



# **Modelo de Gemelos Digitales para el Estudio del Fenómeno del Despoblamiento en Cantabria**

(Digital Twin Model to Study the  
Depopulation Problem in Cantabria)

Trabajo de Fin de Máster  
para acceder al

**MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN CIENCIA  
DE DATOS**

Autor: Jesús Octavio Raboso

Director\es: Pablo Martínez Ruiz del Árbol

Septiembre - 2022

## Agradecimientos

El presente Trabajo de Fin de Máster se ha desarrollado durante el periodo de prácticas en el marco del proyecto *Evolución Poblacional de municipios en Riesgo de Despoblamiento mediante Gemelos Digitales* en el Instituto de Física de Cantabria. Me gustaría dar las gracias a Francisco Matorras Weinig por la oportunidad de formar parte del equipo y a mi tutor, Pablo Martínez Ruiz del Árbol, por su disponibilidad y consejos.

Gracias también a los compañeros de los Departamentos de Economía, Administración de Empresas y Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio. Gracias por el amplio abanico de datos y por enseñarnos a usar las bases de datos y herramientas como QGIS.

Por último, gracias a Julia y Luis por su recibimiento; a Andrés, por ser el mejor vecino; y a Elisa, por estar. Gracias a todos los compañeros. Tenemos un paseo pendiente.





## Resumen

El despoblamiento es el principal reto demográfico que afrontan diversas regiones de España. Cantabria no es ajena a este fenómeno caracterizado por bajas tasas de natalidad, altas tasas de envejecimiento y la migración de zonas rurales a zonas urbanas. Históricamente, los estudios para estimar el saldo vegetativo y, en concreto, el número de migrantes suelen asumir posiciones simplistas sobre la respuesta de un individuo ante los estímulos de su entorno. Sin embargo, la decisión de migrar depende de múltiples factores y de cómo el individuo los pondera. Los Modelos Basados en Agentes son un método robusto para simular el proceso de toma de decisiones de individuos autónomos y heterogéneos. La Teoría del Comportamiento Planeado permite esclarecer cuáles son los factores y los obstáculos que el individuo considera durante la decisión de migrar. Además, los Modelos Basados en Agentes permiten incluir la dinámica vegetativa.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es combinar los desarrollos teóricos y el análisis de datos para construir un software que, mediante el ajuste de parámetros, permita investigar futuros escenarios en el contexto del despoblamiento. Se ofrecen resultados en un conjunto de municipios de Cantabria empleando una aproximación incial para los parámetros.

**Palabras clave:** *Despoblamiento, Gemelo Digital, Individuo, Modelos Basados en Agentes, Toma de Decisiones, Teoría del Comportamiento Planeado.*

## Abstract

Depopulation is the main challenge of the demographic issue facing several rural regions of Spain, including Cantabria. This phenomena is driven by low birth rates, high elderly rates, and the rural-to-urban migration. Attempts to quantify the vegetative balance and, specifically, the number of migrants are usually driven by survey-based approaches that make simplistic assumptions about the response of an individual to variations in their circumstances. However, migration decisions are both multicausal and shaped by individual agency. As such, Agent-Based Modelling offers a robust method to simulate the autonomous decision making process of heterogeneous individuals. The Theory of Planned Behaviour provides a basis that can be used to effectively demystify the push and pull factors of origins and destinations and the intervening obstacles that stand between an individual and their migration aims. Indeed, Agent-Based Models allow to consider the birth-rate dynamics.

On the basis of a combination of such theoretical developments and data analysis, the aim of this Master's Degree Thesis is to provide a software that allows to adjust various parameters to further investigate situational changes and future scenarios. The results will be illustrated by applying the model to a specific set of municipalities in Cantabria and using an educated guess for the parameters.

**Keywords:** *Depopulation Problem, Digital Twin, Individual, Agent-Based Model, Decision-Making, Theory of Planned Behaviour.*



# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>v</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Problem statement: El despoblamiento en Cantabria . . . . .	2
1.3. Research methodology: Modelos Basados en Agentes . . . . .	3
1.3.1. El individuo como unidad de decisión . . . . .	4
1.3.2. La decisión individual y el sistema social . . . . .	4
1.4. Objetivo . . . . .	5
<b>2. Modelos Basados en Agentes para migraciones</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción . . . . .	7
2.2. Marco teórico . . . . .	9
2.2.1. Teoría de la Acción . . . . .	10
2.2.2. El problema micro-macro y el modelo de Coleman . . . . .	11
2.2.3. Teoría del Comportamiento Planeado . . . . .	13
2.3. Aspectos prácticos . . . . .	14
<b>3. Descripción del modelo y aplicación</b>	<b>17</b>
3.1. Introducción . . . . .	17
3.2. Dominio espacial y temporal . . . . .	17
3.3. Arquitectura . . . . .	18
3.3.1. Universo . . . . .	19
3.3.2. Municipios y Atractores . . . . .	19
3.3.3. Familias . . . . .	23
3.3.4. Agentes . . . . .	24
3.4. Dinámica vegetativa . . . . .	26

3.5. Dinámica migratoria . . . . .	28
3.5.1. Actitud . . . . .	30
3.5.2. Norma Subjetiva . . . . .	31
3.5.3. Control del Comportamiento Percibido . . . . .	33
3.5.4. Intención . . . . .	34
3.5.5. De la Intención a la Acción . . . . .	35
3.6. Parámetros libres y datos de entrada . . . . .	35
3.7. Inicialización . . . . .	37
3.8. Actualización . . . . .	37
3.9. Calibración . . . . .	40
3.10. Resultados: educated guess . . . . .	40
<b>4. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>45</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>47</b>
<b>Anexo I. Indicadores demográficos en Cantabria</b>	<b>52</b>
<b>Anexo II. Estado del arte en Modelos Basados en Agentes para migraciones</b>	<b>58</b>
<b>Anexo III. Preprocesado de datos</b>	<b>60</b>
<b>Anexo IV. Herramienta de monitorización y resultados</b>	<b>73</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El estudio demográfico permite conocer la distribución, composición y estructura de la población de un territorio para concluir una interpretación adecuada de su realidad y procesos socioeconómicos. Ayuda a prever la prestación de servicios, la dotación de equipamientos de forma justa y adaptada, anticipar las necesidades futuras y prevenir efectos negativos vinculados a la evolución de la población.

Analizando las tendencias y tensiones en la organización territorial, es claro que uno de los problemas a los que se enfrenta el medio rural en España es el *despoblamiento*. Desde el punto de vista demográfico, debe entenderse como la disminución del número de habitantes de un territorio debida a causas vegetativas -nacimientos y defunciones- y migratorias -altas y bajas-.

Hemos de ser precisos con la terminología ya que *despoblación* y *despoblamiento* no son sinónimos. La despoblación se basa en variables vegetativas mientras que el despoblamiento también incluye variables migratorias. Según este planteamiento, pueden darse áreas afectadas por la despoblación -si el saldo vegetativo es negativo- pero no por el despoblamiento -si el saldo neto no es negativo-.

La reducción masiva y permanente de la población puede derivar en la desertización o en una densidad de población por debajo de la cual es difícil mantener la actividad económica. Del mismo modo, el declive de la población en la España rural supone una pérdida en los ámbitos etnológico, económico y ambiental.

La distribución actual de la población en España es el reflejo del devenir histórico de una sociedad que ha sufrido sucesivos períodos en los que se han intercalado apertura, autarquía, declive y esplendor. Además, confirma la hipótesis de que la población sigue el curso de la riqueza, produciéndose una relación directa entre el cambio demográfico y los ciclos socioeconómicos del último siglo.

Pero los cambios se han producido de manera desigual. Existe una España costera, insular, urbana y dinámica que ha crecido en contraposición a una España de interior y de corte rural que ha perdido peso demográfico inexorablemente. Siguiendo el simbolismo de Sergio del Molino en *La España Vacía* [[Del16], p. 40], *visita desde el espacio, la distribución de la población se parecería a un donut con*

*un trozo de bollo en el centro del agujero. El trozo de bollo sería Madrid y su conurbación.* Pero la evolución no es sólo espacial sino también estructural. En poco más de un siglo, una sociedad de perfil joven, familiar y agrario ha pasado a caracterizarse por su envejecimiento, individualismo y diversidad.

Cantabria es una región de contrastes. El modelo industrial y urbano tradicional ha fomentado el dinamismo de los espacios de la zona costera en detrimento de la mayoría de municipios de interior. Los fuertes desequilibrios territoriales occasionados por los fenómenos de litoralización, periurbanización y declive de los municipios de interior dan lugar a la dicotomía costa-valles interiores.

El problema del despoblamiento puede abordarse desde múltiples disciplinas. Por ello, desde el Instituto de Física de Cantabria, se ha desarrollado el proyecto *Evolución Poblacional de Municipios en Riesgo de Despoblamiento mediante Gemelos Digitales*, que lo estudia desde los ámbitos de la Economía, Geografía y Ciencia de Datos. El presente Trabajo de Fin de Máster, desarrollado durante el periodo de prácticas, aborda el fenómeno del despoblamiento mediante el uso de Modelos Basados en Agentes. Esta técnica, a diferencia de otros algoritmos de Machine Learning, trabaja con datos individualizados y desagregados para poder considerar al individuo como unidad básica de decisión. Se busca complementar las conclusiones obtenidas por los compañeros encargados de estudiar los aspectos económicos y geográficos y los resultados obtenidos en el Trabajo de Fin de Máster de Yaiza Merino Lomas, tutorizado por Lara Lloret Iglesias y Francisco Matorras Weinig.

## 1.2. Problem statement: El despoblamiento en Cantabria

Considerando al municipio como unidad territorial básica, hemos de establecer qué territorios cántabros son sensibles al problema del despoblamiento.

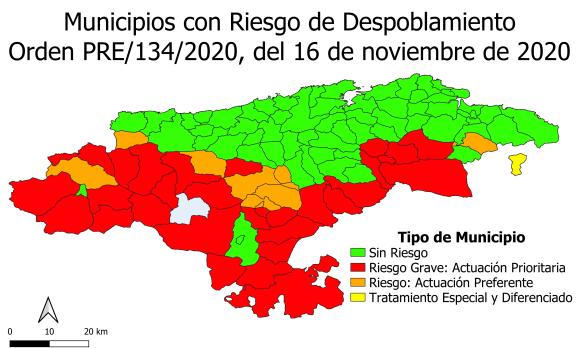


Figura 1.1: *Municipios sensibles al despoblamiento según la Orden PRE/134/2020.*

Establecer un criterio riguroso para identificar los municipios en riesgo de despoblamiento no es tarea fácil, pues son múltiples los indicadores demográficos

que pueden considerarse. Recurrimos a las indicaciones de la Consejería de Presidencia, Interior, Justicia y Acción Exterior en la Orden RE/134/2020, del 16 de noviembre del 2020 del Boletín Oficial de Cantabria (BOC) que, atendiendo a características como la ruralidad, el envejecimiento, la dispersión geográfica y la renta per cápita, establece tres tipos de municipios (Fig. 1.1):

- Municipios Sin Riesgo.
- Municipios en Riesgo Grave que requieren de una Actuación Prioritaria.
- Municipios en Riesgo que requieren de una Actuación Preferente.
- Municipios de Tratamiento Especial y Diferenciado.

Un estudio detallado sobre los principales indicadores demográficos a nivel municipal en Cantabria y un criterio alternativo para establecer qué municipios son sensibles al problema del despoblamiento puede consultarse en el Anexo I.

### 1.3. Research methodology: Modelos Basados en Agentes

El despoblamiento de un municipio está ligado a sus variables vegetativas -nacimientos y defunciones- y migratorias -altas y bajas-. Este tipo de indicadores están recogidos en los censos y padrones elaborados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) y otros organismos de Estadística Oficial. Si bien, las cifras de estos estudios *tienen una consideración meramente estadística* [Est22b]. Es decir, los censos y padrones recogen datos agregados, de carácter global.

En dichas estadísticas subyace el individuo como unidad básica pero, por cuestiones de anonimato, privacidad e imposibilidad práctica, no se le puede prestar toda la atención necesaria. Aún así, es evidente que el individuo es quien determina las variables vegetativas -con su nacimiento o defunción- y migratorias -con su decisión de migrar o permanecer en su lugar de residencia-.

Por ello, para abordar el problema del despoblamiento, proponemos la perspectiva de los Modelos Basados en Agentes (del inglés: *Agent Based Models (ABM)*), que consideran al individuo como unidad de decisión y motor de cambio.

Siguiendo los principios del concepto de Gemelos Digitales, (del inglés, *Digital Twins*), los ABMs permiten simular una población de agentes heterogéneos, autónomos en cuanto a su capacidad de decisión y capaces de interactuar entre sí. Dichos agentes se corresponden con la representación virtual e idealizada de los individuos reales.

A la hora de tomar la decisión de migrar, los individuos consideran múltiples estímulos -económicos, sociales, subjetivos....- que se corresponden con factores *push* en el origen y factores *pull* en el destino. Además, deben hacer frente a obstáculos sobre los que no tienen pleno control. Del mismo modo, sus decisiones afectan al contexto global. Podemos plantearnos la siguiente pregunta: ¿el centro de salud de un municipio se cierra porque pierde habitantes o, por el contrario, pierde habitantes porque el centro de salud ha cerrado? Los ABMs permiten considerar esa influencia bidireccional entre la acción individual y la sociedad en su conjunto.

Además, las variaciones de los parámetros de entrada del modelo y las variables consideradas en el proceso de decisión permiten construir sociedades artificiales que pueden funcionar como laboratorios computacionales para estudiar las posibles reacciones ante futuros escenarios. El objetivo es que el modelo reproduzca fenómenos pasados con cierta fiabilidad para ofrecer pronósticos a futuro.

Dado que se trata de un enfoque complejo, emplearemos dos ejemplos sencillos para mostrar la importancia de considerar al individuo como unidad de decisión y la influencia de los factores externos y subjetivos a la hora de tomar decisiones.

### 1.3.1. El individuo como unidad de decisión

En el ámbito técnico, quizá sea Guy H. Ortcutt el primero en poner el foco en el individuo como unidad básica de decisión [Orc57]. En la década de 1950, alarmado por la poca utilidad de los modelos socioeconómicos de la época para predecir situaciones futuras, Ortcutt afirma que el error de base es que dichos modelos sólo son capaces de predecir datos agregados. Considerando al individuo como unidad básica, muestra que lo importante es conocer qué ocurre con cada uno de ellos mediante el siguiente ejemplo:

Supongamos un conjunto de 100 agentes. Cada uno los  $i = 1, 2, \dots, 100$  agentes produce cierto output,  $Y_i$ , ante cierto input,  $X_i$ , según la relación:

$$Y_i = \begin{cases} 0, & \text{si } X_i = 0 \\ 1, & \text{si } X_i = 1 \text{ ó } X_i = 2 \end{cases}. \quad (1.3.1)$$

Es claro que, conocidos los valores  $\{X_i\}_{i=1}^{100}$ , entonces  $\sum_{i=1}^{100} Y_i$  tiene un valor definido. Sin embargo, es igualmente claro que la suma  $\sum_{i=1}^{100} X_i$  no es suficiente para determinar el valor de  $\sum_{i=1}^{100} Y_i$ . Supongamos que  $\{X_i = 1\}_{i=1}^{100}$ , de modo que  $\sum_{i=1}^{100} X_i = 100$ . Entonces,  $\sum_{i=1}^{100} Y_i = 100$ . Pero, supongamos ahora  $\{X_i = 2\}_{i=1}^{50}; \{X_i = 0\}_{i=51}^{100}$ . Nuevamente, se obtiene  $\sum_{i=1}^{100} X_i = 100$  y, sin embargo,  $\sum_{i=1}^{100} Y_i = 50$ .

Incluso en situaciones tan sencillas, es poco conveniente trabajar con datos agregados. Ortcutt propone crear un *modelo de varios tipos de unidades capaces de interactuar que reciben inputs y generan outputs*, siendo los inputs *cualquier cosa que entre, actúe o sea tenida en cuenta por la unidad* y siendo los outputs *cualquier cosa que provenga o sea generada por la unidad*.

### 1.3.2. La decisión individual y el sistema social

En el ejemplo de Ortcutt (Subsección 1.3.1), se explicita que los agentes producen cierto output ante cierto input, es decir, al igual que los individuos a la hora de considerar la opción de migrar, el output o acción responde a estímulos o condicionantes. Además, sus decisiones impactan en la sociedad en su conjunto. Es decir, existe cierto mecanismo de reciprocidad entre la sociedad en su conjunto y el individuo en sí mismo mediante el cual se influyen mutuamente. Podemos ver esta influencia bidireccional con la siguiente pregunta ¿los individuos abandonan un municipio porque se cierran sucursales bancarias o,

precisamente, se cierran sucursales bancarias porque los individuos abandonan el municipio? ¿Realmente pueden establecerse una causa y un efecto?

Algo similar a este mecanismo de influencia bidireccional entre el individuo y la sociedad se plantea el *Game of Life* de Conway. Popularizado en 1970 por Martin Gardner [Gar70], consiste en un autómata celular bidimensional. El tablero de juego es una malla formada por cuadrados -los agentes- que se extiende hacia el infinito en todas direcciones. Por tanto, cada agente tiene 8 vecinos, que se corresponden con los agentes adyacentes. Cada agente tiene dos estados: vivo o muerto. El estado de cada agente evoluciona a lo largo de unidades de tiempo discretas y está determinado tanto por su propio estado como por el estado de sus vecinos. Todo agente se actualiza simultáneamente en cada paso temporal siguiendo únicamente dos reglas:

- Si el agente está muerto y posee exactamente tres vecinos vivos, entonces nace.
- Si el agente está vivo y posee dos ó tres vecinos vivos, entonces sigue vivo. En otro caso, muere.

Estos agentes están influenciados por su propio estado -se correspondería con la influencia del sistema de creencias subjetivo de cada individuo- y por el estado de sus vecinos -se correspondería con la influencia de factores externos sobre el individuo-. Además, las decisiones de los agentes -posibles cambios de estado- impactan en el estado global del tablero al igual que, en el mundo real, las decisiones de los individuos repercuten en la sociedad.

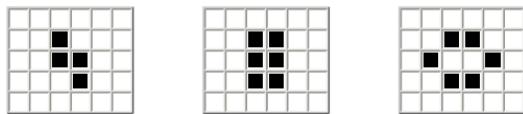


Figura 1.2: Ejemplo de secuencia en *Game of Life*.

## 1.4. Objetivo

Abordar el problema del despoblamiento implica analizar variables vegetativas y migratorias. Además, la decisión de migrar de los individuos está influenciada por múltiples factores. Es por ello que recurrimos a los ABM, un método robusto y flexible que, en combinación con teorías psicológicas sobre los procesos de decisión, permite simular el proceso de toma de decisiones de los individuos. La versatilidad de los ABM también permite la incorporación de submodelos que describan los procesos vegetativos. Así, nuestro objetivo es unir el análisis de datos con los desarrollos teóricos sobre los procesos de decisión para desarrollar un software que permita simular las dinámicas demográficas en los municipios de Cantabria y poder ofrecer pronósticos. Además, el modelo se presta a un doble análisis de sensibilidad: variando los parámetros libres y las variables que intervienen en el proceso de toma de decisiones. El modelo será aplicado sobre un conjunto concreto de municipios cántabros.

Los datasets y scripts empleados en el modelo propuesto pueden consultarse en el repositorio de GitHub del siguiente [enlace](#).



## Capítulo 2

# Modelos Basados en Agentes para migraciones

### 2.1. Introducción

Aunque lo más adecuado sea hablar de Modelos Basados en Agentes (ABMs), podemos recurrir al popular concepto de Gemelos Digitales (del inglés, *Digital Twins*) para asentar la idea básica de los ABMs. Recurriendo a la definición propuesta por VanDerHorn y Mahadevan, un *gemelo digital es una representación virtual de una realidad física, junto con su entorno y procesos asociados, que se actualiza a través del intercambio de información entre la realidad física y la representación virtual* [VM21].

Siguiendo esta definición, identificamos tres componentes -la realidad física, la representación virtual y el intercambio de información- que se relacionan según muestra la Figura 2.1.

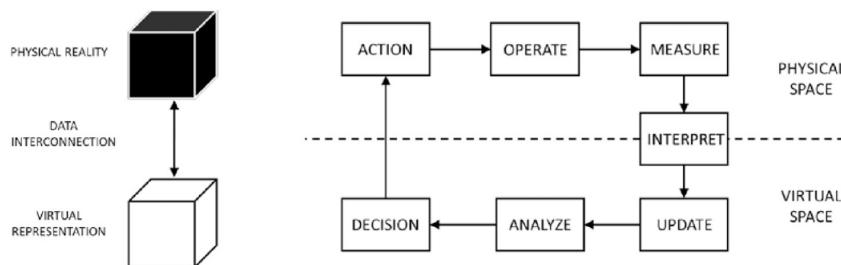


Figura 2.1: Componentes de un Gemelo Digital y procesos de alto nivel. Fuente: [VM21].

#### Realidad física

La *realidad física* hace referencia al fenómeno real que pretende ser modelado. Debe identificarse el conjunto de entidades que se interrelacionan y constituyen

yen un todo unificado. También ha de establecerse una delimitación temporal y espacial que contenga la realidad que quiere estudiarse. Dentro de este entorno, deben identificarse las variables más influyentes para recoger datos de las mismas y almacenarlos de manera adecuada para así poder reconstruirlas en la representación virtual. Por último, han de reconocerse los mecanismos que explican los cambios de estado de la realidad física con el objetivo de realizar simulaciones y ofrecer pronósticos.

### Representación virtual

El término *representación virtual* captura la idea de que el modelo es una simulación idealizada de la realidad física. Esta abstracción debe ser consistente con la realidad física y describirla mediante las variables, parámetros y estructuras adecuadas. La representación de la evolución de la realidad física como una función de ciertos inputs permite la monitorización y estimación de los comportamientos pasados, presentes y futuros para guiar la toma de decisiones.

### Intercambio de información

El *intercambio de información* explica cómo los datos recogidos en la realidad física influyen en la actualización del estado de la representación virtual. Para ello, es necesario interpretarlos correctamente y adecuarlos al nivel de abstracción de la representación virtual. Adicionalmente, debe existir un flujo de información desde la representación virtual hacia la realidad física.

Partiendo de estos conceptos y teniendo en cuenta que nuestro objetivo es desentrañar qué factores consideran los individuos para migrar, parece que el enfoque basado en el individuo -y sus acciones- y no en los datos agregados es apropiado. De este modo, se propone desarrollar un ABM.

A la hora de tomar la decisión de migrar, el individuo considera factores económicos, sociales, subjetivos... y tiene en cuenta sus propios objetivos. Es decir, pondera su realidad. Además, no siempre tiene pleno control de todas las variables, luego interviene cierta incertidumbre o azar. Por tanto, ¿qué teoría de decisión avala el modelado explícito de estos factores?, ¿cómo codificar esa interpretación subjetiva de cada individuo?

Al igual que el individuo valora su realidad física, sus acciones también repercuten en ella. ¿Cómo describir esos mecanismos de influencia bidireccional?

Considerar al individuo como unidad básica implica trabajar con datos muy particulares. Al contrario de lo que ocurre en los modelos demográficos más habituales, los datos no deben estar agregados. Pero, ¿existen esos microdatos?

A continuación, responderemos a las cuestiones planteadas. Primero, se repasan las teorías sociológicas y psicológicas que consideran al individuo como motor de cambio y permiten simular su proceso de toma de decisiones. Posteriormente, se repasarán los detalles técnicos de los ABMs.

## 2.2. Marco teórico

Considerando al individuo como unidad básica de decisión y siguiendo [KW16], la teoría de decisión escogida para los ABMs ha de cumplir los siguientes principios:

- Debe seguir el concepto KISS (*Keep It Simple, Stupid*), es decir, ser tan simple como sea posible y tan compleja como sea necesario. Su formulación teórica debe poder codificarse de manera sencilla y ser capaz de generar resultados complejos y novedosos que permitan reproducir los datos observados pero también analizar posibles situaciones inesperadas. Con ello, se busca identificar las hipótesis mínimas sobre los procesos de decisión individuales que son necesarias para obtener patrones realistas.
- Debe permitir la incorporación de factores externos y subjetivos en la toma de decisiones del agente. A la hora de tomar la decisión de migrar, el individuo considera múltiples factores -económicos, sociales, subjetivos...-, luego los agentes deben tener acceso a variables que reflejen la situación real de su entorno y ser capaces de ponderarlas según sus criterios particulares. Además, debe tenerse en cuenta la red social del agente, pues los migrantes están influenciados por las experiencias de sus iguales y referentes.
- Debe permitir que exista una brecha entre las intenciones de los agentes y el comportamiento o acción de facto. Los individuos no siempre ejecutan las acciones que desean debido a condicionantes que no controlan, como el azar. Por ejemplo, un individuo que ansía vivir en Bilbao puede no llegar a mudarse si no encuentra trabajo allí. La decisión de migrar se toma en condiciones de incertidumbre.
- Debe ser capaz de situar la decisión de migrar en el curso de la vida y relacionarla con otros eventos demográficos y cambios en los objetivos. Las prioridades de los agentes deben poder modificarse y adaptarse a sus situaciones. Además, los migrantes suelen pasar largos períodos planificando la migración, y, durante ese tiempo, el contexto social puede cambiar. Idealmente, debería ser posible tener en cuenta esta dimensión temporal y el efecto de los eventos intermedios en la representación virtual.
- Debe permitir modificaciones e incluso ser refutada. Si los resultados de las simulaciones no coinciden con las observaciones empíricas, debe asumirse que es incapaz de describir el fenómeno de estudio.

