no. 2, pp. 639–653, 2003, doi: 10.1016/S0308-521X(02)00053-7.
- [50] D. Niemeijer and R. S. de Groot, “A conceptual framework for selecting environmental indicator sets,” *Ecological Indicators*, vol. 8, no. 1, pp. 14–25, 2008, doi: 10.1016/j.ecolind.2006.11.012.
- [51] A. Farrow and M. Winograd, “Land use modeling at the regional scale: an input to rural sustainability indicators for Central America.,” *Agriculture, Ecosystems & Environment*, pp. 249–268, 2001.
- [52] U. Heink and I. Kowarik, “What are indicators? on the definition of indicators in ecology and environmental planning,” *Ecological Indicators*, vol. 10, pp. 584–593, 2010.
- [53] M. A. Aguirre Royuela, “Los sistemas de indicadores ambientales y su papel en la información e integración del medio ambiente,” 2002.
- [54] C. C. Petit and E. F. Lambin, “Impact of data integration technique on historical land-use/land-cover change: comparing historical maps with remote sensing data in the Belgian Ardennes,” *Landscape Ecology*, vol. 17, pp. 117–132, 2002.
- [55] L. Benini, V. Bandini, D. Marazza, and A. Contin, “Assessment of land use changes through an indicator-based approach: A case study from the Lamone river basin in Northern Italy,” *Ecological Indicators*, vol. 10, no. 1, pp. 4–14, 2010.
- [56] R. S. DeFries, J. R. Townshend, and S. O. Los, “Scaling land cover heterogeneity for global atmosphere-biosphere models,” in *Scale in Remote Sensing and GIS*, D. A. Quattricchi and M. F. Goodchild, Eds. New York: CRC Press, 1997, pp. 231–246.
- [57] O. E. Sala *et al.*, “Biodiversity: global biodiversity scenarios for the year 2100,” *Science (1979)*, vol. 287, pp. 1770–1774, 2000.
- [58] R. S. Reid *et al.*, “Land-use and land-cover dynamics in response to changes in climatic, biological and socio-political forces: the case of southwestern Ethiopia,” *Landscape Ecology*, vol. 15, pp. 339–355, 2000.

- [59] J. D. Wickham, R. V. O'Neill, and K. B. Jones, "A geography of ecosystem vulnerability," *Landscape Ecology*, vol. 15, pp. 496–504, 2000.
- [60] V. de Laurentiis, M. Secchi, U. Bos, R. Horn, A. Laurent, and S. Sala, "Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA," *Journal of Cleaner Production*, vol. 215, pp. 63–74, 2019.
- [61] W. A. Martínez-Dueñas, "INRA - Índice integrado relativo de antropización: propuesta técnica-conceptual y aplicación," *Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*, vol. 5, pp. 45–54, 2010.
- [62] J. Rodrigo-Ilarri, C. P. Romero-Hernández, and M. E. Rodrigo-Clavero, "Land use/land cover assessment over time using a new weighted environmental index (WEI) based on an object-oriented model and GIS data," *Sustainability*, vol. 12, no. 24, 2020, doi: 10.3390/su122410234.
- [63] A. Manderson, "Scoping a national land-use intensity indicator," 2020.
- [64] X. Jin, Y. Jin, and X. Mao, "Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use/land cover changes – Case study of Delingha City," *Ecological Indicators*, vol. 101, no. August 2018, pp. 185–191, 2019, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.12.050.
- [65] M. Teucher *et al.*, "Behind the fog: Forest degradation despite logging bans in an East African cloud forest," *Global Ecology and Conservation*, vol. 22, p. e01024, 2020, doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01024.
- [66] S. Mubareka and D. Ehrlich, "Identifying and modelling environmental indicators for assessing population vulnerability to conflict using ground and satellite data," *Ecological Indicators*, vol. 10, no. 2, pp. 493–503, 2010, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2009.09.002.
- [67] I. Lerche, "Natural and anthropogenic environmental problems," *Energy and Environment*, vol. 12, no. 1, pp. 73–88, 2001.
- [68] D. Caniani, A. Labella, D. S. Lioi, I. M. Mancini, and S. Masi, "Habitat ecological integrity and environmental impact assessment of anthropic activities: a GIS-based fuzzy logic model for sites of high biodiversity conservation interest," *Ecological Indicators*, vol. 67, pp. 238–249, 2016.
- [69] A. R. D. Santos, R. C. F. D. Silva, L. C. D. Assis, and F. F. Mauad, "Defining environmental conservation levels considering anthropic activity in the Uberaba River Basin protected area," *Revista Ambiente y Agua*, vol. 14, 2018.
- [70] J. A. Foley *et al.*, "Global consequences of land use," *Science (1979)*, vol. 309, no. 5734, pp. 570–574, 2005.
- [71] L. R. Oldeman, "Global extent of soil degradation," 1992.
- [72] Gobierno de España, "Estrategia española de desarrollo sostenible," 2007.

- [73] J. Morelli, “Environmental sustainability: A definition for environmental professionals,” *Journal of Environmental Sustainability*, vol. 1, no. 1, p. 2, 2011.
- [74] A. Muñoz-Pedrerros, “La evaluación del paisaje: una herramienta de gestión ambiental,” *Revista chilena de historia natural*, vol. 77, no. 1, pp. 139–156, 2004.
- [75] F. R. Fernández, “La huerta valenciana: propiedad, ordenación del territorio y protección,” *Revista de Derecho Urbanístico y Medio Ambiente*, vol. 55, no. 344, pp. 109–136, 2021.
- [76] C. R. Rhyner and B. D. Grenn, “The predictive accuracy of published solid waste generation factors,” *Waste Management & Research*, vol. 6, no. 4, pp. 329–338, 1988.
- [77] M. R. Hasan, K. Tetsuo, and S. A. Islam, “Landfill demand and allocation for municipal solid waste disposal in Dhaka city-an assessment in a GIS environment,” *Journal of Civil Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 133–149, 2009.
- [78] F. Kreith and G. Tchobanoglous, *Handbook of Solid Waste Management*, Second Edi. McGraw-Hill, 2002. doi: 10.1006/wmre.1995.0050.
- [79] J. Rodrigo-Illarri, M. E. Rodrigo-Clavero, and E. Cassiraga, “BIOLEACH: A New Decision Support Model for the Real-Time Management of Municipal Solid Waste Bioreactor Landfills,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 5, p. 1675, 2020.
- [80] INE, “INE Padrón,” *Instituto Nacional de Estadística*, 2021. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica_P&cid=1254734710990
- [81] Consorcio C1, “Bionord.” <https://bionord.es/informacion-ambiental/generacion-de-residuos/generacion-de-residuos-bionord/>
- [82] A. J. Coale and P. Demeny, *Regional Model Life Tables and Stable Populations*. Princeton: Princeton University Press, 1966.
- [83] INE, “Movimiento Natural de Población,” *Instituto Nacional de Estadística*, 2019. https://www.ine.es/prensa/mnp_2019_p.pdf