A continuación, se detallan los planteamientos de la Teoría de la Acción, que considera al individuo como motor de cambio social. Se ofrece una solución al problema micro-macro, que busca entender cómo las estructuras o variables a nivel macroscópico influyen en los individuos a nivel microscópico y viceversa. Por último, se describe la Teoría del Comportamiento Planeado, que permite simular la toma de decisiones considerando la información que el individuo obtiene de su entorno, su red social, su valoración subjetiva y la incertidumbre.

### 2.2.1. Teoría de la Acción

Entre los siglos XVII y XIX, filósofos como Thomas Hobbes, John Stuart Mill y Karl Marx comienzan a centrarse en el individuo como motor de cambio social. Apuntalan los primeros conceptos de una *Teoría de la Acción* según la cual los individuos, guiados por sus intereses, valores y creencias, ejecutan acciones para cumplir sus propios objetivos. En palabras de John Locke, *la felicidad y la desgracia constituyen aquello por lo cual cada quien se preocupa por sí mismo* [[Loc05], Libro II, Capítulo XXVII, p. 325]. Además, dichas acciones están influenciadas por la sociedad en la que el individuo se halla porque, como describe Jean-Jacques Rousseau, *el hombre ha nacido libre, y sin embargo, vive en todas partes entre cadenas* [[Rou09], Capítulo I, p. 4].

Pero, ¿por qué, según estos teóricos, es fundamental una Teoría de la Acción centrada en el individuo cuando, en realidad, están preocupados por el funcionamiento de los sistemas políticos, económicos y por los cambios macrosociales?

Se debe a que la Teoría de la Acción permite describir el mecanismo de influencia bidireccional entre el individuo y la sociedad. Asume que el funcionamiento de la sociedad puede explicarse a través las acciones de los individuos, que están enmarcadas en un contexto que a su vez incentiva y da forma a la acción.

En 1937, el sociólogo Talcott Parsons propone el *Funcionalismo Estructural* para explicar la influencia bidireccional entre el individuo y la sociedad. Busca mantener el rigor científico del Positivismo -según el cual, todo conocimiento debe limitarse a la interpretación de hallazgos reales, perceptibles sensorialmente y verificables- al tiempo que destaca la necesidad de la dimensión subjetiva de la acción individual [PCC68]. Son tres los conceptos fundamentales en la Teoría de la Acción de Parsons: el acto-unidad, el voluntarismo y la verstehen.

El *acto unidad* es el elemento más básico y está definido por cuatro componentes:

- La existencia de un individuo.
- Un objetivo o estado futuro hacia el que el individuo orienta su acción.
- El desarrollo de la acción dentro de un determinado contexto en el que existen dos tipos de factores influyentes: aquellos que el actor puede controlar y los que no puede controlar.
- Las normas y valores subjetivos que determinan la elección del individuo entre las opciones disponibles para alcanzar los fines.

El *voluntarismo* hace referencia a la capacidad de decisión del individuo sobre las elecciones que hace en el contexto en el que se halla. No implica que el individuo posea total libertad, pues el propio concepto de voluntarismo asume que el individuo posee conciencia y, por tanto, es sensible a influencias del entorno.

El concepto de *versetehen* urge a comprender el significado de la acción desde el punto de vista subjetivo del individuo, que organiza su propia comprensión del mundo. Los individuos no han ser tratados como objetos sino que deben comprenderse los significados que atribuyen a sus acciones y entorno.

Si bien, las objeciones a la teoría de Parsons se sucedieron. Robert Merton descarta el Funcionalismo Estructural en favor del Análisis Causal para examinar las causas raíz de la acción y no tanto el fin último al que está destinada [Tay70].

George Homans también descartó explicar la acción mediante los objetivos para centrarse en la Teoría del Intercambio Social. Afirma que las acciones de los individuos se basan en un análisis de coste-beneficio, luego el individuo elige la opción que le reporta mayor ganancia de entre las posibles alternativas [Hom58].

Es James S. Coleman quien aúna las diferentes corrientes para establecer la Teoría de la Acción empleada en los ABMs actuales. Según Coleman, una Teoría de Acción adecuada sí debe ser funcionalista, tal y como indica Parsons, pero únicamente a nivel individual. Los objetivos deben guiar al individuo pero no a la sociedad en conjunto. La acción o comportamiento del sistema -la sociedad- emerge como consecuencia de las acciones interdependientes de los individuos que lo componen [Col86]. Por tanto, surgen dos cuestiones:

- Cómo combinar las acciones individuales guiadas por objetivos para hacer emerger el comportamiento global de la sociedad.
- Cómo influyen las condiciones de la sociedad en las acciones individuales.

### 2.2.2. El problema micro-macro y el modelo de Coleman

Para explicar cómo influye el contexto macro en las decisiones y, por tanto, acciones de los individuos y viceversa, se recurre al modelo de Coleman. Conocido en sociología como *The Coleman's Bathtub* [Col86], se trata de un framework que incluye todas las partes relevantes y necesarias para explicar las dinámicas sociales a partir de las acciones e interacciones individuales. Repasamos sus componentes a la vez que explicamos su traducción en el modelo y los agentes -representación virtual e idealizada del individuo-.

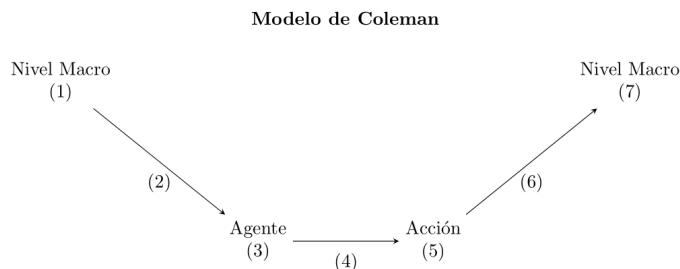


Figura 2.2: *Modelo de Coleman*.

En el modelo de Coleman (Fig. 2.2), se consideran los siguientes elementos:

1. La sociedad en la que los individuos están emplazados.

Inicialmente, es necesario identificar las características o atributos relevantes en el nivel macro que describen el fenómeno de estudio. Estos atributos describirán los espacios en los que los agentes serán emplazados y el universo en el que se moverán. Juegan un papel esencial en la percepción que los agentes tienen de su entorno, pues definen la estructura social del agente y afectan a sus acciones futuras. Generalmente, se entiende que debe

incluir las características del espacio físico real. Debe existir un mapping entre los elementos formales del modelo y el fenómeno social real que se pretende representar.

2. El mecanismo según el cual la sociedad influye en el individuo.

Deben explicitarse los mecanismos que conectan el nivel macro con el nivel micro. Es el instante en el que debe describirse cómo los atributos del nivel macro influyen en las percepciones de los agentes y, por tanto, en sus futuras acciones.

3. El individuo, sus percepciones y su capacidad de decisión.

Los agentes deben estar dotados de alguna forma de percepción, con cierta capacidad de aprendizaje y cierta capacidad autónoma de decisión. Su diseño debe estar destinado a satisfacer el fenómeno de estudio. Los agentes, heterogéneos, pueden estar equipados con diferentes atributos y mostrar diferentes patrones de comportamiento. Pueden poseer su propio historial, que puede condicionar su comportamiento futuro.

4. El mecanismo por el cual los individuos escogen la acción a ejecutar.

Las acciones de los agentes deben estar dirigidas mediante reglas de comportamiento. Se pueden aplicar todo tipo de reglas conductuales, económicas, sociológicas o psicológicas siempre que permitan una operacionalización formal y simulen el proceso de decisión del individuo real. Todas las reglas deben modelarse explícitamente y estar teóricamente avaladas. Los ABMs no requieren que todos los agentes sigan las mismas reglas de comportamiento. Diferentes agentes pueden seguir diferentes reglas de comportamiento si eso es reclamado por el problema de estudio.

5. Las acciones escogidas.

Empleando términos aristotélicos, el paso de la potencia al acto no siempre se consuma. Las acciones se ejecutan en condiciones de incertidumbre. En el mundo real, los individuos no siempre ejecutan las acciones que se proponen: bien por falta de recursos, bien por factores que no controlan. Esta incertidumbre suele estar contemplada en el punto anterior.

6. El mecanismo según el cual la acción individual influye en la sociedad.

Debe describirse un mecanismo agregativo que determine cómo las acciones individuales se combinan para afectar al nivel macro. En algunos casos, la acción de una sola persona puede generar enormes efectos a nivel macro. Esto, sin embargo, está lejos de ser habitual. En la mayoría de los ABMs, es sólo la acumulación de acciones, cada una con un efecto relativamente pequeño, lo que impulsa la dinámica de la sociedad a largo plazo.

7. La actualización de la sociedad como resultado de las acciones de los individuos.

Finalmente, si tiene éxito, la simulación proporciona una explicación del fenómeno de interés al descubrir un conjunto minimal de hipótesis que es suficiente para describir el fenómeno de estudio.

### 2.2.3. Teoría del Comportamiento Planeado

Recientemente, Klabunde y Willekens revisaron los ABMs destinados a estudiar las migraciones desarrollados hasta 2016 para analizar las teorías de decisión empleadas, siendo la Teoría del Comportamiento Planeado (del inglés, *Theory of Planned Behaviour* (TPB)) la más habitual [KW16].

La TPB, gracias a sus postulados sencillos, se ha convertido en casi un estándar a la hora de desarrollar ABMs. En Ciencias Sociales, se ha empleado la conjunción de los ABM y la TPB para estudiar la influencia de los compañeros escolares en el rendimiento académico [Ber99]; la predisposición a asistir a eventos deportivos [CK03] o realizar ejercicio físico [HCB01]; la actitud hacia hábitos como el consumo de alcohol [Kut02], tabaco [NCB99] y la adopción de medidas de protección al mantener relaciones sexuales [Alb+01]. En el ámbito económico, se ha empleado para formular hipótesis sobre el emprendimiento laboral [KI06] y, en el ámbito ecológico, ha servido para medir la actitud hacia el reciclaje [Ces+15] o para entender la opinión de los agricultores ante la adopción de medidas contra el cambio climático [KSF09]. Cómo no, la conjunción ABM-TPB ha sido empleada para estudiar los flujos migratorios [Ngu+18], [KSB12]. Una breve perspectiva histórica sobre el uso de los ABMs para estudiar flujos migratorios y una revisión de las principales referencias consultadas para la presente memoria puede consultarse en el Anexo II.

Propuesta por Arjzen [Ajz91] en 1991 como una extensión de la Teoría de la Acción Razonada [AF80], esta teoría psicológica afirma que la elección de una acción o un comportamiento se explica por que el individuo desarrolla una intención como resultado de un proceso de toma de decisiones. Dicho proceso reposa sobre tres pilares: la Actitud (del inglés, *Behavioural Attitude* (BA)); la Norma Subjetiva (del inglés, *Subjective Norm* (SN)); y el Control del Comportamiento Percibido (del inglés, *Perceived Behavioural Control* (PBC)). Finalmente estos componentes son ponderados para dar lugar a una Intención (del inglés, *Intention* (I)) final que describe el sentimiento del individuo hacia la acción. Analizamos estos componentes en el contexto de las migraciones. Cuanto mayor sea esa Intención o sentimiento, más probable será que el individuo ejecute la acción.

#### Actitud

La Actitud (BA) engloba los motivos o razones explícitas que llevan a que el individuo decida migrar. En su traducción virtual, existen dos corrientes a la hora de definir este componente para los agentes: quienes lo hacen en función de características propias del agente -sexo, edad, estado civil...- y quienes lo hacen en función de variables estructurales de los municipios. Adoptaremos el segundo enfoque ya que nuestro objetivo es simular razonamientos de individuos reales del tipo *si resido cerca de un centro educativo, estaré más motivado a tener hijos* ó *si resido lejos de una estación de tren, tendrá menor capacidad de movilidad*.

### **Norma Subjetiva**

La Norma Subjetiva (SN) refleja el apoyo de la red social del individuo. A la hora de migrar, los individuos tienen en cuenta la opinión de sus iguales y referentes. En la representación virtual, los agentes suelen ser emplazados en un municipio y son ligados a otros agentes -su red social- para comparar sus decisiones. En nuestro caso, la red social estará compuesta por la familia y la valoración de cada agente estará definida en función de las Estadísticas de Variaciones Residenciales [Est22a]. Este componente responde a afirmaciones como *todos mis amigos han migrado, luego es probable que yo haga lo mismo ó todo mi entorno quiere seguir viviendo en el barrio y yo quiero estar cerca de ellos.*

### **Control del Comportamiento Percibido**

El Control del Comportamiento Percibido (PBC) está ligado al concepto de autoeficacia. Refleja la confianza del individuo para lograr sus objetivos. Describe su capacidad para aprovechar las oportunidades y sobreponerse a obstáculos no previstos así como su predisposición a superar barreras psicológicas, económicas o culturales. Para ello, recurriremos a datos de índole económico y a la distancia geográfica entre el municipio de origen y el posible destino. Este componente responde a afirmaciones como *estoy seguro que puedo encontrar trabajo si me mudo ó creo que perderé la relación con mis amigos si me alejo de ellos.*

## **2.3. Aspectos prácticos**

Los ABM poseen múltiples ventajas frente a las herramientas de inferencia estadística y los algoritmos de Machine Learning utilizados habitualmente en los estudios demográficos:

- Incorporación de factores subjetivos y externos en la toma de decisiones.

Siendo los agentes autónomos y heterogéneos las unidades básicas de decisión, es claro que deben estar dotados de cierta subjetividad. Cada agente ponderará las variables que definen su entorno por medio de un conjunto de coeficientes que serán parámetros libres del modelo. Por ello, en nuestro caso, los agentes deben tener acceso a las variables que describen los municipios. Además, cada agente estará influenciado por su red social.

- Enfoque bottom-up y el problema micro-macro.

A grandes rasgos, el enfoque bottom-up permite identificar y resolver los problemas más pequeños para luego integrarlos y resolver el problema global. Se trata de un paradigma en el que las partes del sistema se definen en detalle para posteriormente ensamblarlas. Es precisamente la estructura de los ABMs la que permite superar la brecha micro-macro y, por tanto, estudiar los resultados emergentes de las acciones individuales. Esto coincide con los desarrollos del Modelo de Coleman (Sección 2.2.2)

En nuestro modelo, la pieza fundamental es el agente -representación virtual del individuo- que puede tener o no familia. De tenerla se considera

a la familia como una unidad de decisión conjunta que depende a su vez de los agentes que la componen. Tanto las familias como los agentes libres se emplazan en un municipio. El conjunto de municipios constituye nuestro universo. Dado este planteamiento, se ha decidido usar Python por su facilidad para la Programación Orientada a Objetos.

- Más allá de fórmulas matemáticas.

Los ABMs son necesarios cuando las especificaciones matemáticas se vuelven intratables. Permiten abordar situaciones para las que no existen descripciones analíticas, por ejemplo, modelos no lineales complejos. Los ABMs permiten simular los comportamientos de sistemas sociales que no son manejables empleando métodos clásicos. Es el caso de nuestro problema, en el que se no existen ecuaciones de gobierno.

- Herramientas de monitorización.

Monitorizar las actualizaciones y los cambios de estado es fundamental. Las herramientas gráficas permiten observar los cambios y desempeñan un papel importante a la hora de descubrir nuevos comportamientos emergentes, pues permiten identificar patrones nuevos e inesperados que requieren de una explicación. Además, son extremadamente útiles en la presentación y difusión de los resultados de la simulación.

A continuación y siguiendo [Cha03], se analizan las dificultades que hemos encontrado en el desarrollo del modelo ABM que proponemos:

- Necesidad de nuevas teorías sociológicas y psicológicas.

La mayoría de las teorías sociológicas o psicológicas hasta ahora disponibles no prestan suficiente atención al individuo. Por un lado, los estudios de patrones estadísticos no proporcionan ninguna información sobre los individuos. Por otro, las teorías que asumen individuos homogéneos son muy poco realistas. Por ejemplo, las Teorías de Elección Racional consideran que todos los individuos toman las decisiones siguiendo los mismos principios e independientemente de su contexto personal y social, lo cual entra en contradicción con el objetivo de los ABMs de representar agentes heterogéneos y autónomos. Es necesario el desarrollo de un nuevo marco teórico para aprovechar todo el potencial de los ABMs.

- Hacia una representación compleja de la sociedad y su contexto.

El enfoque estadístico habitual implica una concepción estática de causa y efecto y sólo identifica algunas causas directas de los fenómenos de interés, mientras que trata todas las demás variables como exógenas. Sin embargo, los ABMs exigen una representación más compleja de todo el contexto.

Del mismo modo, debe existir un trade-off entre la realidad física y su abstracción virtual. Por ejemplo, en el mundo real, un municipio puede organizarse en barrios pero quizás llegar a ese nivel de precisión pueda ser contraproducente en la representación virtual.

- Estandarización.

No existe un estándar para desarrollar ABMs. Todo depende del problema en estudio, los datos disponibles y las teorías empleadas. Ni siquiera existe un consenso a la hora de usar la conjunción ABM-TPB. Prueba de ello es el debate planteado por Muelder y Filatova [MF18] en el que comparan diferentes implementaciones de la TPB. Tampoco existe un lenguaje de programación estándar: quizá el único entorno de desarrollo integrado para el desarrollo de ABMs sea NetLogo [Wil22].

- Recopilación y disponibilidad de datos.

Quizá la dificultad más importante sea la disponibilidad de datos, bien porque los enfoques hasta ahora existentes no han necesitado de datos similares, bien porque es difícil recopilar datos que midan las intenciones subjetivas de los individuos. Para cuantificar o medir el proceso de toma de decisiones de los individuos se proponen encuestas y cuestionarios guiados [CK03], tests de respuesta múltiple [Wil17] y entrevistas con expertos en el ámbito del estudio [Ngu20].

Además, también ha de considerarse el problema de la anonimización. En el contexto demográfico, recopilar todos los datos necesarios en municipios muy pequeños entraría en conflicto con cuestiones de privacidad.

Por ello, es recomendable empezar el desarrollo de un ABM con el curado de datos y diseñando estrategias de recopilación para luego buscar el aval teórico necesario y no al revés.

Por falta de espacio, no ha sido posible incluir un capítulo en el que se aborde el preprocesado de datos. Si bien, para tener una visión general de todos los datos disponibles, puede consultarse el Anexo III.

# Capítulo 3

## Descripción del modelo y aplicación

### 3.1. Introducción

Una vez explicado el marco teórico, es momento de describir el ABM desarrollado para simular las dinámicas vegetativas y migratorias de los municipios sensibles al problema del despoblamiento en Cantabria. Para detallar los componentes y el funcionamiento del modelo, recurriremos a las indicaciones del Protocolo ODD+ [Gri+10], que aspira a ser un estándar en las descripciones de los ABMs.

### 3.2. Dominio espacial y temporal

En primer lugar, hemos de delimitar el dominio espacial. Para ello, nos basaremos en la propuesta de delimitación comarcal mostrada en la Figura 3.1. Además haremos una distinción entre los municipios realmente sensibles al problema del despoblamiento y los grandes núcleos urbanos que actúan como principales receptores de los flujos migratorios.

Para facilitar la explicación del modelo y teniendo en cuenta la distinción mencionada, consideraremos como ejemplos de municipios en riesgo de despoblamiento aquellos pertenecientes a la comarca de Campoo-Los Valles, a saber, Campoo de Enmedio, Campoo de Yuso, Hermandad de Campoo de Suso, Las Rozas de Valdearroyo, Pesquera, Reinosa, San Miguel de Aguayo, Santiurde de Reinosa, Valdeolea, Valdeprado del Río y Valderredible. Si bien, descartaremos Pesquera y Valderredible por falta de datos. Como atractor, consideraremos únicamente al municipio de Santander.

En segundo lugar, hemos de establecer el dominio temporal. Dado que disponemos de la serie de natalidad y mortalidad para los años 2000 – 2020; de los datos de altas y bajas municipales para los años 2012 – 2020 y la Estadística

de Variaciones Residenciales para los años 1998 – 2021; y de los datos de estructura demográfica desagregados por quinquenio y sexo para los años 2003, 2010 y 2021, se establece como año de partida el 2010. El modelo se inicializa con la información del año 2010 y cada iteración se corresponde con un año real. Se considerará el periodo comprendido entre los años 2011 y 2021 como entrenamiento. Para una perspectiva más amplia sobre los datos disponibles, puede consultarse el Anexo III.

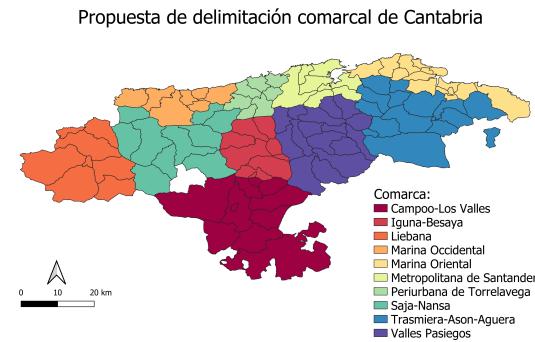


Figura 3.1: Propuesta de delimitación comarcal de Cantabria.

### 3.3. Arquitectura

En la presente sección nos preguntamos cuáles son las entidades que constituyen el modelo y cuáles son los atributos que las caracterizan.

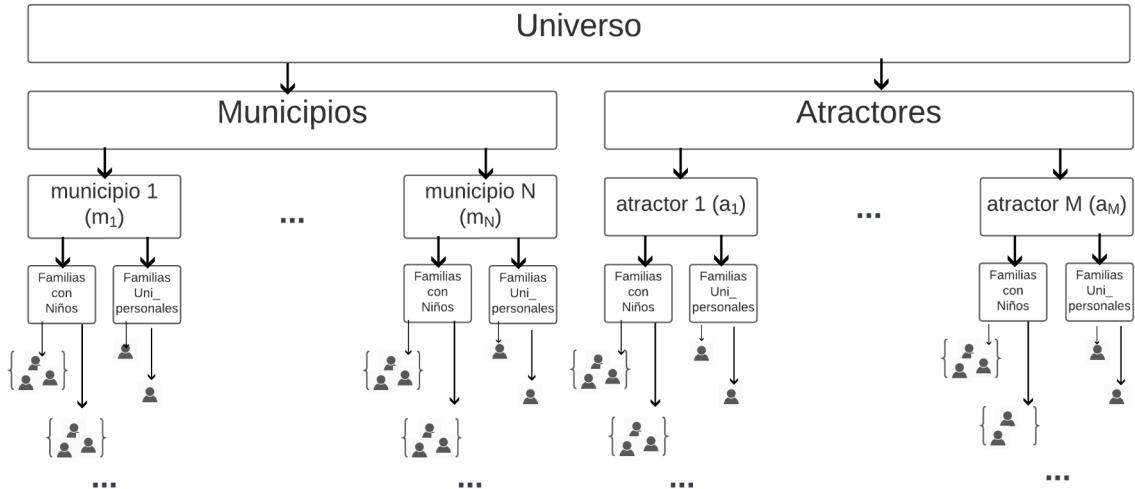


Figura 3.2: Arquitectura del ABM.

Las entidades se corresponden -siguiendo la terminología de Programación Orientada o Objetos- con las clases que constituyen el modelo. Los atributos se corresponden con las variables que permiten distinguir a una instancia del resto

de instancias de la misma clase. Además, se dispondrá de otras estructuras o variables para monitorizar el estado global del modelo. Una forma de identificar las clases y atributos necesarios para caracterizarlas es respondiendo a la siguiente pregunta: si quisiésemos parar la ejecución el modelo y guardarlo en su estado actual para que pueda volver a ponerse en funcionamiento más tarde, ¿qué información necesitamos salvar?

La Figura 3.2 muestra la arquitectura del modelo que planteamos. A pesar de su forma, no debe interpretarse como un diagrama de tipo árbol sino como uno de conjuntos en el sentido de que los niveles inferiores están contenidos en los superiores.

Nuestro Universo está formado por un conjunto de Municipios y un conjunto de Atractores. Los elementos de ambos conjuntos -Municipios y Atractores- se corresponden con la representación idealizada de municipios reales. Si bien, se ha establecido esta distinción para incluir como elementos de Municipios la representación de municipios reales sensibles al problema del despoblamiento y, como elementos de Atractores, los grandes núcleos urbanos ajenos a este problema y que actúan como principales focos de recepción. A su vez, cada elemento de Municipios o Atractores está compuesto por la unión de un conjunto de Familias con Niños -sus elementos son agrupaciones de agentes que simulan una familia real en su sentido más clásico: madre, padre e hijos- y otro de Familias Unipersonales -agentes que forman una unidad familiar en sí mismos-.

### 3.3.1. Universo

Se trata de la clase más importante no sólo porque contenga -en sentido conjuntista- a todas las demás sino porque alberga los métodos de inicialización, actualización y monitorización. También recibe los datos de entrada y, a partir de ellos, genera todos los elementos necesarios. Sus atributos más destacados son:

- $UV_1$ : Año de la ejecución.
- $UV_2$ : Modelo de natalidad.
- $UV_3$ : Modelo de mortalidad.
- $UV_4$ : Parámetros libres (Cuadro 3.10).
- $UV_5$ : Conjunto de instancias de Municipios.
- $UV_6$ : Conjunto de instancias de Atractores.

Los métodos inicializadores y de actualización se explican, respectivamente en las Secciones 3.7, 3.8, respectivamente.

### 3.3.2. Municipios y Atractores

El conjunto o clase Municipios contiene, como elementos o instancias, la representación idealizada de los municipios reales que se consideran en el dominio espacial como sensibles al problema del despoblamiento. Por ejemplo, aplicando el modelo sobre la comarca de Campoo-Los Valles, las instancias se corresponderían con los municipios de Campoo de Enmedio, Campoo de Yuso, Hermandad

de Campoo de Suso, Reinosa, Las Rozas de Valdearroyo San Miguel de Aguayo, Santiurde de Reinosa, Valdeolea y Valdeprado del Río. A continuación, se detallan los atributos que describen cada instancia.

La manera más evidente de identificar una instancia de Municipios es mediante su nombre y un identificador proporcionado por el INE [Est22f], de modo que los dos primeros atributos que consideraremos son:

- $MA_1$ : Nombre del municipio.
- $MA_2$ : Identificador.

Hemos de emplazar espacialmente las instancias Municipios. Para ello, emplearemos los siguientes atributos:

- $MA_3$ : Latitud en grados sexagesimales.
- $MA_4$ : Longitud en grados sexagesimales.

Dada la dicotomía costa-valles interiores, la altura sobre el nivel del mar parece un factor importante. Por tanto, añadimos:

- $MA_5$ : Altura sobre el nivel del mar. Se dispone de los valores mínimo, máximo y medio.

Teóricamente, los ciudadanos deberían tener posibilidades similares en el acceso a infraestructuras con independencia de su lugar de residencia pero, como puede comprobarse en el Anexo III, en la práctica no se cumple. Por ello, caracterizamos las instancias de Municipios con sus distancias a las principales infraestructuras:

- $MA_6$ : Distancia al municipio de más de 10.000 habitantes más cercano. Se dispone de los valores mínimo, máximo y medio.
- $MA_7$ : Distancia a la carretera nacional más cercana. Se dispone de los valores mínimo, máximo y medio.
- $MA_8$ : Distancia a la autovía o autopista más cercana. Se dispone de los valores mínimo, máximo y medio.
- $MA_9$ : Distancia a la estación de ferrocarril más cercana. Se dispone de los valores mínimo, máximo y medio.

Lo mismo ocurre con la prestación de servicios, luego añadimos los atributos:

- $MA_{10}$ : Distancia media al hospital más cercano.
- $MA_{11}$ : Distancia media a la farmacia más cercana.
- $MA_{12}$ : Distancia media al centro educativo más cercano.
- $MA_{13}$ : Distancia media al centro de atención de urgencias hospitalarias más cercano.
- $MA_{14}$ : Distancia media al centro de atención primaria más cercano.

Como puede advertirse, no hemos detallado las unidades de los atributos  $MA_5 - MA_{14}$ . Se debe a que se mueven en valores muy desiguales. Por ejemplo, para  $MA_5$ , el punto más alto sobre el nivel del mar de Cantabria se encuentra en el término municipal de Camaleño, con una altura, según los datos disponibles, de 2.597 m mientras la menor altitud sobre el nivel del mar son 0 m -aunque los datos disponibles apuntan a un punto hundido 70 m por debajo del nivel del mar en Reocín, los valores negativos los consideramos como 0-. Del mismo modo, la mayor distancia media al ferrocarril  $MA_9$  son los 33.542,692 m de Camaleño mientras que la menor son los 5,090 m de San Vicente de la Barquera.

Dados estos amplios espectros, normalizaremos las variables en el rango [0, 1]. Tal y como se señaló en la Sección 2.2.3, cuanto mayor sea la intención del agente hacia un municipio, más probable será que se desplace a él. Teniendo en cuenta el mapa de la Figura 1.1, parece claro que cuanto más cercano a la costa es el municipio, menos riesgo de despoblamiento tiene, luego la menor altitud sobre el nivel del mar se corresponderá con 1 y la mayor, con el valor 0. Análogamente, parece intuitivo que cuanto menor sea la distancia a las infraestructuras y servicios, más atractivo será el municipio así que la menor distancia se corresponderá con el valor 1 y la mayor, con el valor 0. Ejemplificamos el proceso seguido con estos datos de prueba:

Supongamos que tenemos dos elementos de Municipios - $m_1, m_2$ - y un elemento de Atractores - $a_1$ - para los que disponemos de las distancias (en metros) mínima, máxima y media a una estación de ferrocarril ( $MA_9$ ) como recoge el Cuadro 3.1. Intuitivamente, cuanto más cerca esté la estación de ferrocarril, mejor luego la distancia mayor se transforma en 0 y la menor, en 1.

Sean  $x_{max}$  y  $x_{min}$  los valores máximo y mínimo, respectivamente, del Cuadro 3.1. Para cada valor  $x_{old}$  del Cuadro 3.1, la normalización se realiza siguiendo la fórmula:

$$x_{new} = \frac{x_{max} - x_{old}}{x_{max} - x_{min}}. \quad (3.3.1)$$

Por tanto, la transformación resultaría en Cuadro 3.2. El procedimiento es análogo para los atributos  $MA_6 - MA_9$ .

ENTIDAD	DIST MIN	DIST MAX	DIST MEAN
$m_1$	1.000	3.000	2.000
$m_2$	1.500	3.500	2.500
$a_1$	2.000	4.000	3.000

Cuadro 3.1: Distancias a estación de ferrocarril sin normalizar.

ENTIDAD	DIST MIN	DIST MAX	DIST MEAN
$m_1$	1	0,33	0,66
$m_2$	0,83	0,16	0,5
$a_1$	0,66	0	0,33

Cuadro 3.2: Distancias a estación de ferrocarril normalizadas.

Cuadro 3.3: Ejemplo de normalización de variables de tipo distancia.

Dado que para cada atributo  $MA_{10} - MA_{14}$  sólo se dispone del valor, se sigue un proceso similar con la siguiente modificación. Por ejemplo, dados todos los valores medios de las distancias al hospital más cercano ( $MA_{10}$ ), el menor valor se transforma en 1 y el mayor, en 0.

Además, cada instancia de Municipios está caracterizada por los siguientes atributos de tipo económico:

- $MA_{15}$ : Salario medio anual,
- $MA_{16}$ : Gasto medio anual en alquiler.

Nuevamente, hemos de normalizar los valores en el rango  $[0, 1]$ . Intuitivamente, cuanto mayor sea el salario, mejor; y cuanto menor sea el coste de la vida, mejor. Supongamos que tenemos el Cuadro 3.4 que muestra el salario y el gasto en alquiler anual en euros en el dominio de juguete que planteamos anteriormente. Sean  $x_{max}$  y  $x_{min}$  los valores máximo y mínimo, respectivamente, del Cuadro 3.4. Para cada valor  $x_{old}$ , la normalización se realiza siguiendo la fórmula:

$$x_{new} = \frac{x_{old} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3.3.2)$$

Por tanto, la transformación resulta según el Cuadro 3.5.

ENTIDAD	SALARIO	ALQUILER
$m_1$	19.000	4.000
$m_2$	23.000	5.000
$a_1$	28.000	6.000

Cuadro 3.4: Coste de la vida sin normalizar.

ENTIDAD	SALARIO	ALQUILER
$m_1$	0,625	0
$m_2$	0,791	0,041
$a_1$	1	0,083

Cuadro 3.5: Coste de la vida normalizado.

Cuadro 3.6: Ejemplo de normalización de variables económicas.

# Population centre 39093 #	
Population Centre : Valdeprado del Río.	
Total inhabitants : 306.	
Male inhabitants : 172.	
Female inhabitants : 134.	
----- -----	
FEATURES   ATTRIBUTES	
Latitude:	42.894082
Longitude:	-4.062104
Min height above the sea level (m):	750.000000
Max height above the sea level (m):	1275.000000
Mean height above the sea level (m):	982.275248
Min distance to a 10k pop. centre (m):	7940.497383
Max distance to a 10k pop. centre (m):	18318.90354
Mean distance to a 10k pop. centre (m):	13750.44533
Min distance to road (m):	51.958133
Max distance to road (m):	12214.24807
Mean distance to road (m):	5564.194968
Min distance to highway (m):	47.387743
Max distance to highway (m):	12492.33326
Mean distance to highway (m):	5643.054025
Min distance to railroad (m):	237.258304
Max distance to railroad (m):	12259.56888
Mean distance to railroad (m):	6033.720958
Mean distance to hospital (m):	51990.28616
Mean distance to pharmacy (m):	9593.630535
Mean distance to education centre (m):	8186.663543
Mean distance to emergency centre (m):	8636.859948
Mean distance to healthcare centre (m):	6189.523323
Mean annual income (€):	14003.19201
Mean annual expenditure(€):	392.366112

Figura 3.3: Atributos originales.

Figura 3.4: Atributos normalizados.

Figura 3.5: Ejemplo de atributos para una instancia de Municipios ó Atractores.

A parte de estos atributos identificativos, cada instancia posee sendos historiales sobre sus datos de natalidad y mortalidad para los datos reales y simulados. También dispone de atributos que guardan información sobre el número de habitantes y de familias así como estructuras que permiten almacenar datos sobre el proceso de decisión de los agentes y que son empleados por las herramientas de monitorización. Evitamos entrar en detalles sobre estos atributos ya que son cuestiones de carácter técnico que poco aportan a la explicación del modelo.

### 3.3.3. Familias

En términos generales, un bebé o un adolescente no puede tomar unilateralmente la decisión de migrar, pues aún no posee ni de recursos ni del bagaje personal que requiere dicha decisión. Por ello, su acción depende de la decisión de su familia y, en concreto, de sus padres. En la realidad, si, por ejemplo, los progenitores encuentran empleo en otro municipio y deciden mudarse, entonces los hijos estarán obligados a desplazarse con ellos. Si bien, los hijos también tienen cierta capacidad de influencia sobre los progenitores y, en algunos casos, puede efectuarse un desplazamiento, si la situación de los hijos lo requiere.

A pesar de los múltiples datos sobre familias y hogares disponibles (Anexo III), se ha optado por simplificar la dinámica y la estructura familiar. Las estructuras familiares del modelo sólo podrán representar familias reales en el sentido más tradicional: padre, madre e hijos. Todos los agentes que no están incluidos en una estructura familiar se dirá que son libres o que forman una familia unipersonal. Por ello, consideraremos dos subclases -o subconjuntos- de Familias: Familias con Niños y Familias Unipersonales. Podría objetarse que la subclase Familias Unipersonales es redundante, pues un agente que no forme parte de una instancia de Familia con Niños ya se entiende como libre pero, por cuestiones técnicas, es necesario que forme parte de alguna subclase de Familias, de ahí la necesidad de la subclase Familias Unipersonales.

Supondremos que la estructura familiar se origina en torno a un agente menor de 18 años. Dado que se asume que no puede tomar una decisión sobre una posible migración por sí mismo, es necesario ubicarlo en una estructura familiar. Para ello, tal y como se explicará en las Secciones de Inicialización [3.7](#) y Actualización [3.8](#), se buscará a un agente de sexo masculino y a un agente de sexo femenino que verifiquen ciertas condiciones -no ser miembros de otra instancia de Familias con Niños y estar en determinado rango de edad- que actúen como progenitores. Por ello, cada instancia de Familias con Niños posee los siguientes atributos:

- $FN_1$ : Emplazamiento
- $FN_2$ : Lista de miembros.
- $FN_3$ : Agente que actúa como padre.
- $FN_4$ : Agente que actúa como madre.
- $FN_5$ : Lista de agentes menores de 18 años que actúan como hijos.
- $FN_6$ : Límite de hijos. En el mundo real, una familia no tiene infinitos hijos, de modo que se establecerá un límite de 1, 2 ó 3 hijos en su representación virtual.
- $FN_7$ : Dado que el proceso de actualización se ejecuta de manera secuencial, este booleano permite que una unidad familiar no migre dos veces

en una misma iteración. Nuevamente, supongamos el dominio de juguete dado por las instancias de Municipios  $m_1, m_2$  y la instancia de Atractores  $a_1$ . Tal y como se explica en la Sección 3.8, primero se consideraría la dinámica migratoria de  $m_1$ , es decir, sus posibles bajas. Supongamos que cierta instancia de Familias con Niños se desplaza hasta  $m_2$ . A continuación, en la misma iteración, se considera la dinámica migratoria de  $m_2$ , es decir, sus posibles bajas. De no poseer un atributo como  $FN_7$ , la unidad familiar antes mencionada podría ahora desplazarse, por ejemplo, hasta  $a_1$ . Sin embargo, mediante  $FN_7$  se impide que migre más de una vez durante la misma iteración del modelo global.

Además, la subclase Familias con Niños cuenta con sendos métodos para:

- Convertir a los hijos en agentes libres -instancias de Familias Unipersonales- en el momento en el que cumplen 18 años.
- Disolver la instancia en caso de que todos los hijos hayan alcanzado la mayoría de edad. En dicho momento, tanto los hijos como los progenitores se convierten en agentes libres -instancias de Familias Unipersonales-

Las instancias de Familias Unipersonales se corresponden con agentes que no pertenecen a ninguna instancia de Familia con Niños. De manera similar, poseen los siguientes atributos:

- $FU_1$ : Emplazamiento.
- $FU_2$ : Miembro constituyente.
- $FU_3$ : Análogo a  $FN_7$ .

### 3.3.4. Agentes

Los agentes se corresponden con la representación idealizada de los individuos del mundo real. Cada agente está distinguido únicamente por un identificador que se corresponde con su número de entrada o generación en el Universo. Además, se les distinguen por sexo, edad y la instancia de Municipios o Atractores en la que residen, de modo que los primeros atributos son:

- $AG_1$ : Identificador.
- $AG_2$ : Sexo (masculino/femenino).
- $AG_3$ : Edad.
- $AG_4$ : Emplazamiento -instancia de Municipios o Atractores- donde reside.

En función del emplazamiento del agente, podemos definir a qué distancia se encuentra el agente de las infraestructuras y servicios así como sus variables económicas. Por ello, los agentes poseen los siguientes atributos:

- $AG_5$ : Altitud sobre el nivel del mar.
- $AG_6$ : Distancia al municipio de más de 10.000 habitantes más cercano.
- $AG_7$ : Distancia a la carretera nacional más cercana.
- $AG_8$ : Distancia a la autovía o autopista más cercana.

- $AG_9$ : Distancia a la estación de ferrocarril más cercana.

¿Cómo se establecen estos atributos de los agentes? Supongamos que cierto agente está empleado en cierta instancia de Municipios  $m_i$  y queremos establecer su distancia a una estación de ferrocarril  $AG_9$ . Podemos acceder a las distancias al ferrocarril que identifican al emplazamiento, es decir, al atributo  $MA_9$  de  $m_i$ . Asumamos que tenemos los datos sin normalizar para que la explicación sea más intuitiva.

De  $MA_9$ , conocemos los valores mínimo,  $MA_{9,min}$ , máximo,  $MA_{9,max}$ , y medio  $MA_{9,mean}$ . De hecho, dados los datos en bruto, incluso conocemos la desviación típica,  $MA_{9,std}$ , a pesar de que no la hemos incluido en el modelo. Podríamos inicializar a un agente en el municipio  $m_i$  diciendo que vive a una distancia del ferrocarril dada por un número aleatorio que sigue una distribución  $N(\mu = MA_{9,mean}, \sigma = MA_{9,std})$ . Si bien, este valor podría caer fuera del rango  $[MA_{9,min}, MA_{9,max}]$ . Por ello, se ha optado por asignar un valor aleatorio según una distribución triangular cuyo extremo izquierdo -valor mínimo- es  $MA_{9,min}$ ; cuyo extremo derecho -valor máximo- es  $MA_{9,max}$ ; y cuya moda es  $MA_{9,mean}$ . Lo apropiado sería que el parámetro moda de esa distribución fuese la moda real de la variable, pero por falta de disponibilidad se asume que es la media. El procedimiento es análogo para los atributos  $AG_5 - AG_9$ .

A la hora de lanzar los valores aleatorios según distribuciones triangulares en el modelo hay que tener en cuenta que, al normalizar los datos, el valor mínimo real se transforma en el máximo normalizado 1 y el valor máximo real se transforma en el mínimo normalizado 0.

Los atributos relacionados con la dotación de servicios son:

- $AG_{10}$ : Distancia al hospital más cercano.
- $AG_{11}$ : Distancia a la farmacia más cercana.
- $AG_{12}$ : Distancia al centro educativo más cercano.
- $AG_{13}$ : Distancia al centro de urgencias hospitalarias más cercano.
- $AG_{14}$ : Distancia al centro de atención primaria más cercano.
- $AG_{15}$ : Salario medio anual.
- $AG_{16}$ : Gasto medio anual en alquiler.

Sólo se dispone de los valores medios  $MA_{10} - MA_{15}$  a nivel municipal. Por tanto, estos atributos del agente serán asignados como tales, es decir,  $AG_i$  se corresponde con  $MA_i$  para  $i = 10, \dots, 15$ . A priori, puede parecer que con esto se pierde heterogeneidad, pero se solventará empleando los coeficientes subjetivos de cada agente.

Además, dado que los agentes pueden agruparse para formar familias, poseen los siguientes atributos:

- $AG_{17}$ : Indica si pertenece o no a alguna unidad familiar. En caso de sí pertenecer a alguna unidad familiar, se indica si esta es una instancia de Familias con Niños o Familias Unipersonales.
- $AG_{18}$ : Booleano para indicar si el agente es considerado menor o no. Se considera menores aquellos agentes cuya edad es menor a 18 años-

- $AG_{19}$ : Booleano para indicar si el agente es susceptible de ser progenitor. Se considera que un agente está en disposición de ser progenitor si tiene entre 18 y 60 años.

Con respecto a estos dos últimos atributos, pueden darse únicamente las siguientes combinaciones:

- $AG_{18} = \text{True}, AG_{19} = \text{False}$ : si el agente es menor.
- $AG_{18} = \text{False}, AG_{19} = \text{True}$ : si el agente es susceptible de ser progenitor.
- $AG_{18} = \text{False}, AG_{19} = \text{False}$ : si el agente no es ni menor ni susceptible de ser progenitor. Esta combinación es la que caracteriza a los gentes más veteranos.

### 3.4. Dinámica vegetativa

El concepto de despoblamiento incorpora como variables de estudio las relativas a la dinámica vegetativa, es decir, el número de nacimientos y defunciones producidos en un municipio. Esta dinámica también debe reflejarse en las representaciones virtuales de los municipios.

En las instancias de Municipios deben *nacer* agentes al igual que nacen individuos en el mundo real, es decir, deben inicializarse nuevos agentes y ser emplazados en la instancia. Del mismo modo, deben *fallecer* agentes al igual que fallecen individuos en el mundo real, es decir, deben eliminarse agentes de la instancia. Además, debemos conocer cuál es el número de nuevos agentes y el número de agentes a eliminar.

Por ello, proponemos crear dos modelos de Machine Learning, uno para la natalidad y otro para mortalidad que puedan ser invocados al finalizar cada interacción de actualización -año- para saber cuántos nuevos agentes hay que introducir y cuántos agentes hay que eliminar en cada emplazamiento.

Inicialmente, puede ser tentador usar como variables predictoras para el modelo de natalidad algunas como el número de hijos por mujer, el número de mujeres en edad fecunda o el índice de carga materna. Del mismo modo, parece apropiado usar como variables predictoras algunas como la tasa de envejecimiento, el índice de dependencia o el índice de dependencia de los mayores. En cualquier caso, todas ellas se derivan del estudio de la estructura demográfica a nivel municipal (Anexo III) y pueden ser derivadas a partir del número de agentes según quinquenio y sexo. Dado que parece existir una relación entre la población total y el número de nacimientos y defunciones en un municipio (Fig. 3.6), emplearemos los datos desagregados por sexo y quinquenio para tener en cuenta si influye o no el número de mujeres u hombres según la edad.

Se dispone de la series de natalidad y mortalidad a nivel municipal entre los años 2000 y 2020 (Anexo III). Se dispone de la estructura demográfica desagregada por sexo y edad en los años 2003, 2010 y 2021 (Anexo III). Es decir, sólo tenemos datos en común para los años 2003 y 2010.

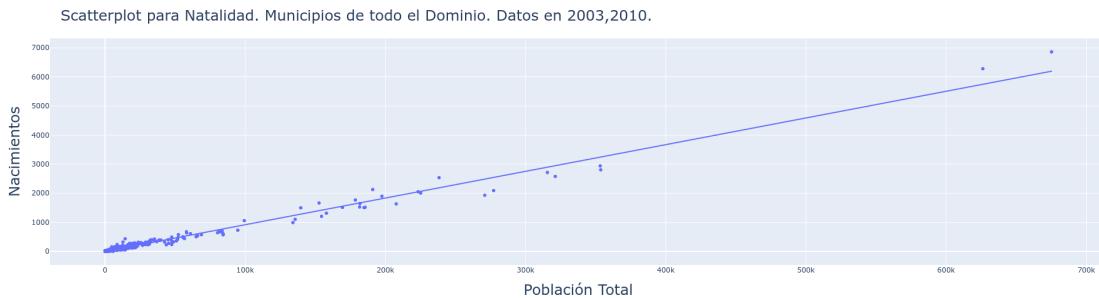


Figura 3.6: Scatterplot natalidad y población total por municipio

En primera instancia, se consideraron todos los municipios disponibles en todo el dominio, es decir, en todas las CCAA del Cuadro 4.5 (Anexo III), obteniendo datos completos para un total de 3854 municipios. Tras unificar los datos de manera adecuada, se obtenía una tabla como la mostrada en el Cuadro 3.7. Con un total de 7.708 instancias e ignorando la columna MUNICIPIO, se estableció como variable objetivo para el modelo de natalidad la columna NATALIDAD y como variable objetivo para el modelo de mortalidad la variable MORTALIDAD. Para ambos modelos, se utilizaron como variables predictoras todas las relativas a los datos desagregados por quinquenio y sexo, dando un total de 42 predictores.

MUNICIPIO	NATALIDAD	MORTALIDAD	HOM 0-4 AÑOS	MUJ 0-4 AÑOS	...	HOM +100 AÑOS	MUJ +100 AÑOS
Municipio1_2003							
Municipio1_2010							
...							
Municipio3854_2003							
Municipio3854_2010							

Cuadro 3.7: Forma de los datasets para los modelos de natalidad y mortalidad.

Tras dividir el conjunto de datos en un subconjunto de train (66,6 %) y uno de test (33,3 %), se emplearon las métricas Mean Absolute Error (MAE), Mean Square Error (MSE) y R2 para validar diferentes modelos de Machine Learning. A pesar de los buenos resultados para las métricas, existía un sesgo evidente y, por ejemplo, los modelos de natalidad apostaban por 0 como valor seguro salvo para municipios con mucha población como Zaragoza o Bilbao. Al aplicarlos en Cantabria, incluso en Santander apostaban por 0 nacimientos. Resultados no más alentadores se obtuvieron en los modelos de mortalidad.

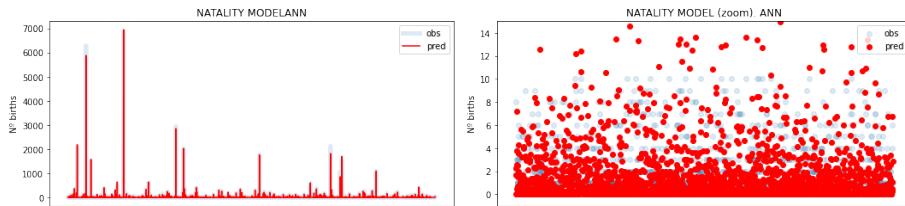


Figura 3.7: Sesgo en los modelos de natalidad. Modelo de tipo red neuronal.

Para reducir el sesgo tanto en los modelos de natalidad como de mortalidad, se proponen los siguientes pasos:

- Dividir las filas o instancias -correspondientes con los datos de municipios en 2003 ó 2010- en clases según la población total para obtener una muestra balanceada. Se establecen los siguientes estratos:
  - Menos de 501 habitantes. De un total de 5.195 instancias, se extraen 150 aleatoriamente para train; el resto, para test.
  - Entre 501 y 1.000 habitantes. De un total de 954 instancias, se extraen 150 aleatoriamente para train; el resto, para test.
  - Entre 1.001 y 2.500 habitantes. De un total de 809 instancias, se extraen 150 aleatoriamente para train; el resto, para test.
  - Entre 2.501 y 5.000 habitantes. De un total de 312 instancias, se extraen 150 aleatoriamente para train; el resto, para test.
  - Entre 5.001 y 10.000 habitantes. De un total de 195 instancias, se extraen 194 aleatoriamente para train; el resto, para test.
  - Entre 10.001 y 50.000 habitantes. De un total de 195 instancias, se extraen 194 aleatoriamente para train; el resto, para test.
  - Entre 50.000 habitantes. De un total de 49 instancias, se extraen 25 aleatoriamente para train; el resto, para test.
- Reducir las variables predictoras:
  - Para el modelo de natalidad, se consideran como variables predictoras el número de hombres y el número de mujeres en los quinquenios de 0 – 4 años hasta 55 – 59 años, obteniendo 24 predictores.
  - Para el modelo de mortalidad, se consideran como variables predictoras el número de hombres y el número de mujeres en los quinquenios de 60 – 64 años hasta más de 100 años, obteniendo 16 predictores.

Tanto para natalidad como para mortalidad, se han entrenado un modelo de redes neuronales, un modelo de regresión lineal y un modelo de vecinos cercanos al que se le ha aplicado cross validación para hallar el mejor hiperparámetro ( $k = 7$  en natalidad;  $k = 2$  en mortalidad). Se han validado con las métricas MAE, MSE y R2 obteniendo los resultados mostrados en el Cuadro 3.8 para el modelo de natalidad y en el Cuadro 3.9 para el modelo de mortalidad.

MODELO	MAE	MSE	R2
ANN	5,303922	76,519608	0,997218
Reg Lineal	1,587646	32,511720	0,997740
KNN	2,700133	2.653,392452	0,815577

Cuadro 3.8: Resultados para el modelo de natalidad.

MODELO	MAE	MSE	R2
ANN	6.411765	108.509804	0.997097
Reg Lineal	3.177355	137.138434	0.994417
KNN	6.413092	7423.108654	0.697825

Cuadro 3.9: Resultados para el modelo de mortalidad.

### 3.5. Dinámica migratoria

En primer lugar, han de establecerse los posibles movimientos migratorios que pueden ejecutar los agentes. Recordemos que, las instancias de Municipios simulan municipios reales sensibles al problema del despoblamiento y las instancias

de Atractores simulan grandes núcleos urbanos ajenos a dicho problema que, en la realidad, actúan como principales receptores de los flujos. Por ello y dado que en la inicialización (Sección 3.7) sólo se construyen agentes en las instancias de Municipios, se considera que los agentes pueden desplazarse entre las instancias de Municipios y desde estas hacia las instancias de Atractores. No se considera la posibilidad de que un agente se desplace desde una instancia de Atractores a una de Municipios. En el momento en el que un agente se desplaza desde una instancia de Municipios a una de Atractores, se considera que, en cierto modo, el agente ha salido del dominio de interés. Las instancias de Atractores actúan como *contenedor*. Los flujos posibles se describen en la Figura 3.8.

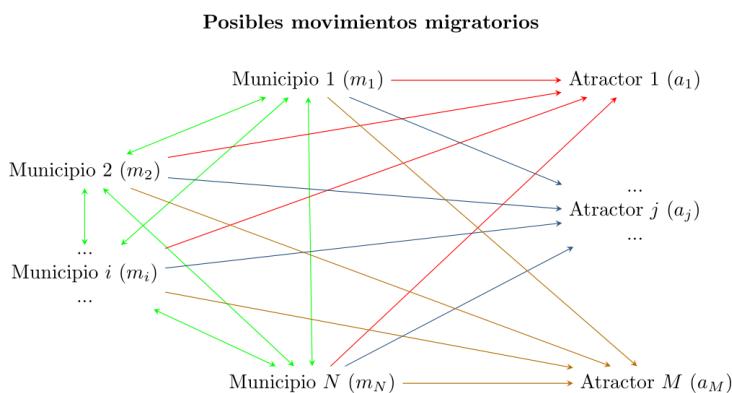


Figura 3.8: Posibles movimientos migratorios entre las instancias de Municipios y Atractores.

A continuación, siguiendo los principios de la TPB (Subsección 2.2.3), se detalla la definición de cada uno de sus componentes.

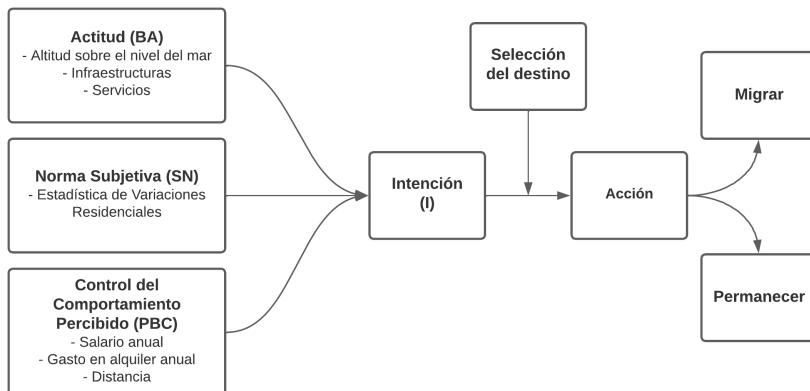


Figura 3.9: Esquema del proceso de toma de decisiones siguiendo la TPB.

### 3.5.1. Actitud

La Actitud está relacionada con la altitud sobre el nivel del mar y las distancias a infraestructuras y servicios. Por ello, se emplean los atributos  $MA_5 - MA_{14}$  de las instancias de Municipios y Atractores (Subsección 3.3.2) y los atributos  $AG_5 - AG_{14}$  de los agentes (Subsección 3.3.4).

Se define la Actitud de un agente  $i$  residente en una instancia de Municipios  $j$  hacia otra instancia de Municipios o Atractores  $j'$ , incluyendo su intención de permanecer en su emplazamiento actual ( $j = j'$ ), como:

$$BA_{i,j'} = \hat{\beta}_{i,1} \cdot mar_{j'} + \hat{\beta}_{i,2} \cdot infraestructuras_{j'} + \hat{\beta}_{i,3} \cdot servicios_{j'} \quad (3.5.1)$$

En la expresión anterior:

- $mar_{j'}$  hace referencia a la altitud sobre el nivel del mar. Si el agente  $i$  reside actualmente en el emplazamiento  $j' = j$ , entonces el valor de  $mar_{j'}$  se corresponde con la altura sobre el nivel del mar en la que el agente reside actualmente -atributo  $AG_5$ . Si se está evaluando un emplazamiento distinto a aquel en el que el agente reside ( $j \neq j'$ ), se lanza un valor aleatorio según una distribución triangular con los valores mínimo, máximo y medio del municipio evaluado -atributo  $MA_5$ .
- $infraestructuras_{j'}$  hace referencia a las distancias a infraestructuras, a saber, otro municipio de más de 10.000 habitantes, carretera nacional, autopista o estación de ferrocarril. Si se está evaluando el emplazamiento en el que el agente reside actualmente  $j = j'$ , se calcula como la media de los valores de dichas variables asignados al agente (atributos  $AG_6 - AG_9$ ). Si se está evaluando un emplazamiento distinto a aquel en el que el agente reside actualmente ( $j \neq j'$ ), para cada infraestructura, se lanza un número aleatorio según una distribución triangular con los valores mínimo, máximo y medio del destino evaluado (atributos  $MA_5 - MA_9$ ) y se calcula la media de todos ellos.
- $servicios_{j'}$  hace la referencia a las distancias a servicios, a saber, hospital, farmacia, centro educativo, centro de urgencias hospitalarias y centro de atención primaria. Tanto si se está evaluando el emplazamiento en el que el agente reside ( $j = j'$ ) como si se está evaluando cualquier otro ( $j \neq j'$ ), se calcula como la media de los atributos  $AG_{10} - AG_{14}$ .
- Para cada agente, los coeficientes  $\hat{\beta}_{i,1}, \hat{\beta}_{i,2}, \hat{\beta}_{i,3}$  son un número aleatorio que sigue una distribución uniforme en los intervalos  $[0, \beta_1], [0, \beta_2], [0, \beta_3]$  respectivamente. Los valores  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  son parámetros libres del modelo.

En la Figura 3.10, se muestra la Actitud desarrollada por los agentes de Reinosa hacia el resto de emplazamientos, incluyendo el suyo propio. Cada agente desarrolla una Actitud hacia cada emplazamiento que es cuantificada con cierto valor. En el eje horizontal, se sitúan la totalidad de los emplazamientos. En el eje vertical, para cada emplazamiento, se dibuja un boxplot que describe las Actitudes de los agentes. Dado que este componente pondera el acceso a infraestructuras y servicios, los emplazamientos más atractivos para los agentes se corresponden con Santander y Reinosa, algo que concuerda con la realidad. Por ejemplo, la Actitud mediana de los agentes de Reinosa hacia Santander es

de  $q_2 = 0,978715$  mientras que hacia Hermandad de Campoo de Suso sólo es de  $q_2 = 0,3473862$ . Figuras similares pueden generarse para comprobar la actitud de los agentes emplazados en otra instancia de Municipios y en los años considerados durante la ejecución.

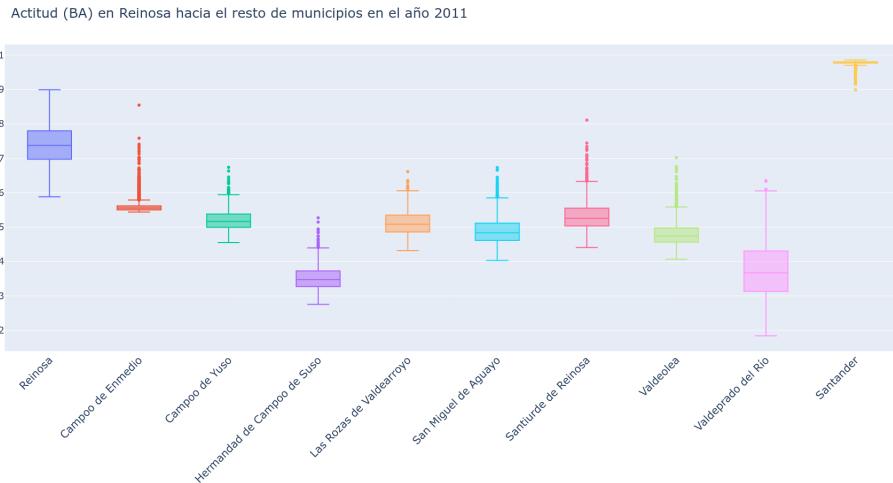


Figura 3.10: *Actitud (BA) en Reinosa hacia el resto de emplazamientos en 2011 con el conjunto de parámetros BASE (Cuadro 3.11).*

### 3.5.2. Norma Subjetiva

La definición de la Norma Subjetiva es el apartado más polémico. Existen autores que descartan este componente y aquellos que lo consideran, no explicitan la forma en la crean la red social de la gente ni qué intercambio de información se produce entre estos. Si bien, son varios los autores que definen este componente en función del historico de migraciones; o, tras linkear a cada agente con otro número indeterminado de estos -vecinos-, definen la Norma Subjetiva de cada agente como la proporción de sus vecinos que sí están dispuestos a migrar. Un debate sobre la consideración de la red social puede consultarse en los ya citados [KW16], [TSH18].

Como puede comprobarse en el Anexo III, los flujos migratorios siguen determinada curva o perfil en función del sexo y la edad [Wil10]. A partir de la Estadística de Variaciones Residenciales, podemos describir dicha curva para los movimientos migratorios que desembocan y que parten de cada municipio.

La curva de *INMigracion* representa, para cada sexo, edad y municipio, la frecuencia con la que se dan movimientos migratorios que llegan al municipio considerado y que son efectuados por agentes con el sexo y la edad determinados.

La curva de *OUTMigracion* representa, para cada sexo, edad y municipio, la frecuencia con la que se dan movimientos migratorios que parten del municipio considerado y que son efectuados por agentes con el sexo y la edad determinados.

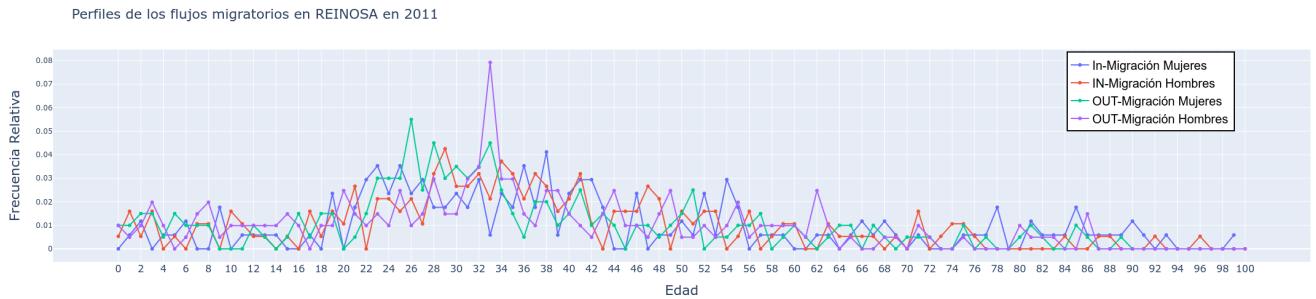


Figura 3.11: Estadística de Variaciones Residenciales en Reinosa en 2011.

Para cada agente  $i$  residente en la instancia de Municipios  $j$  se calcula su Norma Subjetiva hacia otra instancia de Municipios o Atractores  $j'$ , incluyendo su intención de permanecer en su emplazamiento actual ( $j = j'$ ), como:

$$SN_{i,j,j'} = \hat{\theta}_i \cdot (OUTMigracion_{i,j} - INMigracion_{i,j'}) \cdot 100. \quad (3.5.2)$$

En la expresión anterior:

- Si, para el sexo y la edad del agente, el valor histórico del  $OUTMigracion$  en el origen  $j$  es mayor que el valor del histórico del  $INMigracion$  en el destino  $j'$ , entonces se asume que el agente está predispuesto a desplazarse. Por tanto, se asume que el agente tendrá una Norma Subjetiva positiva.
- Si, por el contrario, para el exo y la edad del agente, el valor histórico del  $OUTMigracion$  en el origen  $j$  es mejor que el valor histórico del  $INMigracion$  en el origen  $j'$ , entonces se asume que el agente no está predispuesto a desplazarse. Por tanto, se asume que el agente tendrá una Norma Subjetiva negativa.
- Para cada agente, el coeficiente  $\hat{\theta}_i$  es un número aleatorio que sigue una distribución uniforme en el intervalo  $[0, \theta]$ . El valor  $\theta$  es un parámetro libre del modelo.

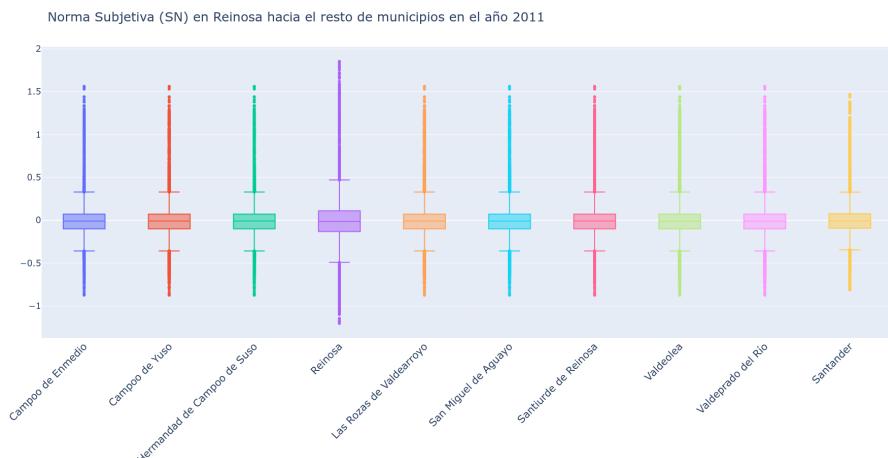


Figura 3.12: Norma Subjetiva (SN) en Reinosa hacia el resto de emplazamientos en 2011 con el conjunto de parámetros BASE (Cuadro 3.11).

En la Figura 3.12, se muestra la Norma Subjetiva desarrollada por los agentes de Reinosa hacia el resto de emplazamientos, incluyendo el suyo propio. Cada agente desarrolla una Norma Sujetiva hacia cada municipio que es cuantificada con cierto valor. En el eje horizontal, se sitúan la totalidad de los emplazamientos. En el eje vertical, para cada emplazamiento, se dibuja un boxplot que describe las Normas Subjetivas de los agentes. Figuras similares pueden generarse para comprobar la Norma Subjetiva de los agentes emplazados en otra instancia de Municipios y en los años considerados durante la ejecución.

### 3.5.3. Control del Comportamiento Percibido

El Control del Comportamiento Percibido está relacionado con las variables económicas y las barreras culturales y psicológicas que el posible desplazado debe superar. Por ello, se emplean los atributos  $MA_{15} - MA_{16}$  de las instancias de Municipios y Atractores (Subsección 3.3.2) y los atributos  $AG_{15} - AG_{16}$  de los agentes (Subsección 3.3.4).

Se define el Control del Comportamiento Percibido de un agente  $i$  residente en una instancia de Municipios  $j$  hacia otra instancia de Municipios o Atractores  $j'$ , incluyendo su intención de permanecer en su emplazamiento actual ( $j = j'$ ), como:

$$PBC_{i,j,j'} = salario_j - gasto_j \cdot (1 + \hat{\gamma} \cdot distancia_{j,j'}). \quad (3.5.3)$$

En la expresión anterior:

- $salario_j$  se corresponde con el salario anual del agente que, a su vez, es el salario medio en el emplazamiento en el que reside.
- $gasto_j$  se corresponde con el gasto anual en alquiler del agente que, a su vez, es el gasto medio anual en alquiler en el emplazamiento en el que reside.
- $distancia_{j,j'}$  se corresponde con las distancias entre el origen y el posible destino normalizadas en  $[0, 1]$ .
- Para cada agente, el coeficiente  $\hat{\gamma}_i$  es un número aleatorio que sigue una distribución uniforme en el intervalo  $[0, \gamma]$ . El valor  $\gamma$  es un parámetro libre del modelo.

En la Figura 3.13, se muestra el Control del Comportamiento Percibido desarrollado por los agentes de Reinosa hacia el resto de emplazamientos, incluyendo el suyo propio. Cada agente desarrolla un Control del Comportamiento PErcibido hacia cada emplazamiento que es cuantificado con cierto valor. En el eje horizontal, se sitúan la totalidad de los emplazamientos. En el eje vertical, para cada emplazamiento, se dibuja un boxplot que describe el Control del Comportamiento Percibido de los agentes. Dado que este componente pondera el coste de la vida, se observa que emplazamiento como Santander dejan de ser tan atractivos. Por ejemplo, el Control del Comportamiento Percibido mediano de los agentes de Reinosa hacia Santander es de  $q_2 = 0,7688466$ . Figuras similares pueden generarse para comprobar el Control del Comportamiento Percibido de los agentes emplazados en otra instancia de Municipios y en los años considerados durante la ejecución.

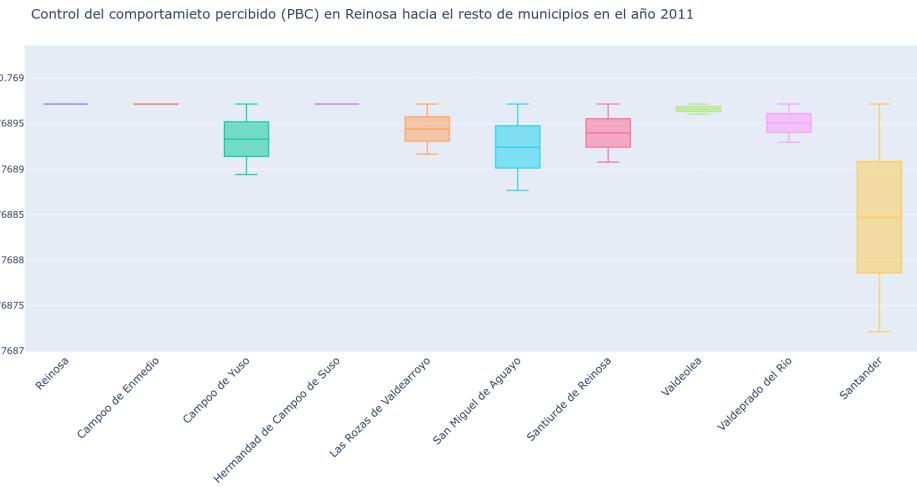


Figura 3.13: *Control del Comportamiento Percibido (PBC) en Reinosa hacia el resto de emplazamientos en 2011 con el conjunto de parámetros BASE (Cuadro 3.11)*.

### 3.5.4. Intención

Una vez calculados BA, SN y PBC, es necesario medir la Intención (I) del agente hacia la opción de migrar a otros emplazamiento o permanecer en el suyo actual. Se tratan de ponderar los tres factores mencionados para obtener una perspectiva global que los aúne.

Para cada agente  $i$  residente en el municipio  $j$  se calcula su intención de migrar a otro municipio  $j'$ , incluyendo su intención de permanecer en su emplazamiento actual ( $j = j'$ ) según la fórmula:

$$I_{i,j'} = \alpha_1 \cdot BA_{i,j'} + \alpha_2 \cdot SN_{j,j'} + \alpha_3 \cdot PBC_{i,j,j'}. \quad (3.5.4)$$

En la expresión anterior, los coeficientes  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  son parámetros libres y deben estar en el intervalo  $[0, 1]$ . Dichos valores son iguales para todos los agentes.

En la Figura 3.14, se muestra Intención desarrollada por los agentes de Reinosa hacia el resto de emplazamientos, incluyendo el suyo propio. Cada agente desarrolla una Intención hacia cada emplazamiento que es cuantificada con cierto valor. En el eje horizontal, se sitúan la totalidad de los emplazamientos. En el eje vertical, para cada emplazamiento, se dibuja un boxplot que describe la Intención de los agentes. Tras ponderar BA, SN y PBC según la ecuación 3.5.4, Santander es juzgado como el municipio más atractivo ( $q_2 = 0,005784728$ ) según los agentes de Reinosa, que evalúan su actual emplazamiento con un valor  $q_2 = 0,005231445$ . Por el contrario, Hermandad de Campo de Suso ( $q_2 = 0,004376119$ ) y Valdeprado del Río ( $q_2 = 0,00442321$ ) son los emplazamientos menos atractivos para los agentes de Reinosa. Figuras similares pueden generarse para comprobar el Control del Comportamiento Percibido de los agentes emplazados en otra instancia de Municipios y en los años considerados durante la ejecución.

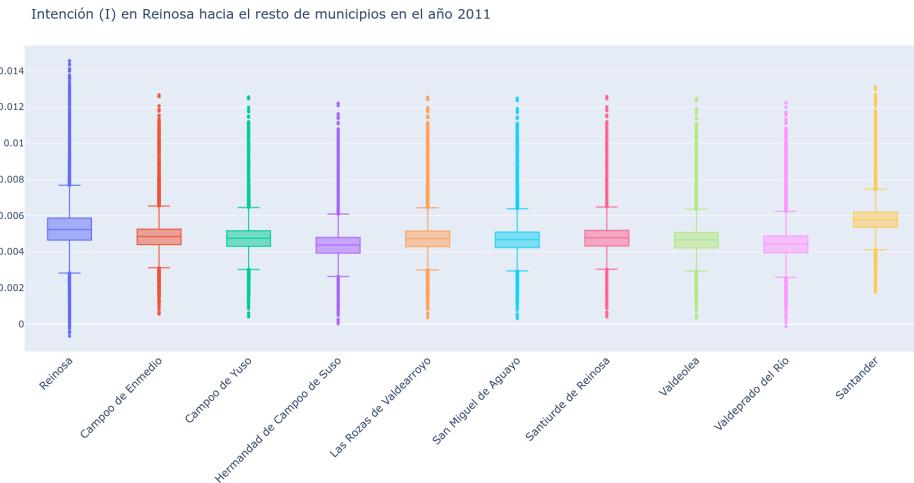


Figura 3.14: *Intención (I) en Reinosa hacia el resto de emplazamientos en 2011 con el conjunto de parámetros BASE (Cuadro 3.11).*

### 3.5.5. De la Intención a la Acción

Tal y como se ha indicado anteriormente, la decisión de migrar se toma en consideraciones de incertidumbre. Por tanto, hemos de considerar cierta mecánica que pretenda simular el azar.

Como se comprobará en la Sección 3.8, las unidades de decisión serán las instancias de Familias con Niños y de Familias Unipersonales. Ambas seguirán un proceso similar al siguiente. Supongamos que se han calculado las intenciones de la unidad de decisión de mirar a los posibles destinos y la intención de permanecer en su emplazamiento actual, es decir, cada posible destino tiene asociada una intención. Los posibles destinos se ordenan según un ranking de mayor a menor en función del valor de la intención que tienen asociado. Se consideran los destinos hacia los que se desarrolla una intención superior o igual a la desarrollada hacia el municipio de residencia actual. Supongamos que cierta unidad de decisión  $i$  residente en  $j_0$  ha considerado las intenciones hacia  $j_0, j_1, j_2, j_3$ . Asumamos que  $I_{i,j_0,j_1} > I_{i,j_0,j_3} > I_{i,j_0,j_0} > I_{i,j_0,j_2}$ . Por tanto, la unidad de decisión sólo considera como opciones: o bien migrar al municipio  $j_1$ ; o bien migrar al municipio  $j_3$ ; o bien permanecer en su municipio actual  $j_0$ . A continuación se lanza un número aleatorio  $rn$  según una uniforma en  $[0,1]$ . Si  $rn > I_{i,j_0,j_1}$ , entonces la unidad de decisión migra. Si no, se consulta el siguiente en el ranking: Si  $rn > I_{i,j_0,j_3}$ , entonces la unidad de decisión migra. Si no, permanece en el municipio. El proceso sería similar si hubiese más posibles destinos.

## 3.6. Parámetros libres y datos de entrada

Teniendo en cuenta las ecuaciones descritas en la Sección 3.5, los parámetros libres del modelo son:

Parámetro	Descripción	Ecuación
$\beta_1$	Coeficientes de altitud sobre el nivel del mar	3.5.1
$\beta_2$	Coeficientes de distancia a infraestructuras	3.5.1
$\beta_3$	Coeficientes de distancia a servicios	3.5.1
$\gamma$	Coeficientes de creencias normativas	3.5.2
$\theta$	Coeficiente de distancia geodésica entre emplazamientos	3.5.3
$\alpha_1$	Coeficiente de BA en I	3.5.4
$\alpha_2$	Coeficiente de SN en I	3.5.4
$\alpha_3$	Coeficiente de PBC en I	3.5.4

Cuadro 3.10: Parámetros libres del modelo.

Como datos de entrada, han de explicitarse:

- Modelo de natalidad (Sección 3.4). Se dispone de un modelo de redes neuronales, un modelo de regresión lineal y un modelo de vecinos cercanos.
- Modelo de mortalidad (Sección 3.4). Se dispone de un modelo de redes neuronales, un modelo de regresión lineal y un modelo de vecinos cercanos.

A nivel municipal, también han de pasarse como inputs los siguientes datasets:

■ Sobre Municipios:

- Dataset sobre el histórico de las dinámicas vegetativas; el histórico de la dinámica migratoria; y la estructura demográfica desagregada por quinquenios y sexo en 2010.
- Dataset sobre datos de familias y hogares.
- Dataset sobre las distancias a infraestructuras y servicios.<sup>1</sup>
- Dataset sobre las variables económicas de ingresos anuale y gasto anual en alquiler<sup>1</sup>
- Dado que, en todos los datasets mencionados, cada fila se corresponde con la información de un municipio real, es imprescindible que todos estén unívocamente identificados [Est22f]. A parte, pueden contener elementos identificativos tales como el nombre o la provincia a la que el municipio pertenece.

■ Sobre Atractores:

- Dataset sobre features<sup>1</sup>.
- Dataset sobre economía<sup>1</sup>.
- Dado que, en todos los datasets mencionados, cada fila se corresponde con la información de un municipio real, es imprescindible que todos estén unívocamente identificados [Est22f]. A parte, pueden contener elementos identificativos tales como el nombre o la provincia a la que el municipio pertenece.

<sup>1</sup> Se aconseja que los datos estén normalizados en un preprocesado previo según las indicaciones descritas en la Sección 3.3. Si bien, el modelo puede ejecutarse con escasas modificaciones introduciendo los datos en bruto.

- Dataset sobre distancias. A pesar de que las instancias de Municipios y Atractores poseen como atributos su latitud y longitud, a partir de las cuales puede hallarse la distancia geodésica entre pares de emplazamientos, se ha optado por calcular previamente las distancias geodésicas entre todos los emplazamientos del dominio y normalizarlas en el intervalo  $[0, 1]$ . Para cada emplazamiento, la menor distancia a otra localización - correspondiente a la distancia a sí mismo- se transforma en 0 y la mayor, en 1.

### 3.7. Inicialización

Tras la lectura de los datos de entrada, se recurre a los métodos de la clase Universo (Subsección 3.3.1) para generar todos los elementos necesarios.

Primero, se construyen las instancias de la clase Municipios. Se emplean los datos de entrada para detallar los atributos de cada instancia (Subsección 3.3.2).

Segundo, se construyen las intancias de la clase Atractores. Se emplean los datos de entrada para detallar los atributos de cada instancia (Subsección 3.3.2).

Tercero, se construyen todos los agentes (Subsección 3.3.4). Para ello, se recurre a los datos de entrada sobre la estructura demográfica desagregada por sexo y quinquenios de edad de cada municipio. Si, por ejemplo, en Reinosa hay 25 mujeres de entre 20 y 24 años, entonces se crean 25 agentes de sexo femenino cuya edad está dada por un entero aleatorio dentro del intervalo  $[20, 24]$  y se emplazan en Reinosa. Para el último quinquenio correspondiente a más de 100 años de edad, se asigna un entero aleatorio en el intervalo  $[100, 110]$ . Además, se recurre a los atributos  $MA_5 - MA_{16}$  de la instancia de Municipios -creadas previamente- donde el agente es emplazado para así poder caracterizarlo con sus atributos  $AG_5 - AG_{16}$ . También, se le asignan sus roles familiares  $AG_{19}, AG_{20}$  y, por defecto en la inicialización, todos los agentes se consideran libres.

Cuarto, se construyen las unidades familiares de cada instancia de Municipios. En los datos de entrada, se dispone del número de familias de 3, 4 y 5 personal en el año 2011, de modo que, puesto que estamos inicializando con datos desagregados por quinquenios y sexo en 2010, se asume que el número de familias debe ser similar. Dado que se ha optado por simplificar la estructura familiar siguiendo el sentido más tradicional del concepto, una instancia de Familias con Niños estará obligatoriamente formada por un padre -agente masculino en condiciones de ser progenitor-, una madre -agente femenino en condiciones de ser progenitor- y un hijo -agente masculino o femenino menor de 18 años-; la estructura para unidades familiares de 4 y 5 agentes es análoga pero considerando 2 y 3 hijos respectivamente. Cada instancia de Familias Unipersonales están constituidas por un agente que no ha sido incluido en ninguna instancia de Familias con Niños.

### 3.8. Actualización

El proceso de actualización que tiene lugar con cada iteración del modelo completo es el siguiente:

1. Para cada instancia de Municipios:

- 1.1. Actualización por causas vegetativas.

- 1.1.1. Fallecimientos.

El modelo de mortalidad es invocado al final de cada iteración de actualización [3.], pero es al inicio cuando se producen los fallecimientos que dicta. Este devuelve el número de agentes que deben fallecer, es decir, ser eliminados del emplazamiento en el que residen y, por tanto, en el Universo. No se dispone de tasas de mortalidad desagregadas por quinquenios o sexo, luego si el modelo de mortalidad indica que deben fallecer  $n$  agentes, entonces se eliminan los  $n$  agentes más veteranos del emplazamiento considerado. Esto puede generar desajustes en la cúspide de la pirámide poblacional.

- 1.1.2. Edades.

Para cada agente del emplazamiento considerado, se actualiza su edad sumándole un año. Además, se actualiza su rol familiar mediante los atributos  $AG_{18}$ ,  $AG_{19}$  (Subsección 3.3.4).

- 1.1.3. Disolución de familias.

Dado que hemos actualizado las edades, es posible que, en ciertas instancias de Familias con Niños, todos los hijos hayan pasado a ser mayores de edad, en cuyo caso, la familia se disuelve pasando todos sus agentes a formar instancias de Familias Unipersonales en su actual emplazamiento. Es decir, se actualiza el atributo  $AG_{17}$  (Subsección 3.3.4).

- 1.1.4. Nacimientos y unidades familiares.

El modelo de natalidad es invocado al final de cada iteración de actualización [3.], pero es al inicio cuando se producen los nacimientos que dicta. Este devuelve el número de agentes que deben nacer, es decir, ser introducidos en el emplazamiento considerado y, por tanto, en el Universo. Se crean tantos agentes como haya sido indicado y se les asignan todos sus atributos. Puede parecer extraño que un menor tenga un sueldo y un gasto en alquiler asignados, pero por motivos técnicos se ha decidido así.

Al haber nuevos menores, es necesario que sean parte de una familia. En primer lugar, se recorren las instancias de Familias con Niños y, si hay hueco para otro menor -la longitud de la lista  $FN_6$  en menor que el límite  $FN_7$  (Subsección 3.3.3)-, este es añadido a instancia como hijo. En caso de no existir instancias de Familias con Niños con hueco para otro menor, se busca entre los agentes libres susceptibles de ser progenitores y se emparejan un agente femenino y un agente masculino cuya diferencia de edad sea de  $\pm 5$  años como progenitores del recién nacido.

Cabe la posibilidad de que tampoco se encuentre una pareja de progenitores con la condición indicada anteriormente, en cuyo caso se elimina el requisito de la edad. Si tampoco se encontrase una pareja así, el niño quedaría sin progenitor y sería un agente a pleno efecto. Esto puede resultar contradictorio con los párrafos

anteriores en los que se explicita que un menor no tiene capacidad propia de decisión, por ello, como trabajo futuro se plantean alternativas como que pueda añadirse a una instancia de Familia con Niños aunque esta haya superado el límite de hijos o que pueda ser eliminado como si de un agente fallecido se tratase.

#### 1.2. Actualización por causas migratorias.

##### 1.2.1. Teoría del Comportamiento Planeado (Subsecciones 2.2.3, Sección .)

Para cada agente del emplazamiento considerado, se calcula su Actitud (Subsección 3.5.1), Norma Subjetiva (Subsección 3.5.2), Control del Comportamiento Percibido (Subsección 3.5.3) e Intención (Subsección 3.5.4).

##### 1.2.2. Familias con Niños.

Se recorre cada instancia de Familias con Niños en el emplazamiento considerado. Durante el apartado anterior, se ha calculado la Intención de todos los miembros de la unidad familiar -tanto de los agentes que actúan como progenitores como la de los que actuán como hijos- de desplazarse a otro emplazamiento o permanecer en el actual. Para obtener la Intención final de toda la unidad familiar, se hace la media de la Intención de todos miembros hacia cada uno de los emplazamientos posibles. Una vez obtenida dicha Intención familiar, se lleva a cabo el proceso detallado en la Subsección 3.5.5. En caso de que la unidad familiar migre, se actualiza su atributo  $FN_7$  para que no puede volver a migrar durante la presente iteración. El movimiento queda registrado en un archivo de tipo csv en el que se anota el origen, el destino, la fecha y el número de agentes desplazados -en este caso, el número de integrantes de la unidad familiar-.

##### 1.2.3. Familias Unipersonales.

Dado que las instancias de Familias Unipersonales están compuestas por un único agente, se emplea la Intención de este como Intención de la totalidad de la unidad familiar. En caso de que la unidad familiar -el agente- migre, se actualiza su atributo  $FN_7$  para que no puede volver a migrar durante la presente iteración. El movimiento queda registrado en un archivo de tipo csv en el que se anota el origen, el destino, la fecha y el número de agentes desplazados -en este caso, siempre 1-.

#### 3. Para cada instancia de Municipios:

##### 3.1. Invocación de los modelos de mortalidad y natalidad.

Una vez producidas todas las actualizaciones debidas a las dinámicas vegetativas y migratorias, se invoca a los modelos de mortalidad y natalidad para conocer, respectivamente, el número de fallecimientos y nacimientos que deben producirse en el emplazamiento considerado al inicio de la siguiente iteración [1.1.1., 1.1.4.].

#### 4. Para cada instancia de Municipios:

#### 4.1. Atributos $FN_7$ , $FU_3$ (Subsección 3.3.3)

En el emplazamiento considerado, se recorren todas las instancias de Familias Con Niños para actualizar su atributo  $FN_7$  para que pueda migrar durante la siguiente iteración.

### 3.9. Calibración

La finalidad última de cualquier modelo de Machine Learning es predecir la variable respuesta en observaciones futuras o en observaciones que el modelo no ha visto antes. Los métodos de validación son estrategias que permiten estimar la capacidad predictiva de los modelos cuando se aplican a nuevas observaciones, haciendo uso únicamente de los datos de entrenamiento. La idea en la que se basan todos ellos es la siguiente: el modelo se ajusta empleando un subconjunto del total observaciones y se evalúa, mediante ciertas métricas, en el restante. Es el principio empleado en la creación de los modelos de natalidad y mortalidad (Sección 3.4).

Desafortunadamente, no ha sido posible una calibración adecuada del ABM propuesto por cuestiones de tiempo. Si bien, se han asentado las bases para este proceso de calibración haciendo uso de la librería *statsmodel* de Python [SP10].

Dado que en el problema del despoblamiento intervienen tanto variables vegetativas como migratorias, lo más adecuado sería comparar la población real observada de cada municipio con las predicciones del número de habitantes de su representación virtual.

Dado que en el problema del despoblamiento intervienen tanto variables vegetativas como migratorias, lo más adecuado es comparar las predicciones de población dadas por el ABM para cada año y cada instancia de Municipios con la población real del municipio real al que representan. El periodo de train es el comprendido en los años 2010 – 2021.

### 3.10. Resultados: educated guess

A pesar de no haber tenido tiempo para realizar una correcta calibración, sí se han obtenido resultados empleando un conjunto de parámetros basado en las principales referencias consultadas, en concreto [Ngu+18], [Ngu20].

Además, en este tipo de modelos puede realizarse un análisis de sensibilidad desde dos perspectivas diferentes:

- Variando los parámetros libres del Cuadro 3.10.
- Modificando las variables que definen los componentes de la Teoría del Comportamiento Planeado (Subsección 2.2.3, Sección 3.5), es decir, planteando escenarios de tipo *what if ... ?* Podría plantearse, por ejemplo, qué ocurriría si se suben los sueldos en determinado municipio o se construye un hospital en sus inmediaciones y comprobar cómo influye en la dinámica poblacional.

Parámetro	BASE: $\alpha_1$	DOBLE: $2\alpha_1$	MITAD: $\frac{1}{2}\alpha_1$
$\beta_1$	0.40848788491878807	0.40848788491878807	0.40848788491878807
$\beta_2$	0.02758170121289083	0.02758170121289083	0.02758170121289083
$\beta_3$	0.4398889209246927	0.4398889209246927	0.4398889209246927
$\gamma$	0.65	0.65	0.65
$\theta$	0.65	0.65	0.65
$\alpha_1$	0.002211	0.004422	0.0011055
$\alpha_2$	0.004979	0.004979	0.004979
$\alpha_3$	0.004753	0.004753	0.004753

Cuadro 3.11: Conjuntos de parámetros libres para el educated guess.

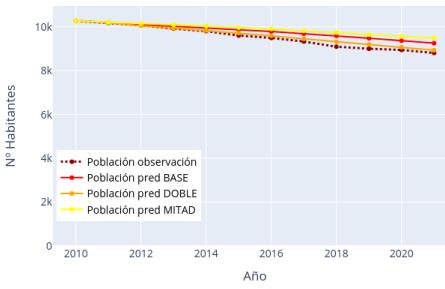
Supongamos que queremos aplicar el modelo a la comarca Campoo-Los Valles (Fig. 3.1) compuesta por los municipios de Campoo de Enmedio, Campoo de Yuso, Hermandad de Campoo de Suso, Las rozas de Valdearroyo, Pesquera, Reinosa, San Miguel De Aguayo, Santiurde de Reinosa, Valdeolea, Valdeprado del Río y Valderredible. Por falta de datos, se prescinde de Pesquera y Valderredible. Cada uno de estos municipios tendrá su representación virtual como instancia de la clase Municipios. Además, consideraremos el municipio de Santander como gran núcleo urbano que, en la representación virtual, será la única instancia de la clase Atactores.

Como modelo de natalidad, empleamos la red neuronal y como modelo de mortalidad, la regresión lineal (Sección 3.4). Empleamos los tres conjuntos de parámetros mostrados en el Cuadro 3.11, donde hemos duplicado y dividido a la mitad el coeficiente  $\alpha_1$  (Eq. 3.5.1) para realizar un análisis de sensibilidad.

A pesar de que en el Anexo IV se muestran los resultados para todos los municipios considerados, en la presente sección nos centraremos en Reinosa.

Inicializamos la ejecución en el año 2010 y realizamos 11 iteraciones, llegando hasta el año 2021.

Comparación de POBLACIÓN en Reinosa



Comparación de POBLACIÓN en Reinosa

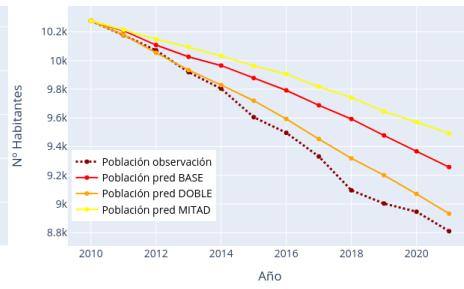


Figura 3.15: Eje vertical desde 0.

Figura 3.16: Zoom sobre el eje vertical.

Figura 3.17: Comparación del número de habitantes en Reinosa. 2010 – 2021.

En primer lugar, comparamos la población real observada durante dicho periodo y la predicha por el modelo con los tres conjuntos de parámetros del Cuadro 3.11. En la Figura 3.17 se observa la población observada mediante una línea discontinua, la predicción con el conjunto BASE de parámetros en rojo; con el conjunto DOBLE resultante de hacer  $2\alpha_1$  en naranja; con el conjunto MITAD de hacer  $0.5\alpha_1$  en amarillo. Al duplicar  $\alpha_1$  estamos haciendo que los agentes den más importancia a los servicios e infraestructuras, de modo que conseguimos que el atractor Santander resulte mucho más atractivo que el resto de instancias de Municipios y, por tanto, aumenten las migraciones hacia él. Por ello, vemos que la línea naranja marca menos población que la roja y, por supuesto, que la amarilla ya que al disminuir  $\alpha_1$  hacemos que los agentes no le otorguen tanta importancia a los servicios e infraestructuras y, por tanto, se iguale más el atractivo relativo a estas variables de todos los posibles emplazamientos.

Una de las variables que forma parte del concepto de despoblamiento es el saldo vegetativo, es decir, la diferencia entre el número nacimientos y defunciones. En la Figura 4.59, se muestra el número de nacimientos, defunciones y el consecuente saldo vegetativo en Reinosa para los tres conjuntos de parámetros del Cuadro 3.11. Se observa que la natalidad ha sido sobreestimada y que la mortalidad ha sido subestimada, lo cual se manifiesta en un saldo vegetativo superior al observado.

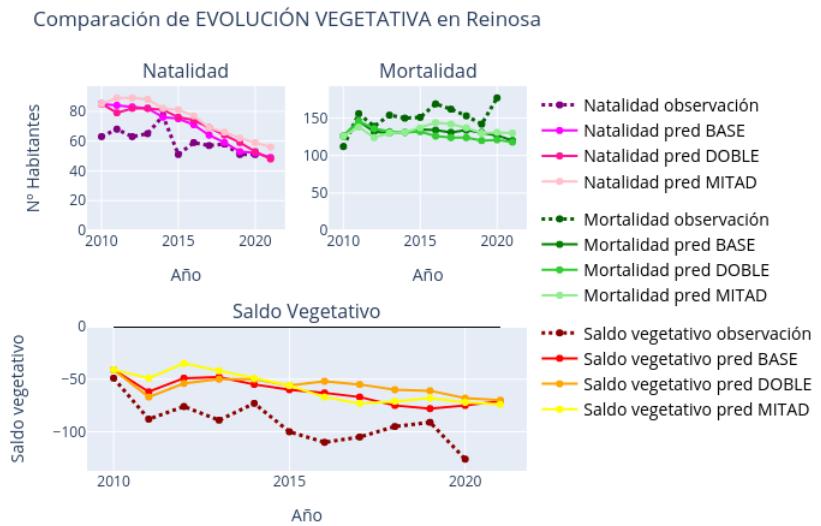


Figura 3.18: Comparación de la evolución vegetativa en Reinosa. 2010 – 2021.

En la definición del concepto de despoblamiento es fundamental el saldo migratorio, es decir, la diferencia entre el número de altas y bajas en el municipio. Si es negativo, indica que hay más gente que hay más bajas que altas, luego más gente que ha optado por abandonar el municipio: si es positivo, que han llegado más migrantes de los que se han marchado. En la Figura 3.19, se muestra el número de altas, bajas y el consecuente saldo migratorio en Reinosa para los

tres conjuntos de parámetros del Cuadro 3.11).

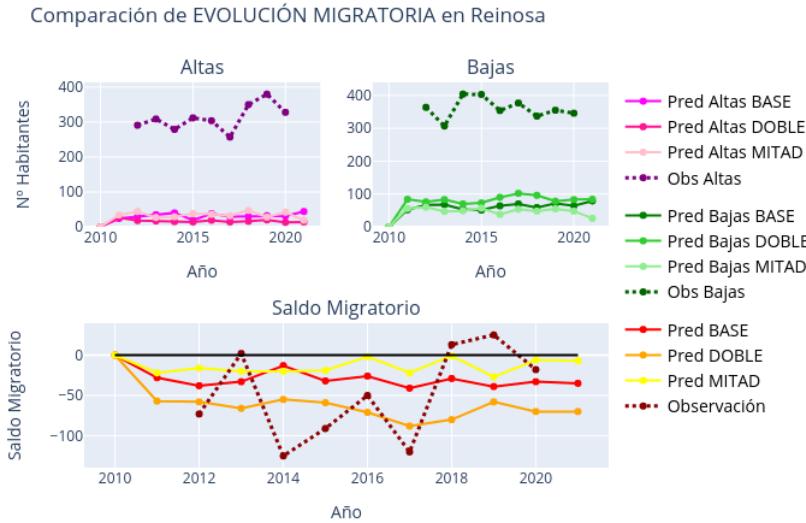


Figura 3.19: Comparación de la evolución migratoria en Reinosa. 2010 – 2021.

Puede observarse que el número de altas y bajas observado es mucho mayor que el predicho por el modelo con independencia del conjunto de parámetros considerado. Se debe a que, en el mundo real, los habitantes de un municipio pueden desplazarse hacia un número indefinido de posibles destinos y, del mismo modo, al municipio pueden llegar individuos procedentes de múltiples orígenes. En el mundo real, puede decirse que el dominio es abierto. Sin embargo, en la simulación, el dominio es cerrado en el sentido de que los desplazamientos sólo pueden realizarse entre un número determinado de emplazamientos. Por ejemplo, en el modelo, a Reinosa sólo pueden llegar agentes procedentes de Campoo de Enmedio, Campoo de Yuso, Hermandad de Campoo de Suso, Las Rozas de Valdearroyo, San Miguel de Aguayo, Santiurde de Reinosa, Valdeolea y Valdeprado del Río. Además, los agentes de Reinosa sólo pueden desplazarse hasta Campoo de Enmedio, Campoo de Yuso, Hermandad de Campoo de Suso, Las Rozas de Valdearroyo, San Miguel de Aguayo, Santiurde de Reinosa, Valdeolea, Valdeprado del Río y Santander. Pero, en el mundo real, el dominio no está limitado. Por ello, hemos de fijarnos no en el número absoluto de altas y bajas sino en el saldo migratorio. Observamos que las predicciones no distan en demasiado del observado.

Pero no sólo necesitamos saber el número de migrantes sino los orígenes y destinos. Durante la ejecución del modelo, se escriben todos los movimientos migratorios en un archivo de tipo csv registrando el origen, el destino y el número de desplazados. Para representar los movimientos, se ha desarrollado un grafo dirigido interactivo. En la Figura 3.20, se muestra una captura de pantalla para el grafo que representa los flujos migratorios producidos con el conjunto de parámetros BASE (Cuadro 3.11). En la esquina superior izquierda, se muestra

una barra que permite seleccionar el año de consulta. En la esquina inferior izquierda, se muestra un cuadro de texto que permite seleccionar el municipios. En el grafos, cada nodo se corresponde con una instancia de Municipios o de Atractores. Cada nodo puede seleccionarse para obtener más información sobre el emplazamiento. Los arcos dirigidos muestran, con su anchura, la intensidad del flujo migratorio desde el origen al destino. Cada arco puede seleccionarse para obtener más información sobre el emplazamiento.

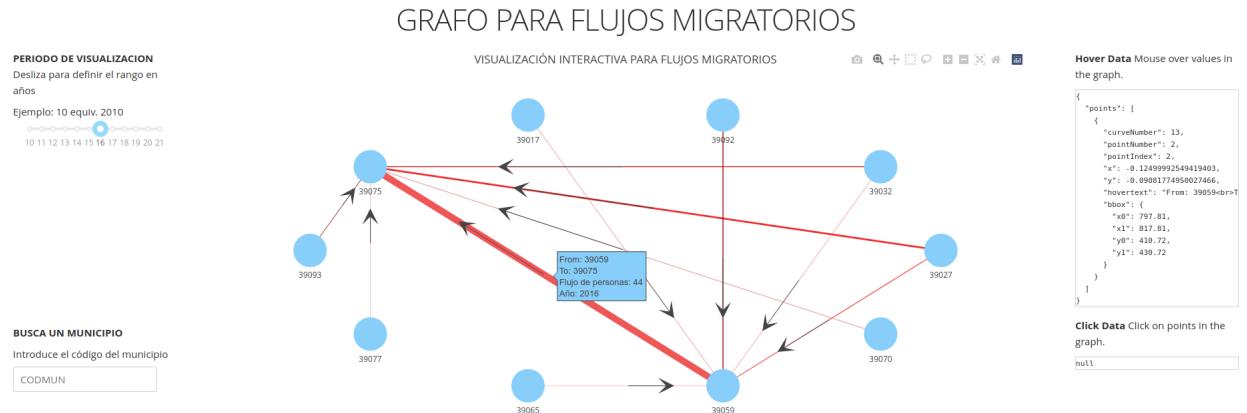


Figura 3.20: Grafo dirigido interactivo para mostrar los flujos migratorios. Se muestran los movimientos producidos en el año 2016 con el conjunto de parámetros BASE (Cuadro 3.11).

También nos interesa conocer la estructura de población, es decir, su distribución según sexo y quinquenios de edad. En la Figura 3.21, la pirámide poblacional observada en 2021 y las predichas, para ese mismo año, por los tres conjuntos de parámetros del Cuadro 3.11. En la parte superior, correspondiente a los quinquenios de edad más avanzados, pueden observarse las consecuencias de hacer que fallezcan, por defecto, los agentes más veteranos del municipio (Sección 3.8).

Comparación de PIRÁMIDE POBLACIONAL de Reinosa en 2021



Figura 3.21: Comparación de la pirámide poblacional en Reinosa en 2021.

## Capítulo 4

# Conclusiones y trabajo futuro

Durante el desarrollo de esta memoria, han surgido diversas cuestiones y conclusiones que pueden resultar interesantes de cara a un futuro trabajo. Algunas de ellas están relacionadas con el aspecto demográfico y otras, con el desarrollo técnico. Comenzamos con las relativas al fenómeno del despoblamiento:

- El doble despoblamiento de Cantabria.

A día de hoy, existen dos tipos de despoblamiento en Cantabria: el relativo a los núcleos de montaña y valles interiores; y el de los núcleos urbanos.

El primero responde a un proceso histórico iniciado en el siglo XIX y que parece difícil de revertir. Los municipios de esta clase comparten el gran envejecimiento, el aislamiento económico y el declive económico.

En cuanto a la pérdida de población de las ciudades tradicionales, no puede entenderse sin el aumento de la movilidad. Los centros urbanos experimentan un decrecimiento de población y, al mismo tiempo, sus espacios limítrofes y periurbanos aumentan sus habitantes propiciando el *efecto donut*. Entre las consecuencias de este fenómeno destaca el envejecimiento y la reducción de la población joven en los centros urbanos.

- Despoblamiento y pérdida de patrimonio en Cantabria.

El fenómeno del despoblamiento no sólo implica cambios sociales y económicos sino que también afecta en los ámbitos patrimonial y ecológico.

El despoblamiento y el envejecimiento de la población también se traducen en la pérdida de patrimonio tanto material como inmaterial. La desaparición no es sólo física sino que supone también una pérdida de la historia de la región y de su memoria. El vaciamiento del territorio conlleva el abandono y expolio del patrimonio histórico y artístico.

Además, la desaparición de actividades agrícolas y ganaderas transforma el paisaje y favorece la colonización descontrolada del territorio natural por parte de especies animales y vegetales no autóctonas. Especialmente grave es el problema de la propagación de incendios debido a la desagrarización y el abandono de la ganadería extensiva.

Por ello, para conservar estos bienes patrimoniales, tanto materiales como inmateriales, y que no se conviertan más que en piedra y olvido, es necesario poner de relieve los recursos de la región y hacer frente al problema del despoblamiento de forma efectiva.

Algunas de las cuestiones relativas al aspecto técnico son las siguientes:

- Calibración y análisis de sensibilidad.

Como se ha indicado en la Sección 3.9, no ha sido posible calibrar el modelo por falta de tiempo. Por ello, el principal trabajo a futuro pasa por ajustar los parámetros libres.

Tras esto, sería de especial interés realizar una análisis de sensibilidad modificando los parámetros obtenidos y planteando escenarios de tipo *what if...?* para comprobar la influencia de cada una de las variables incluidas en el proceso de toma de decisiones de los agentes.

- Disponibilidad de datos.

Como puede comprobarse en el Anexo III, es evidente la falta de homogeneidad espacial y temporal de los datos. Por ello, establecer el municipio como unidad básica y delimitar un periodo temporal facilitaría el preprocesado de datos.

Además, sería recomendable recoger datos que cuantifiquen las percepciones subjetivas de los individuos. Dentro de la Estadística Experimental de INE, la sección Indicadores Multidimensionales de Calidad de Vida muestra cómo los individuos ponderan los siguientes indicadores: condiciones materiales de vida, trabajo, salud, educación, ocio y relaciones sociales, seguridad física y personal, gobernanza y derechos básicos, entorno y medioambiente, experiencia general de la vida. Si bien, los datos están a nivel autonómico. Obtenerlos a nivel municipal quizás entraría en conflicto con cuestiones de provacidad y anonimato pero se trata de datos con mucho potencial.

- Estandarización y referencias.

Aunque el Protocolo ODD+ [Gri+10] aspira a ser un estándar en la descripción de ABMs, no siempre se siguen sus directrices en la literatura. Tampoco hemos sido capaces de encontrar ejemplos de ABMs en código abierto. Por ello, buscar la estandarización y la compartición de los desarrollos favorecería los Principios FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability and Reuse) que tan importantes son en disciplinas como la Ciencia de Datos.

- Modelos Basados en Agentes a nivel estatal.

Varios países han desarrollado Modelos Basados en Agentes para estudiar las dinámicas de la población y el impacto de sus políticas públicas. Algunos de dichos modelos son DYNASIM (Estados Unidos), DYNACAN (Canadá), MOSART (Noruega), SAGE (Reino Unido), DYNAMOND (Australia) y DESTINIE (Francia). Una discusión comparativa entre todos ellos puede consultarse en [Mor+10].

# Bibliografía

- [AF80] Icek Azjen y Martin Fishbein. «Understanding attitudes and predicting social behavior». En: *Englewood cliffs* (1980) (vid. pág. 13).
- [ÁI20] Pablo Martínez Ruiz del Árbol y Lara Lloret Iglesias. «Comparison of epidemic control strategies using agent-based simulations». En: *medRxiv* (2020).
- [Ajz91] Icek Ajzen. «The theory of planned behavior». En: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50.2 (1991). Theories of Cognitive Self-Regulation, págs. 179-211. ISSN: 0749-5978. DOI: [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/074959789190020T> (vid. pág. 13).
- [Alb+01] Dolores Albarracin y col. «Theories of reasoned action and planned behavior as models of condom use: a meta-analysis.» En: *Psychological bulletin* 127.1 (2001), pág. 142 (vid. pág. 13).
- [Asu22] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. *Zonas Blancas y Grises NGA*. 2022. URL: <https://avancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/zonas-blancas-NGA/Paginas/Index.aspx> (vid. pág. 62).
- [Bae+16] Jang Won Bae y col. «Combining microsimulation and agent-based model for micro-level population dynamics». En: *Procedia Computer Science* 80 (2016), págs. 507-517.
- [Ber99] Thomas J Berndt. «Friends' influence on students' adjustment to school». En: *Educational psychologist* 34.1 (1999), págs. 15-28 (vid. pág. 13).
- [Bot+22] Diego M. Botín-Sanabria y col. «Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review». En: *Remote Sensing* 14.6 (mar. de 2022), pág. 1335. ISSN: 2072-4292. DOI: <10.3390/rs14061335>. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/rs14061335>.
- [Can22] Gobierno de Cantabria. *Propuesta de Delimitación Comarcal de Cantabria*. 2022. URL: [https://www.ondacero.es/emisoras/cantabria/noticias/asi-primer-a-propuesta-delimitacion-comarcal-cantabria-presentada-gobierno\\_2022012761f25dd26902180001c5ff27.html](https://www.ondacero.es/emisoras/cantabria/noticias/asi-primer-a-propuesta-delimitacion-comarcal-cantabria-presentada-gobierno_2022012761f25dd26902180001c5ff27.html) (vid. pág. 63).

- [Ces+15] Andrea Ceschi y col. «A simulation of householders' recycling attitudes based on the theory of planned behavior». En: *Trends in practical applications of agents, multi-agent systems and sustainability* (2015), págs. 177-184 (vid. pág. 13).
- [Cha03] Edmund Chattoe. «The role of agent-based modelling in demographic explanation». En: *Agent-Based Computational Demography*. Springer, 2003, págs. 41-54 (vid. pág. 15).
- [CK03] George B Cunningham y Hyungil Kwon. «The theory of planned behaviour and intentions to attend a sport event». En: *Sport Management Review* 6.2 (2003), págs. 127-145 (vid. págs. 13, 16).
- [Col86] James S Coleman. «Social theory, social research, and a theory of action». En: *American journal of Sociology* 91.6 (1986), págs. 1309-1335 (vid. pág. 11).
- [Cov22] Corine Land Cover. *Usos de Suelo. Taxonomía*. 2022. URL: [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/ES:WikiProject\\_Corine\\_Land\\_Cover/Tagging\\_scheme](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/ES:WikiProject_Corine_Land_Cover/Tagging_scheme) (vid. pág. 70).
- [CV19] Olga de Cos Guerra y Pedro Reques Velasco. «Vulnerabilidad territorial y demográfica en España: posibilidades del análisis multicriterio y la lógica difusa para la definición de patrones espaciales». En: *Investigaciones Regionales= Journal of Regional Research* 45 (2019), págs. 201-225 (vid. pág. 61).
- [Del16] Sergio Del Molino. *La España vacía*. TURNER, 2016 (vid. pág. 1).
- [Est22a] Instituto Nacional de Estadística. *Estadística de Variaciones Residenciales*. 2022. URL: [https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica\\_C&cid=1254736177013&menu=ultiDatos&idp=1254734710990](https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177013&menu=ultiDatos&idp=1254734710990) (vid. págs. 14, 62, 67).
- [Est22b] Instituto Nacional de Estadística. *Estadística del Padrón Continuo*. 2022. URL: [https://www.ine.es/prensa/padron\\_prensa.htm](https://www.ine.es/prensa/padron_prensa.htm) (vid. pág. 3).
- [Est22c] Instituto Nacional de Estadística. *Estadística Experimental*. 2022. URL: <https://www.ine.es/experimental/experimental.htm> (vid. pág. 62).
- [Est22d] Instituto Nacional de Estadística. *Glosario de Conceptos*. 2022. URL: <https://www.ine.es/DEFIne/?L=0> (vid. pág. 61).
- [Est22e] Instituto Nacional de Estadística. *INEbase. Lista Completa de operaciones*. 2022. URL: <https://www.ine.es/dyngs/INEbase/listaoperaciones.htm> (vid. pág. 62).
- [Est22f] Instituto Nacional de Estadística. *Relación de municipios y sus códigos por provincias. Últimos datos*. 2022. URL: <https://www.ine.es/daco/daco42/codmun/codmunmapa.htm> (vid. págs. 20, 36).
- [Far22] Colegio Oficial de Farmacéuticos en Cantabria. *Farmacias en Cantabria*. 2022. URL: <https://www.cofcantabria.org/Entidades/Listado.aspx?IdMenu=df34e502-507b-494f-a119-68244e4a5d9&Idioma=es-ES> (vid. pág. 69).

- [FO89] A Stewart Fotheringham y Morton E O'Kelly. *Spatial interaction models: formulations and applications*. Vol. 1. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 1989 (vid. pág. 59).
- [Gar70] Martin Gardner. «The Fantastic Combinations of Jhon Conway's New Solitaire Game'Life». En: *Sc. Am.* 223 (1970), págs. 20-123 (vid. pág. 5).
- [Gri+10] Volker Grimm y col. «The ODD protocol: a review and first update». En: *Ecological modelling* 221.23 (2010), págs. 2760-2768 (vid. págs. 17, 46).
- [GV17] André Grow y Jan Van Bavel. *Agent-Based Modelling in Population Studies*. Springer, 2017.
- [HCB01] Martin S Hagger, Nikos Chatzisarantis y Stuart JH Biddle. «The influence of self-efficacy and past behaviour on the physical activity intentions of young people». En: *Journal of sports sciences* 19.9 (2001), págs. 711-725 (vid. pág. 13).
- [Hom58] George C Homans. «Social behavior as exchange». En: *American journal of sociology* 63.6 (1958), págs. 597-606 (vid. pág. 11).
- [KI06] Lars Kolvereid y Espen Isaksen. «New business start-up and subsequent entry into self-employment». En: *Journal of business venturing* 21.6 (2006), págs. 866-885 (vid. pág. 13).
- [KMF18] Dominik Klein, Johannes Marx y Kai Fischbach. «Agent-based modeling in social science, history, and philosophy. An introduction». En: *Historical Social Research/Historische Sozialforschung* 43.1 (163 (2018), págs. 7-27.
- [KSB12] Dominic R Kniveton, Christopher D Smith y Richard Black. «Emerging migration flows in a changing climate in dryland Africa». En: *Nature Climate Change* 2.6 (2012), págs. 444-447 (vid. págs. 13, 60).
- [KSF09] Peter Kaufmann, Sigrid Stagl y Daniel W Franks. «Simulating the diffusion of organic farming practices in two New EU Member States». En: *Ecological Economics* 68.10 (2009), págs. 2580-2593 (vid. pág. 13).
- [Kut02] Tara L Kuther. «Rational decision perspectives on alcohol consumption by youth: Revising the theory of planned behavior». En: *Addictive behaviors* 27.1 (2002), págs. 35-47 (vid. pág. 13).
- [KW16] Anna Klabunde y Frans Willekens. «Decision-making in agent-based models of migration: state of the art and challenges». En: *European Journal of Population* 32.1 (2016), págs. 73-97 (vid. págs. 9, 13, 31, 59).
- [Loc05] John Locke. *Ensayo sobre el entendimiento humano*. Fondo de Cultura Económica, 2005 (vid. pág. 10).
- [MF18] Hannah Muelder y Tatiana Filatova. «One theory-many formalizations: Testing different code implementations of the theory of planned behaviour in energy agent-based models». En: *JASSS* (2018) (vid. pág. 16).

- [Mor+10] Elisabeth Morand y col. «Demographic modelling: the state of the art». En: *Paris, INED. FP7-244557 Projet SustainCity* 39 (2010) (vid. pág. 46).
- [Nac22] Instituto Geográfico Nacional. *Ocupación del Suelo*. 2022. URL: <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Ocupacion-Suelo.pdf> (vid. pág. 70).
- [NCB99] Paul Norman, Mark Conner y Russell Bell. «The theory of planned behavior and smoking cessation.» En: *Health psychology* 18.1 (1999), pág. 89 (vid. pág. 13).
- [Ngu+18] Hung Khanh Nguyen y col. «Agent-based modeling of inter-provincial migration in the Mekong Delta, Vietnam: A data analytics approach». En: *2018 IEEE Conference on Big Data and Analytics (ICBDA)*. IEEE. 2018, págs. 27-32 (vid. págs. 13, 40, 59).
- [Ngu20] Hung Nguyen. «Studying socio-economic problems in the Mekong Delta, Vietnam: an agent-based modelling approach». Tesis doct. Mayo de 2020 (vid. págs. 16, 40).
- [NI22] Instituto Geográfico Nacional y Organismo Autónomo Nacional de Información Geográfica. *Mapas Vectoriales y Bases Cartográficas y Topográficas*. 2022. URL: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=02101> (vid. pág. 62).
- [Orc57] Guy H Orcutt. «A new type of socio-economic system». En: *The review of economics and statistics* (1957), págs. 116-123 (vid. pág. 4).
- [PCC68] T. Parsons, J.C. Castillo y J.J. Caballero. *La estructura de la acción social: estudio de teoría social, con referencias a un grupo de recientes escritores Europeos*. Biblioteca de ciencias humanas. Guadarrama, 1968 (vid. pág. 10).
- [Ram16] Raul Ramos. «Gravity models: A tool for migration analysis». En: *IZA World of Labor* (feb. de 2016), págs. 239-239. URL: <https://ideas.repec.org/a/iza/izawol/journly2016n239.html> (vid. pág. 59).
- [Ret22a] Ministerio Para La Transición Ecológica y Reto Demográfico. *Espacios Naturales Protegidos*. 2022. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/> (vid. pág. 71).
- [Ret22b] Ministerio Para La Transición Ecológica y Reto Demográfico. *La lista RAMSAR española*. 2022. URL: [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/ecosistemas-y-conectividad/conservacion-de-humedales/ch\\_hum\\_ramsar\\_esp\\_list.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/ecosistemas-y-conectividad/conservacion-de-humedales/ch_hum_ramsar_esp_list.aspx) (vid. pág. 71).
- [RFM12] Grant Rutherford, Marcia R Friesen y Robert D McLeod. «An agent based model for simulating the spread of sexually transmitted infections». En: *Online Journal of Public Health Informatics* 4.3 (2012).
- [RL12] Shannon C Roberts y John D Lee. «Using agent-based modeling to predict the diffusion of safe teenage driving behavior through an online social network». En: *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*. Vol. 56. 1. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA. 2012, págs. 2271-2275.

- [Rou09] Jean-Jacques Rousseau. *El contrato social (Clasicos de la literatura series) (Spanish Edition)*. Tra. Edimat Libros, 2009. ISBN: 8497645413; 9788497645416 (vid. pág. 10).
- [RW07] Russell W Robbins y William A Wallace. «Decision support for ethical problem solving: A multi-agent approach». En: *Decision Support Systems* 43.4 (2007), págs. 1571-1587.
- [SP10] Skipper Seabold y Josef Perktold. «statsmodels: Econometric and statistical modeling with python». En: *9th Python in Science Conference*. 2010 (vid. pág. 40).
- [SWK10] Christopher Smith, Sharon Wood y Dominic Kniveton. «Agent based modelling of migration decision-making». En: *Proceedings of the European workshop on multi-agent systems (EUMAS-2010)*. 2010, pág. 15.
- [Tay70] KW Taylor. «A paradigm for causal analysis». En: *The Sociological Quarterly* 11.2 (1970), págs. 169-180 (vid. pág. 10).
- [Tra22a] Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Banco de Datos de la Naturaleza*. 2022. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/default.aspx> (vid. pág. 62).
- [Tra22b] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. *Índice Alquiler de la Vivienda*. 2022. URL: <https://www.mitma.gob.es/vivienda/alquiler/indice-alquiler> (vid. pág. 62).
- [TSH18] Jule Thober, Nina Schwarz y Kathleen Hermans. «Agent-based modeling of environment-migration linkages». En: *Ecology and society* 23.2 (2018) (vid. págs. 31, 59).
- [VM21] Eric VanDerHorn y Sankaran Mahadevan. «Digital Twin: Generalization, characterization and implementation». En: *Decision Support Systems* 145 (2021), pág. 113524 (vid. pág. 7).
- [VV11] Tim Verwaart y Natalia I Valeeva. «An agent-based model of food safety practices adoption». En: *Emergent results of artificial economics*. Springer, 2011, págs. 103-114.
- [Wan+14] Xiang Wan y col. «Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range». En: *BMC medical research methodology* 14.1 (2014), págs. 1-13 (vid. pág. 72).
- [WH12] Minghao Wang y Xiaolin Hu. «Agent-based modeling and simulation of community collective efficacy». En: *Computational and Mathematical Organization Theory* 18.4 (2012), págs. 463-487.
- [Wil10] Tom Wilson. «Model migration schedules incorporating student migration peaks». En: *Demographic research* 23 (2010), págs. 191-222 (vid. págs. 31, 69).
- [Wil17] Frans Willekens. «The decision to emigrate: a simulation model based on the theory of planned behaviour». En: *Agent-based modelling in population studies*. Springer, 2017, págs. 257-299 (vid. pág. 16).
- [Wil22] Uri Wilensky. *NetLogo*. 2022. URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/index.shtml> (vid. pág. 16).



# Anexo I. Indicadores demográficos en Cantabria

En el presente Anexo, se ofrece un análisis del número de habitantes, la densidad poblacional y la tasa de envejecimiento a nivel municipal con el objetivo de mostrar qué municipios se hallan en riesgo de despoblamiento según la Consejería de Economía y Hacienda en la Orden HAC/04/2021 del 9 de marzo de 2021 del Boletín Oficial de Cantabria (BOC). Con ello, se busca ampliar la perspectiva y ofrecer un criterio alternativo al expuesto en la Sección 1.2.

## Número de habitantes

En Cantabria, existen dos tipos de vaciamiento en cuanto a número de habitantes: el de los lugares de montaña y valles interiores; y el de los núcleos urbanos tradicionales. El primero responde a un desarrollo histórico que se arrastra desde el s. XIX por la migración hacia las ciudades y que ahora continúa mediante las altas tasas de mortalidad y la falta de relevo generacional. El segundo se explica por el proceso de periurbanización.

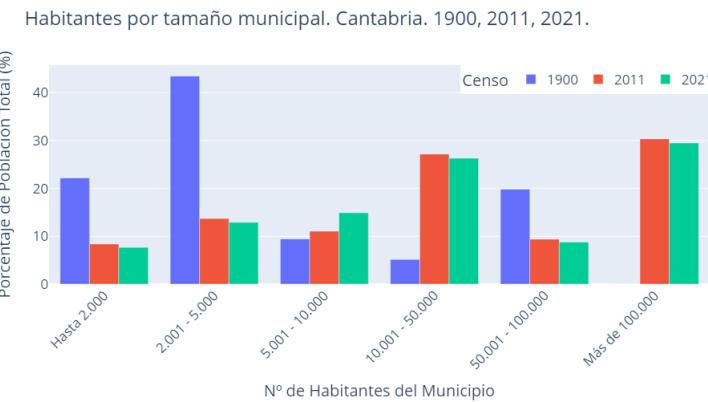


Figura 4.1: *Habitantes por tamaño municipal en Cantabria. Censos de 1900, 2011, 2021.*

En la Figura 4.1, se clasifican los 102 municipios cántabros según su número de habitantes y se muestra qué porcentaje de la población reside en cada clase. En

el año 1900, el 22,17% de los cántabros residía en municipios de hasta 2.000 habitantes, una cifra que contrasta con el 8,3% del 2011 y el 7,68% de 2021. Pero las diferencias son aún más llamativas si consideramos los municipios de entre 2.001 y 5.000 habitantes: en 1900, el 43,45% de la población cántabra vivía en este tipo de municipios, mientras que sólo lo hacía el 13,71% en 2011 y el 12,90% en 2021. Los siguientes estratos ponen de manifiesto el proceso de periusurbanización. En 2021, se observa un aumento del porcentaje de población que vive en municipios de entre 5.000 y 10.000 habitantes con respecto a 2011. Aunque la diferencia no sea muy significativa, los municipios agrupados en las tres clases con más habitantes pierden población en 2021 con respecto a 2011.

En la Figura 4.3, se muestran los municipios cántabros según su número de habitantes. El modelo industrial y urbano tradicional ha fomentado el dinamismo en el eje conurbano Santander-Torrelavega y, favorecidos por las mejoras en cuanto a servicios e infraestructuras, municipios adyacentes a los núcleos tradicionales han aumentado su población. Son evidentes la litoralización y la periusurbanización así como la dicotomía costa-valles interiores.

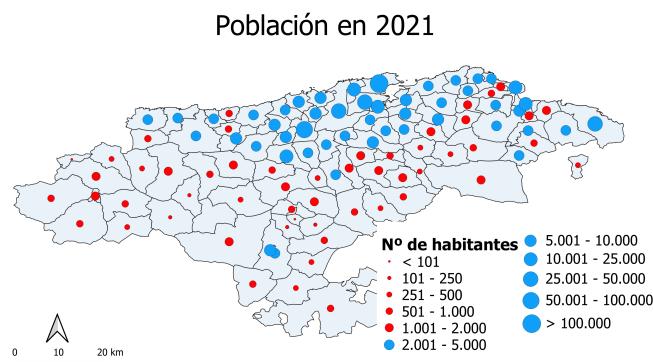


Figura 4.2: Número de habitantes por municipio en Cantabria. 2021.

Sobre esta variable, se establecen 2.000 habitantes como límite por debajo del cual se cuestiona la viabilidad de los servicios básicos. A fecha de 2021, son 54 los municipios cántabros por debajo de este umbral.

Nº	Municipio	1900			2011			2021		
		Habs	% Cantabria	Municipio	Habs	% Cantabria	Municipio	Habs	% Cantabria	Municipio
1	Santander	54.694	19,816	Santander	179.921	30,334	Santander	172.221	29,464	
2	Castro-Urdiales	14.191	5,141	Torrelavega	55.553	9,366	Torrelavega	51.237	8,765	
3	Torrelavega	7.777	2,817	Castro-Urdiales	32.374	5,458	Castro-Urdiales	32.975	5,641	
4	Valderredible	7.442	2,696	Camargo	31.556	5,320	Camargo	30.497	5,217	
5	Piélagos	5.698	2.064	Piélagos	22.223	3.746	Piélagos	26.035	4,454	

Cuadro 4.1: Municipios con más habitantes en Cantabria. 1900, 2011, 2021.

Nº	1900			2011			2021		
	Municipio	Habs	% Cantabria	Municipio	Habs	% Cantabria	Municipio	Habs	% Cantabria
1	Pesquera	358	0,129	Tresviso	74	0,012	Tresviso	59	0,010
2	Tresviso	377	0,136	Pesquera	89	0,015	Pesquera	82	0,014
3	San Miguel de Aguayo	446	0,161	San Miguel de Aguayo	166	0,027	San Miguel de Aguayo	148	0,025
4	Argoños	511	0,185	Tudanca	174	0,029	Tudanca	148	0,025
5	Noja	655	0,237	Polaciones	265	0,044	Polaciones	215	0,036

Cuadro 4.2: *Municipios con menos habitantes en Cantabria. 1900, 2011, 2021.*

### Densidad de población

Los 5.321 km<sup>2</sup> que abarcan los 102 municipios de Cantabria sólo representan el 1.05 % de la superficie española total, 505.900 km<sup>2</sup>. Si bien, el peso de Cantabria en términos de población es superior. En consecuencia, la densidad de población de Cantabria es más elevada que la de España, con 109,849 hab/km<sup>2</sup> y 93,743 hab/km<sup>2</sup>, respectivamente, en 2021.

Densidad de Población de España y Cantabria

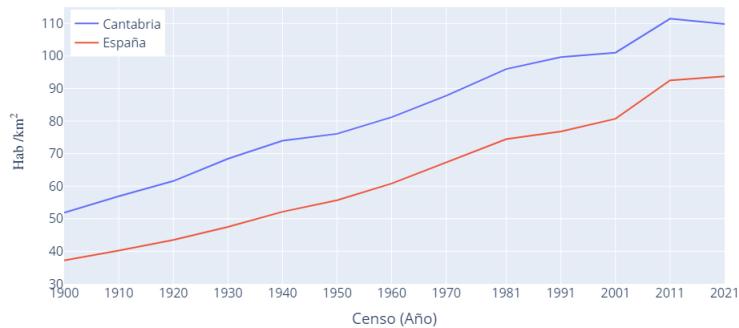


Figura 4.3: *Densidad de población (hab/km<sup>2</sup>) en España y Cantabria. 1900 – 2021.*

### Densidad de población (habitantes/km<sup>2</sup>) en 2021

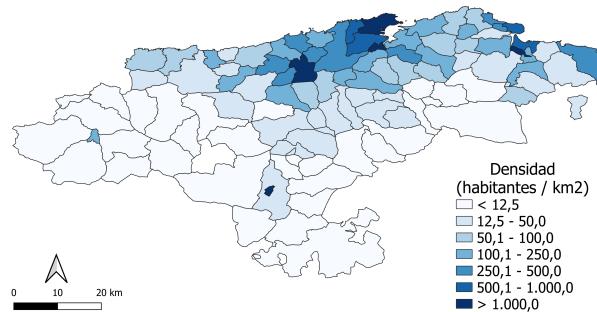


Figura 4.4: *Densidad de población (hab/km<sup>2</sup>) por municipio en Cantabria. 2021.*

Pero la densidad de población de los municipios cántabros no es uniforme (Fig

**4.4).** Los municipios más extensos son los que menos habitantes agrupan y los menos extensos acumulan más población.

En 2021, el municipio con mayor densidad era Santander (4.799,899 hab/km<sup>2</sup>) seguido, a gran distancia, por El Astillero (2.789,899 hab/km<sup>2</sup>) y Reinosa (2.150,899 hab/km<sup>2</sup>). La densidad en los municipios más densos ha permanecido estable entre los censos de 2011 y 2021. Si bien, observamos la gran diferencia entre estos censos y el de 1900: Santander y Reinosa han más que triplicado su densidad, mientras que El Astillero la ha multiplicado por 4,5. Este incremento en la densidad de población hace evidente el agrupamiento de las personas en los núcleos principales.

Por el contrario, las cifras son poco alentadoras para los municipios menos densos. En el censo de 1900, la densidad más baja se hallaba en Los Tojos, con 8,987 hab/km<sup>2</sup>. En los censos de 2011 y 2021 se observa que ninguno de los cinco municipios menos densos -Polaciones, Tudanca, Valderresible, Valdeprado del Río y Tresviso- supera los 4 hab/km<sup>2</sup>. Esto pone de manifiesto el abandono de las zonas rurales.

Nº	1900		2011		2021	
	Municipio	Densidad	Municipio	Densidad	Municipio	Densidad
1	Santander	1.517,684	Santander	4.992,562	Santander	4.778,898
2	Reinosa	727,072	El Astillero	2.721,645	El Astillero	2.789,551
3	El Astillero	551,566	Reinosa	2.483,859	Reinosa	2.150,221
4	Santoña	382,660	Torrelavega	1.565,140	Torrelavega	1.443,542
5	Laredo	333,796	Colindres	1.335,520	Colindres	1.428,946

Cuadro 4.3: Municipios con mayor densidad de población (hab/km<sup>2</sup>) en Cantabria. 1900, 2011, 2021.

Nº	1900		2011		2021	
	Municipio	Densidad	Municipio	Densidad	Municipio	Densidad
1	Los Tojos	8,987	Polaciones	2,959	Polaciones	2,401
2	San Miguel de Aguayo	12,333	Tudanca	3,307	Tudanca	2,813
3	Lamasón	12,680	Valderredible	3,712	Valderredible	3,223
4	Polaciones	12,730	Valdeprado del Río	4,275	Valdeprado del Río	3,555
5	Rionansa	12,862	Lamasón	4,396	Tresviso	3,628

Cuadro 4.4: Municipios con menor densidad de población (hab/km<sup>2</sup>) en Cantabria. 1900, 2011, 2021.

En relación con esta variable, se apuntan distintos umbrales por debajo de los cuales es difícil mantener la actividad económica y los servicios básicos. A nivel europeo, las áreas escasamente pobladas se encuentran por debajo de los 12,5 hab/km<sup>2</sup>. Existen 31 municipios cántabros que verifican esta condición en 2021. Si bien, otros estudios apuntan a 8 hab/km<sup>2</sup> como límite, en cuyo caso, habría 19 municipios.

## Tasa de envejecimiento

Uno de los rasgos característicos de las sociedades actuales es el envejecimiento de su población y Cantabria no es ajena a este fenómeno. El porcentaje de población menor de 15 años -*tasa de juventud*- en Cantabria tan sólo alcanza el 12.688 %. Por otra parte, el proceso de envejecimiento se refleja en el porcentaje de habitantes de 65 años o más -*tasa de envejecimiento*. Además, este indicador muestra una pronunciada brecha entre hombres y mujeres: en el año 2021, el 25.064 % de las mujeres cántabras era mayor de 65 años mientras que sólo el 19.951 % de los hombres cántabros superaba esa edad. En total, constituyen el 22.585 % de la población en 2021.

La comparación de las pirámides poblacionales en Cantabria (Fig. 4.5) durante los años 2003, 2010 y 2021 muestra la reducción de la base, correspondiente a los tramos de edad inferior. Se observa también el progresivo avance de la parte más ancha de la pirámide hacia la parte superior, correspondiente a quinquenios más avanzados. Además, el extraordinario aumento de la esperanza de vida ha supuesto la superposición de hasta cuatro generaciones, lo cual obliga a analizar el relevo generacional y las relaciones entre los diferentes grupos de edad.

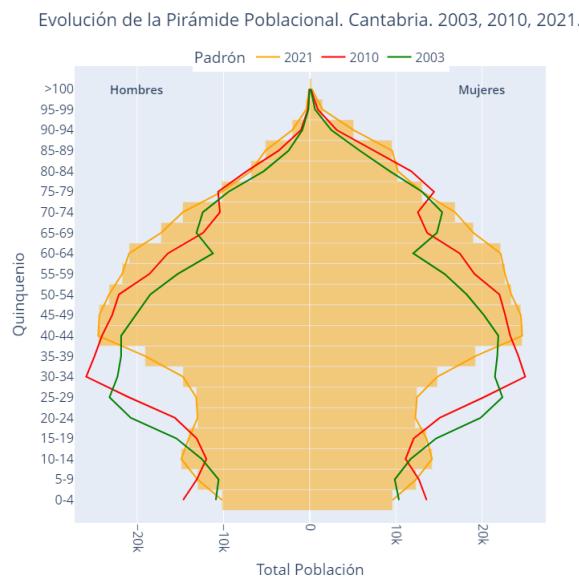


Figura 4.5: Evolución de la pirámide poblacional de Cantabria. 2003, 2010, 2021.

La Figura 4.6 muestra la tasa de envejecimiento por municipios. Un total de 27 municipios superan tasas de envejecimiento del 30 %. Los más envejecidos se corresponden con Tresviso (45,63 %), Lamasón (39,926 %) y Valdeolea (39,805 %). Los municipios del eje conurbano Santander-Torrelavega muestran valores menores que Santander (25,724 %) y Torrelavega (26,036 %), que superan a sus municipios vecinos. Es evidente la dicotomía costa-valles de interior.

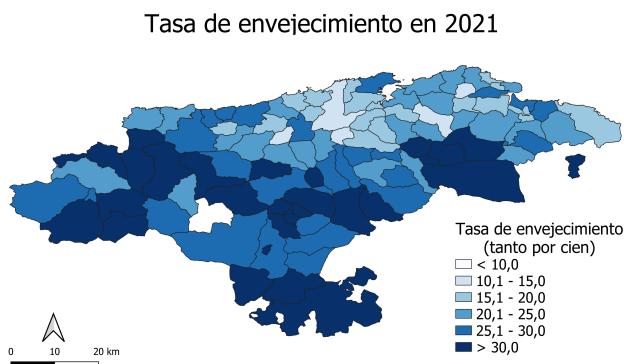


Figura 4.6: *Tasa de envejecimiento. 2021.*

### Zona Rural de Cantabria en Riesgo de Despoblamiento

Tras analizar estas tres variables, podemos recurrir al criterio establecido por la Consejería de Economía y Hacienda en la Orden HAC/04/2021 del 9 de marzo de 2021 del Boletín Oficial de Cantabria (BOC). Según este documento, se considera *Zona Rural de Cantabria en Riesgo de Despoblamiento* a aquellos municipios que cumplan al menos una de las siguientes condiciones:

- Población inferior a 2.000 habitantes.
- Densidad de población inferior a 12,5 hab/km<sup>2</sup>.
- Tasa de envejecimiento superior al 30 %.

Se establece que los municipios declarados como Zonas Rurales de Cantabria en Riesgo de Despoblamiento lo serán cuando cumplan alguna de las condiciones señaladas, al menos, durante uno de los dos años anteriores a 2021. De modo que se contabilizan 56 municipios que verifican el mencionado criterio (Fig. 4.7).

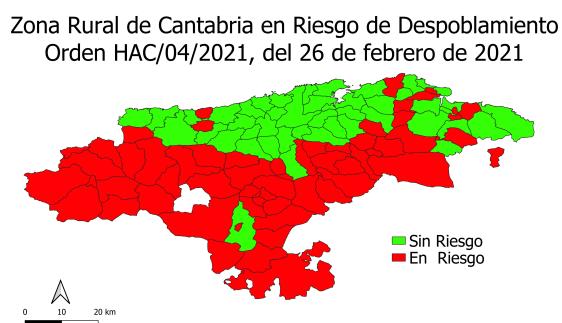


Figura 4.7: *Municipios sensibles al despoblamiento según la Orden HAC/04/2021.*

# Anexo II. Estado del arte en Modelos Basados en Agentes para migraciones

Aunque el estudio del despoblamiento esté a la orden del día, la literatura que considera los ABMs como método de investigación es escasa. Sendas recopilaciones sobre el estado del arte en la materia pueden consultarse en [KW16], [TSH18]. A continuación, se ofrece una breve perspectiva histórica y se repasan las dos referencias principales consultadas para la presente memoria.

Durante décadas, los Modelos de Gravedad (del inglés, *Gravity Models*) han sido el estándar en la literatura para explicar y predecir los flujos migratorios [Ram16]. Este enfoque asume que el flujo migratorio entre un origen y un destino es proporcional al tamaño de ambas localizaciones e inversamente proporcional a la distancia entre ambas. Sigue una formulación similar a la Ley de la Gravedad de Newton. Si bien, han ido incorporando los conceptos de factores *push* en el origen, factores *pull* en el destino, y obstáculos intermedios dando lugar a los denominados *Spatial Interaction Models* [FO89].

Pero estos modelos no son capaces de considerar la dimensión psicológica de los individuos ni las interacciones entre estos. En cambio, los ABMs suponen un método robusto para simular una población de agentes autónomos y heterogéneos capaces de interactuar entre sí. Los agentes, unidades básicas de los modelos, están caracterizados por un conjunto de atributos y reglas de comportamiento.

## Migraciones en Vietnam [Ngu+18]

El modelo de Nguyen et al. [Ngu+18] estudia las migraciones en torno al Delta del Río Mekong, Vietnam. Tras analizar el histórico de migraciones, considera 13 provincias y 5 ciudades localizadas alrededor del Delta del Río Mekong y el sudeste de Vietnam. La Actitud (BA) está definida en función de la perspectiva laboral, las oportunidades educativas y el clima. Cada una de estas tres variables está ponderada por un factor subjetivo propio de cada agente que es asignado de manera aleatoria y, además, el factor climático se define en función de la vulnerabilidad del agente a eventos meteorológicos extremos. Cada agente es localizado aleatoriamente en un barrio dentro de cada provincia o ciudad y es linkeado con un determinado número de vecinos residentes en el mismo barrio.

La Norma Subjetiva (SN) de cada agente es calculada como la proporción de sus vecinos que previamente ha migrado al destino considerado. El Control del Comportamiento Percibido (PBC) se define en función de los ingresos esperados y el coste de la vida en el lugar de destino. Además, se emplea la distancia entre origen y destino como sinónimo de las diferencias culturales y psicológicas que el agente debe superar en caso de migrar. Posteriormente, BA, SN y PBC son ponderados por tres coeficientes distintos que actúan como los únicos parámetros libres del modelo. El agente calcula su Intención (I) de migrar a todos los posibles destinos y de permanecer en su localización actual. Todas las intenciones son normalizadas en el rango [0, 1]. Una vez ordenados los posibles destinos de mayor a menor Intención, el agente sólo considera aquellos cuya Intención es superior o igual a la de su localización actual. El agente considera la Intención más alta y la compara con un número generado aleatoriamente en [0, 1]: si el número generado es menor que la intención, entonces el agente migra al destino correspondiente a la Intención más alta; en caso contrario, se considera la siguiente Intención más alta y se repite el proceso. Si se llega a la localización actual, entonces el agente permanece en ella. La unidad temporal básica es el mes y el agente recrea el proceso de la toma de decisión de migrar 2 veces al año -en junio y en diciembre-. Tras cada año, la población de cada emplazamiento es actualizada teniendo en cuenta los movimientos migratorios producidos y dos variables exógenas correspondientes con las tasas de mortalidad y natalidad. Los tres parámetros libres del modelo son calibrados mediante un algoritmo genético -que considera métricas como el Root Mean Square Error (RMSE)- empleando datos entre los años 2005 y 2016, de modo que hay 144 steps. En la inicialización, correspondiente a la realidad en enero de 2005, no se generan tantos agentes como indican los datos en cada emplazamiento. El modelo es inicializado con 3.340 agentes que representan una población estimada de 16.700.000 individuos, luego cada agente representa unos 5.000 individuos. La distribución de los agentes se hace de manera proporcional a los datos reales.

### **Migraciones en Burkina Faso [KSB12]**

El modelo de Kniventon et al. [KSB12] estudia las migraciones producidas por causas climáticas en Burkina Faso. Divide el país en 5 zonas y considera las migraciones entre estas y también la posibilidad de salir del país. La actitud (BA) se define como la probabilidad de migrar desde una localización a otra en función de género, edad, estado civil, las lluvias y localización inicial. Para ello, emplea el dataset EMUIB que recoge datos desde el año 1970 hasta el 2000. La norma subjetiva (SN) asigna valores a cada posible destino en función de las decisiones previas de los agentes a los que cada agente está ligado (no está explicitada). El Control del Comportamiento Percibido (PBC) está definida en función de dos coeficientes que expresan si un agente tiene recursos y la suficiente experiencia para migrar. El resultado se compara con un valor aleatorio en [0, 1] para convertirlo en binario. Si es 0, el agente no desarrolla la intención (I). En caso contrario, pondera los valores para las 4 posibles zonas de destino y para salir del país. La opción para la que se obtiene el valor más alto es escogida como destino. Los nacimientos, defunciones y uniones matrimoniales se actualizan mensualmente y la decisión de migrar se valora anualmente. Los resultados fueron validados con el dataset EMUIB.

# Anexo III. Preprocesado de datos

Como se ha indicado en la Subsección 2.3, uno de los retos en el desarrollo de los ABMs es la recopilación de información. En nuestro caso, necesitamos datos que caractericen a los municipios y que describan el proceso de toma de decisiones de los individuos. No estamos tan interesados en unificar todos los datos disponibles en un único archivo como en comprobar su granularidad espacial -si están a nivel inframunicipal, municipal, provincial o autonómico- y temporal y en tener un número de variables suficientemente descriptivo.

Los municipios sensibles al problema del despoblamiento no se encuentran aislados sino que forman parte de un sistema complejo, luego el territorio debe analizarse en un sentido amplio, sin seleccionar únicamente los municipios que presenten un determinado perfil en relación al despoblamiento.

La dicotomía entre los territorios demográficamente progresivos y los que se despueblan hace que se vivan situaciones graduales y diferenciadas. Por tanto, los modelos deben considerar un elevado número de variables y estas, a su vez, han de ser medidas en distintos instantes. Además, han de responder a dimensiones temáticas que pongan de manifiesto los matices del despoblamiento [CV19].

No podemos acabar comenzar este anexo sin mencionar a los compañeros de los Departamentos de Economía, Administración de Empresas, y Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio. Gracias a ellos, disponemos del amplio abanico de datos que describimos en las próximas páginas.

Los datos están almacenados en archivos xlsx y etiquetados con nombres del tipo EXCEL\_XXY donde XX son dos dígitos e Y una letra que puede o no aparecer. Así, las variables pueden agruparse en archivos según su temática. Por falta de espacio, no se detalla la definición de las variables. En caso de duda, pueden consultarse el glosario del INE [Est22d] y las fuentes de datos.

## Fuentes de datos

Se han empleado las siguientes fuentes de datos:

- Censos y Padrones del INE [[Est22e](#)].
- Estadística de Variaciones Residenciales del INE [[Est22a](#)].
- Estadística Experimental del INE [[Est22c](#)]. En concreto, las secciones de Altas de Distribución de Renta de los Hogares e Índice de Precios de la Vivienda en Alquiler.
- Base Cartográfica Nacional del Instituto Geográfico Nacional. En concreto, la Base Cartográfica Nacional a escala 1:200.000 [[NI22](#)].
- Modelo Digital de Elevaciones de la NASA con pixel de 30 m.
- Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital: Cartografía de Zonas Blancas y Grises NGA [[Asu22](#)].
- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico: Banco de Datos de la Naturaleza [[Tra22a](#)].
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana: Índice de Alquiler de Vivienda [[Tra22b](#)].
- Agencia Europea de Medio Ambiente: Common Database on Designated Areas (CDDA).
- Copernicus Land Monitoring Service: CORINE Land Cover (CLC).

## Dominio temporal

Dado que el INE elabora padrones anualmente y la mayoría de los datos provienen de esa fuente, se toma el año como unidad temporal básica. Estos padrones son complementados con los censos elaborados con periodicidad decenal. Si bien, dadas las múltiples bases de datos consultadas, no existe un dominio homogéneo para todas las variables.

CA	Código CA	Provincia	Código Prov	Municipios	Entidades Colectivas	Entidades Singulares	Núcleos	Diseminados
Aragón	02	Huesca	22	202	0	798	656	503
		Teruel	44	236	0	357	327	221
		Zaragoza	50	293	0	407	435	289
Asturias	03	Asturias	33	78	857	6968	3174	4402
Cantabria	06	Cantabria	39	102	2	930	991	217
Castilla y León	07	Avila	05	248	0	459	452	157
		Burgos	09	371	1	1179	1274	267
		León	24	211	40	1402	1416	367
		Palencia	34	191	0	470	476	192
		Salamanca	37	362	0	988	561	718
		Segovia	40	209	0	390	391	271
		Soria	42	183	0	503	507	59
		Valadolid	47	225	0	272	330	136
		Zamora	49	248	0	514	520	282
Navarra	15	Navarra	31	272	33	950	667	700
País Vasco	16	Araba/Álava	01	51	2	426	374	236
		Bizkaia	48	112	17	570	355	452
		Gipuzkoa	20	88	0	307	182	280
Rioja, La	17	Rioja, La	26	174	0	259	256	156

Cuadro 4.5: Dominio espacial original y división territorial.

## Dominio espacial

Dadas las diferencias norte-sur en las dinámicas poblacionales, se han tomado como referencia las Comunidades Autónomas de Aragón, Asturias, Cantabria, Castilla y León, La Rioja, Navarra y País Vasco. Cada una de ellas puede dividirse en diferentes tipos de entidades poblacionales (Cuadro 4.5).

Para caracterizar los municipios y sus correspondientes entidades inframunicipales, en el archivo EXCEL\_06.xlsx, se recogen variables como la población diseminada, la población media por entidad, la población de las entidades más y menos pobladas y la población municipal total en los años 2000 y 2021.

Si bien, por disponibilidad de datos, nuestra unidad básica será el municipio en su totalidad -sin considerar entidades menores- y, dado el interés particular del problema, nos centraremos en Cantabria. Según el INE, cada Comunidad Autónoma y Ciudad Autónoma está identificada por un código de dos cifras, desde 01 hasta 19 según su orden alfabético. Análogamente, cada provincia está identificada por un código de dos cifras, desde 01 hasta 52 según su orden alfabético. Por último, cada municipio de cada provincia está identificado por un código de tres cifras, desde 001 hasta el total de municipios. Por ejemplo, los códigos de los municipios en Cantabria comienzan en 001 y acaban en 102. Concatenando el código de la provincia y el código del municipio, puede identificarse únicamente a cada municipio, llamemos *CODMUN* a dicho identificador. Por ejemplo, el CODMUN de Santander (39075) resulta de concatenar el código de la provincia Cantabria (39) y el código de municipio de Santander (075).

En el momento de definir el dominio espacial de nuestro ABM, será necesario concretar los municipios que se consideran. Por ello, para agrupar los municipios cántabros según sus características, seguiremos la propuesta de delimitación comarcal del Gobierno de Cantabria que data de finales de enero de 2022 [Can22] (Fig. 4.8). A pesar de no estar exenta de polémica y no ser oficial, se ha escogido por ser la propuesta más reciente.

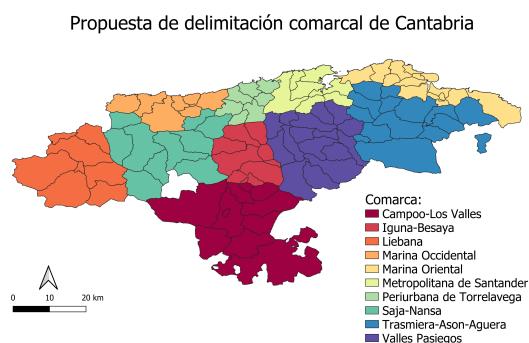


Figura 4.8: Propuesta de delimitación comarcal de Cantabria

Para localizar espacialmente cada municipio, empleamos las coordenadas geográficas -latitud y longitud-, que pueden obtenerse del archivo EXCEL\_07B.xlsx. Las coordenadas obtenidas no son del todo precisas ya que, en los datos, se tienen entradas por entidad inframunicipal. Por ejemplo, el CODMUN 39075 no sólo

hace referencia a Santander sino también a Cueto, Monte, Peñacastillo y San Román. Por ello, se toma de referencia el municipio cabecera y se hace la media de las coordenadas de todas sus entidades (Fig. 4.9). Estas coordenadas permitirán calcular la distancia geodésica entre todos los pares de municipios que se consideren en el ABM.

CODMUN	NOMBRE	LONGITUD_E	LATITUD_ET
22535	39075	Cueto	-3.806343 43.483453
22536	39075	Monte	-3.831595 43.476294
22537	39075	Peñacastillo	-3.863961 43.448140
22538	39075	San Román	-3.858462 43.470062
22539	39075	Santander	-3.809722 43.462167

CODMUN	NOMBRE	LONGITUD_E	LATITUD_ET
74	39075	Santander	-3.834017 43.468023

Figura 4.9: *Ejemplo de cálculo de latitud y longitud a nivel municipal.*

Además, la dicotomía costa-valles interiores evidencia la relevancia de la altitud sobre el nivel del mar. Utilizaremos los archivos EXCEL\_110.xlsx y EXCEL\_110B.xlsx para caracterizar los municipios con dicha variable (Fig. 4.10).

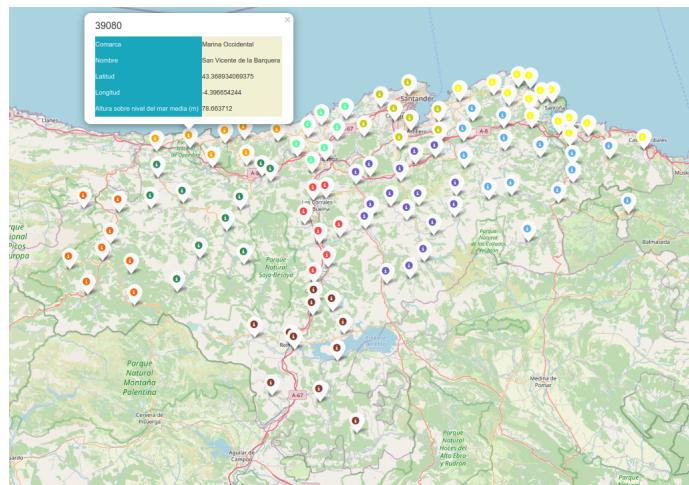


Figura 4.10: *Localización espacial de los municipios de Cantabria.*

## Variables temáticas

A continuación, se exponen las variables consideradas según su temática.

### Evolución demográfica

Mediante la evolución demográfica, se muestra el número de habitantes en un municipio a lo largo del tiempo. En los archivos EXCEL\_01.xlsx, EXCEL\_01B.xlsx y EXCEL\_01C.xlsx, se dispone de la serie de población total con periodicidad decenal entre los años 1900 y 1991; posteriormente, el padrón de 1995 y la estimación de 1997; finalmente, la serie anual desde 1998 hasta 2021. Esta evolución también se contempla en términos relativos mediante las

tasas de crecimiento medio interanual en los períodos 1900 – 10, 1910 – 20, 1920 – 30, 1930 – 40, 1940 – 50, 1950 – 60, 1960 – 70, 1970 – 81, 1981 – 91, 1991 – 2001, 2001 – 2011, 2011 – 2021. Por otra parte, también se consideran las cifras desagregadas por sexo entre los años 2000 y 2021.

Variación de la población en 2021 con respecto a 2011

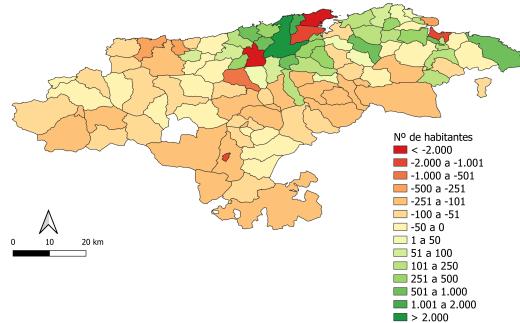


Figura 4.11: Variación de la población en Cantabria en 2021 con respecto a 2011.

## Estructura demográfica

La estructura demográfica muestra las variables absolutas de número de hombres, mujeres y población total desagregados en grupos quinquenales de edad. A partir de estas variables, se derivan indicadores tales como la razón de masculinidad, el número de mujeres en edad fecunda, el índice de dependencia, el índice de dependencia de los mayores, las tasas de juventud y envejecimiento, el índice de envejecimiento, la población soporte, la población adulta, el índice de reemplazamiento de la población activa, el número de hijos por mujer y el índice de carga materna. Se dispone de datos de estas variables en los años 2003, 2010 y 2021 en el archivo EXCEL\_04.xlsx.

La estructura demográfica va más allá de los límites de su propia definición y está directamente relacionada con aspectos económicos en cuanto a que condiciona el emprendimiento y planteamiento de soluciones desde los recursos endógenos. No sólo importa el sexo y la edad de la población sino también cómo se agrupa. La familia es un elemento organizativo de especial interés por su papel en las variables vegetativas y porque, a la hora de tomar la decisión de migrar, supone un condicionante clave sobre el individuo.

En los archivos EXCEL\_08.xlsx, EXCEL\_08B.xlsx, EXCEL\_08C.xlsx, EXCEL\_08D.xlsx, EXCEL\_08E.xlsx, EXCEL\_08F.xlsx y EXCEL\_08G.xlsx, se recogen variables como el tamaño medio del hogar o el porcentaje de hogares unipersonales a nivel municipal entre los años 2015 y 2019. Se dispone de variables tales como el número de hogares formados por 1, 2, 3, 4, 5, 6 ó más personas en el año 2011. También se consideran variables que explican el número de hogares con hijos en el año 2011. Si bien, dado que los datos no están completos para todos los municipios cántabros y dado que la definición de las variables disponibles no es del todo precisa, se ha optado por simplificar la estructura familiar tal y como se explicará en la Subsección 3.3.3.

Pirámide poblacional en 2021.

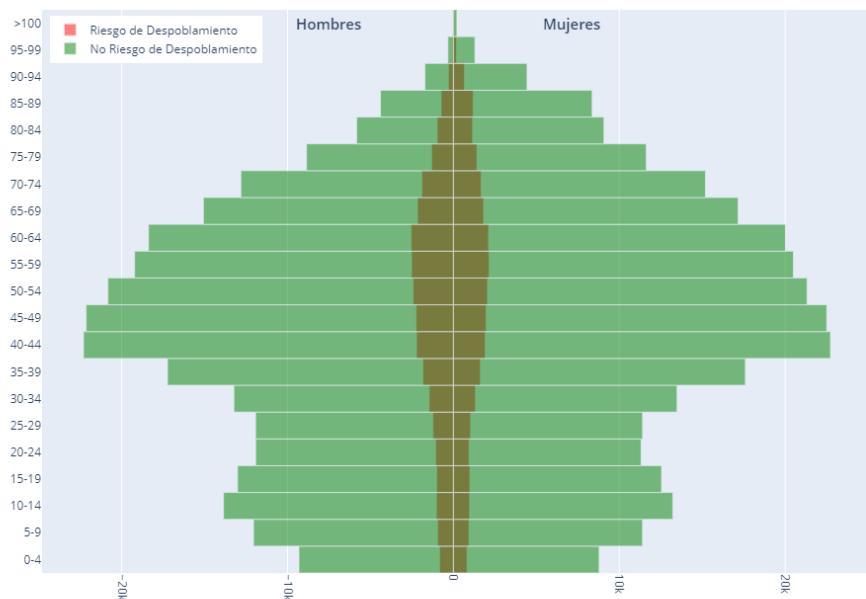


Figura 4.12: Comparación de las pirámides poblacionales entre las Zonas Rurales de Cantabria en Riesgo de Despoblamiento -rojo- y los municipios sin riesgo -verde- en 2021 según la Orden HAC/04/2021. La zona más ancha de la pirámide roja alcanza quinquenios más altos que la zona más ancha de la pirámide verde.

## Dinámica vegetativa

El concepto de despoblamiento considera la dinámica vegetativa como parte fundamental. A nivel municipal, se refiere al número de nacimientos, defunciones, y al saldo vegetativo -diferencia entre nacimientos y defunciones-. En el archivo EXCEL\_02.xlsx, se dispone de estas variables entre los años 2000 y 2020 así como de las tasas brutas de natalidad y mortalidad y la tasa de crecimiento vegetativo. En el modelo que proponemos, estos datos se emplean para calibrar submodelos que indiquen el número de nacimientos y defunciones en cada municipio en función de su estructura demográfica.

## Dinámica migratoria

El despoblamiento también considera la dinámica migratoria. En el archivo EXCEL\_03.xlsx se dispone, a nivel municipal, de las altas y bajas totales, de las altas exteriores e interiores -número de personas desplazadas al municipio considerado provenientes de algún lugar del extranjero o España, respectivamente-, de las bajas exteriores e interiores -número personas del municipio determinado que se desplazan a otros lugares extranjeros o españoles, respectivamente- y

de los saldos -diferencia entre altas y bajas- total, exterior e interior. La serie temporal abarca el período entre los años 2012 y 2020.

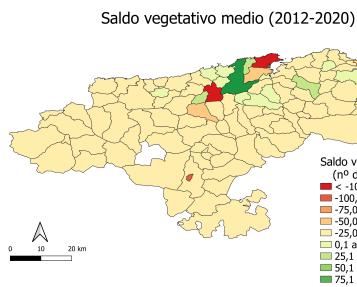


Figura 4.13: *Saldo vegetativo medio*.

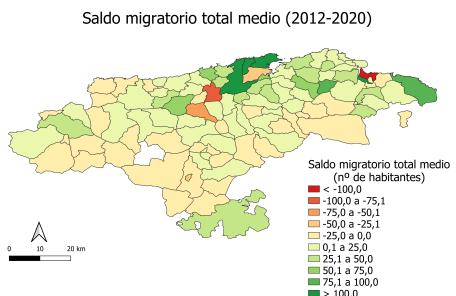


Figura 4.14: *Saldo migratorio medio*.

Figura 4.15: *Saldos medios en Cantabria. 2012 – 2020*.

Si bien, estos datos no son suficientemente precisos. Por ejemplo, podemos saber que, en el año 2020 y en Santander, hubo 6.211 altas totales y 5.960 bajas totales dando lugar a un saldo migratorio total positivo de 251. De las 6.211 altas, sabemos que 4.641 llegan desde otro lugar de España y 1.570 lo hacen desde el extranjero. También, de las 5.960 bajas, 5.449 personas se desplazan a otro lugar de España y 511 lo hacen al extranjero. Pero no conocemos con precisión los municipios de origen y destino ni tampoco el sexo o la edad de los desplazados.

Es por ello que recurrimos a la Estadística de Variaciones Residenciales contemplada en los padrones del INE entre los años 1998 y 2021 [Est22a]. Cada fila de estos datos se corresponde con el movimiento migratorio de una persona, de la cual se conoce su sexo, mes y año de nacimiento, nacionalidad, municipio y provincia de nacimiento, municipio y provincia donde se produce la baja, municipio y provincia donde se produce el alta, año y mes en el que se produce el movimiento migratorio y tamaño de los municipios de nacimiento, baja y alta. Para identificar las provincias y municipios, se emplean los códigos y la metodología descritos en la Sección . A los códigos de las provincias, se añade el código 66 para identificar lugares fuera de España. Si bien, por cuestiones de privacidad, se blanquea el código de los municipios con población inferior a 10.000 habitantes de modo que es posible que, al generar los CODMUNs de los municipios de alta y de baja, se obtengan CODMUNs como 39, lo cual indica que se trata de un municipio cántabro indefinido de menos de 10.000 habitantes.

En la Figura 4.18, se expresan los flujos migratorios como diagramas de cuerdas. En la Figura 4.17, cada color se asocia con un municipio y cada arco -su anchura representa la intensidad- muestra el flujo migratorio entre dos municipios. Por ejemplo, el color morado se corresponde con Santander y los arcos morados muestran los flujos migratorios con origen en Santander y destino el municipio en el que desembocan. La Figura 4.16 es análoga a nivel provincial.

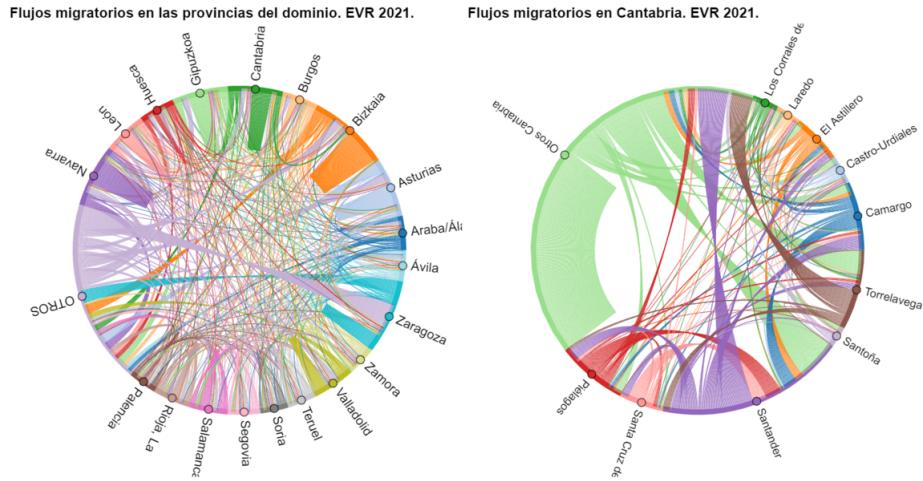


Figura 4.16: Provincias del dominio original. Figura 4.17: Municipios de Cantabria.

Figura 4.18: Flujos migratorios como diagramas de cuerdas en 2021.

También pueden elaborarse representaciones como grafos dirigidos (Fig 4.21). En la Figura 4.20, se muestran los flujos migratorios que llegan a Santander. Cada arco está pesado por el total de movimientos entre el origen y Santander. Por ejemplo, hubo 39 migraciones desde Santoña hacia Santander en 2021.

Migraciones con origen Santander. EVR 2021      Migraciones con destino Santander. EVR 2021

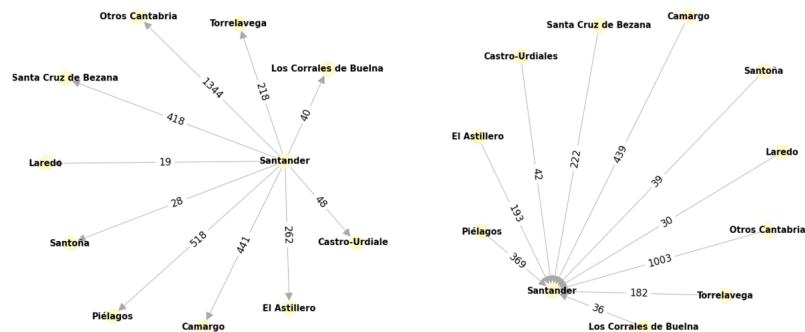


Figura 4.19: Migraciones con origen es San- Figura 4.20: Migraciones con destino en San- tander.

Figura 4.21: Flujos migratorios como grafos en Santander en 2021.

Además, los flujos migratorios pueden caracterizarse por el sexo y edad de los desplazados. Es evidente que, por ejemplo, los jóvenes están más dispuestos a desplazarse con el objetivo de comenzar estudios universitarios o conseguir empleo mientras que las personas con un empleo estable y familia tienden a permanecer en su lugar de residencia. Empleando las Estadísticas de Variaciones Residenciales, podemos ver la frecuencia con la que las personas de un sexo y

edad determinados llegan o salen de un municipio. La curva de Rogers-Castro describe la intensidad de los movimientos migratorios en función de la edad y está teóricamente parametrizada [Wil10]. En la Figura 4.22 se muestra el ajuste a los datos del flujo migratorio con destino Bilbao en 2021 sin diferenciar por sexo -se ha escogido Bilbao por la bondad del ajuste-.

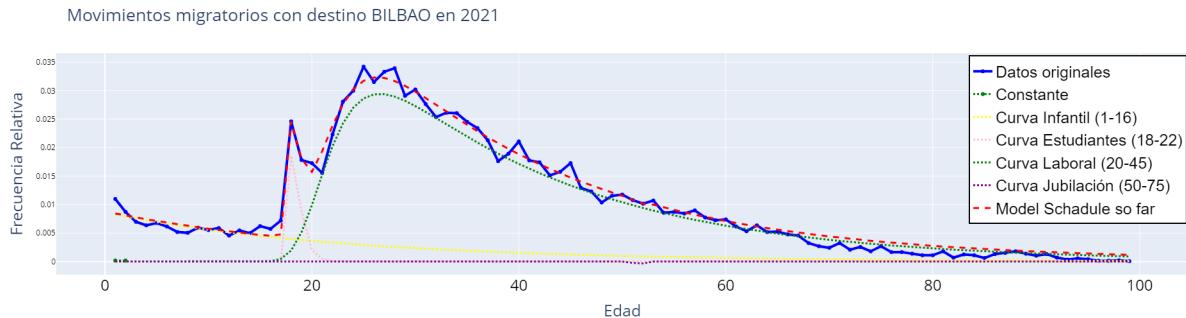


Figura 4.22: Curva de Rogers-Castro [Wil10] para las altas en Bilbao en 2021.

## Accesibilidad

Idealmente, vivir en un entorno rural no debe conllevar menor calidad de vida que hacerlo en un entorno urbano. Pero, en la realidad, es evidente que la accesibilidad, equipamientos y servicios varían considerablemente en función del municipio. Es por ello que se recogen variables de esta temática.

En el archivo EXCEL\_111.xlsx, se recogen, a nivel municipal, los valores máximo, mínimo, medio y desviación típica de la distancia (en metros) al municipio más cercano de más de 10.000 habitantes.

En el archivo EXCEL\_112.xlsx, se recogen, a nivel municipal, los valores máximo, mínimo, medio y desviación típica de las distancias (en metros) a carreteras nacionales, autovías o autopistas y estaciones ferrocarril más cercanas.

En el archivo EXCEL\_12.xlsx, se recogen, a nivel municipal, el valor medio de las distancias (en metros) al hospital, farmacia, centro educativo, centro de urgencias y centro de atención primaria más cercanos.

El archivo EXCEL\_12.xlsx también contiene el número de hospitales, de farmacias, de centros educativos, centros de urgencias hospitalarias y centros de atención primaria a nivel municipal. Si bien, los datos no son del todo fiables. De los 102 municipios cántabros, no existen registros para el número de farmacias en 44 municipios, del número de centros educativos en 62; del número de centros de urgencias hospitalarias en 72 y del número de centros de atención primaria en 3. A priori, podría pensarse que estos missing values son 0, pero lo cierto es que no siempre se cumple. Por ejemplo, en Camargo hay 1 farmacia [Far22], de modo que al tomar los missing values por 0 estaríamos falseando datos.

En los archivos EXCEL\_07.xlsx y EXCEL\_07B.xlsx, se recogen variables sobre conexión digital a nivel municipal. Se dispone de la superficie municipal afectada por zonas blancas -áreas que no cuentan con cobertura de banda ancha de nueva

generación- y zonas grises -zonas que sólo disponen de cobertura de banda ancha de nueva generación o de previsiones de dotación en un plazo de tres años por parte de un único operador-. Se toma como referencia el año 2021.



Figura 4.23: *Vías principales.*

Figura 4.24: *Distancia (km) a centros de urgencias hospitalarias.*

## Uso de Suelo y Espacios Naturales Protegidos

Gracias a la teledetección y al tratamiento digital de las imágenes, pueden estudiarse las características de la superficie terrestre. Existen dos caracterizaciones: la cobertura del suelo y el uso del suelo. El primero categoriza la superficie terrestre según sus propiedades biofísicas mientras que el segundo lo hace según su dimensión funcional o dedicación socioeconómica [Nac22].

El proyecto CORINE Land Cover tiene como objetivo la captura de datos geográficos para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 sobre la cobertura y uso del territorio mediante la interpretación a través de imágenes recogidas por satélites. Existe una taxonomía sobre los usos del suelo [Cov22]. En el nivel superior (N1), se establecen 5 grandes grupos: superficies artificiales, territorios agrícolas, bosques y medios seminaturales, zonas húmedas y superficies de agua. Un nivel por debajo encontramos los grupos N2 y, posteriormente, los grupos N3. Así por ejemplo, las superficies de agua (N1) están compuestas por aguas continentales y aguas marítimas (N2). A su vez, las aguas marítimas están compuestas por lagunas litorales, estuarios y mares y océanos (N3).

A nivel municipal, se establece la superficie que ocupa cada categoría de N1 y N2 para los años 1990 y 2018 en los archivos EXCEL\_09.xlsx, EXCEL\_09B.xlsx, EXCEL\_09C.xlsx, EXCEL\_09D.xlsx. Si bien, los datos no parecen del todo fiables. En Cantabria, todos los tipos de suelo cambian en 2018 con respecto a 1990. Por ejemplo, a nivel N1, todos los territorios agrícolas se convierten en zonas húmedas, superficies de agua, superficies artificiales o bosques y medios seminaturales. En la Figura 4.25, el círculo interior se corresponde con 1990 y el exterior, con 2018. Los cambios observados son tan drásticos que se ha decidido no utilizar esta variable en el modelado ya que pudiera responder a efectos distintos a la dinámica poblacional.

Cambio de suelo N1 Corine Land Cover 2018 respecto a 1990. Cantabria

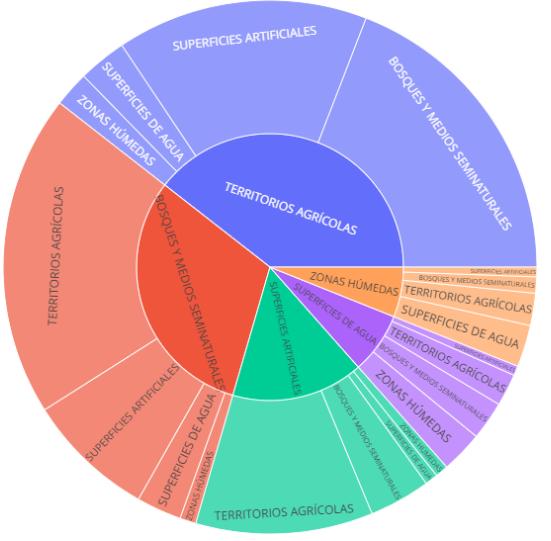


Figura 4.25: Cambio de suelo N1 Corine Land Cover en 2018 con respecto a 1990. Cantabria

Los sitios RAMSAR son humedales designados de importancia internacional según el Convenio RAMSAR [Ret22b]. Se dispone de datos de los sitios RAMSAR de Cantabria y los municipios en los que se localizan en el archivo EXCEL\_10B.xlsx.

También se conocen los municipios que cuentan con Espacios Naturales Protegidos y a qué categoría pertenecen [Ret22a]. Se dispone del porcentaje de superficie municipal afectada por Espacios Naturales Protegidos en  $\text{km}^2$  y hectáreas así como la fecha de aprobación de la figura de protección del espacio en el archivo EXCEL\_10\_1.xlsx.

A nivel provincial, existen 19 variables que explicitan la superficie ( $\text{km}^2$ ) afectada por elementos naturales tales como árboles singulares, reservas de la biosfera o paisajes protegidos. Si bien, 12 de estas 19 variables son vacías en Cantabria y no están descritas a nivel municipal en el archivo EXCEL\_10\_2.xlsx. Por ello, han sido descartadas.

## Variables económicas

A la hora de migrar, también han de considerarse variables de tipo económico. De hecho, fenómenos como la perurbanización ponen de manifiesto cómo el encarecimiento del precio de la vivienda en ciudades tradicionales como Torrelavega y Santander provoca el desplazamiento hacia municipios aledaños. Es por ello que consideraremos la renta media por persona y el precio medio del alquiler a nivel municipal.

En el archivo R\_renta\_medis.xlsx, se recogen indicadores estadísticos de nivel y distribución de renta de los hogares y personas a nivel municipal e inframunicipal haciendo uso de datos tributarios del INE, de la Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT) y de las Haciendas Forales. En concreto, nos centramos en la renta media anual por persona a nivel censal entre los años 2015 y 2019. Dado que un municipio puede estar compuesto por varias secciones censales, se calculan la media y la desviación típica entre todas las secciones censales del municipio para obtener un dato aproximado a nivel municipal. Si bien, esta serie temporal es demasiado limitada. Para ampliarla y cubrir los años comprendidos entre 2011 y 2021, se recurre al archivo R\_Renta\_Media\_CCAA.xlsx, que contiene la renta media anual a nivel autonómico entre los años 2008 y 2021 y se calculan las variaciones interanuales. La serie municipal se amplia entre 2010 y 2021 siguiendo las variaciones interanuales calculadas. Si, por ejemplo, la renta media anual en Santander en 2019 es de 14.229,44 y, a nivel autonómico, la renta media anual en Cantabria se ha incrementado un 0,04449% de 2019 a 2020, entonces el dato de Santander se incrementa ese mismo porcentaje alcanzando los 14.862,516367 en 2020. Cuando no se dispone de datos para un municipio, se toma como referencia la renta media a nivel provincial en el año que corresponda.

En el archivo IPVA\_Municipios.xlsx, se recoge el Índice de Precios de la Vivienda en Alquiler (IPVA), que tiene como objetivo la medición de la evolución anual de los precios de la vivienda alquilada como residencia habitual. Se nutre de los datos proporcionados de la AEAT, que procede del modelo 100 de las declaraciones del IRPF. Permite obtener variaciones anuales de precios para distintos niveles de desagregación geográfica y según distintas características de las viviendas alquiladas. En concreto, nos fijaremos en las variables que recogen el alquiler mensual de viviendas colectivas. Se dispone de dato mediano, del percentil 25 y del percentil 75 a nivel de sección censal entre los años 2015 y 2019. Para calcular la media y la desviación típica seguiremos el procedimiento descrito en [Wan+14]. También se dispone de esta variable a nivel autonómico, de modo que, para ampliar la serie temporal entre los años 2010 y 2021, se sigue el desarrollo explicado anteriormente haciendo uso del archivo IPVA\_Provincias.xlsx. Cuando no se dispone de datos para un municipio, se toma como referencia el precio del alquiler medio a nivel provincial en el año que corresponda.

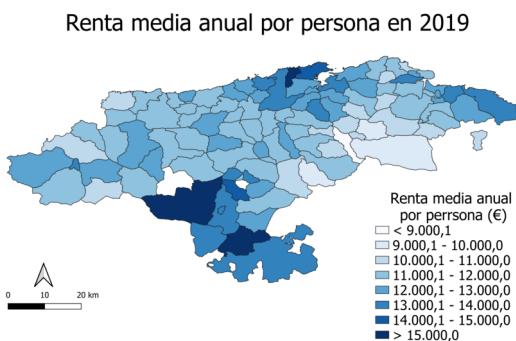


Figura 4.26: *Renta media anual por persona a nivel municipal en 2019.*

# Anexo IV. Herramienta de monitorización y resultados

Para monitorizar los estados en el modelo y generar la mayoría de gráficos de la presente memoria, se ha elaborado un menú interactivo empleando la librería *tkinter* de Python.



Figura 4.27: Capturas de pantalla sobre la herramienta de monitorización.

## Resultados en Campoo de Enmedio

Comparación de POBLACIÓN en Campoo de Enmedio

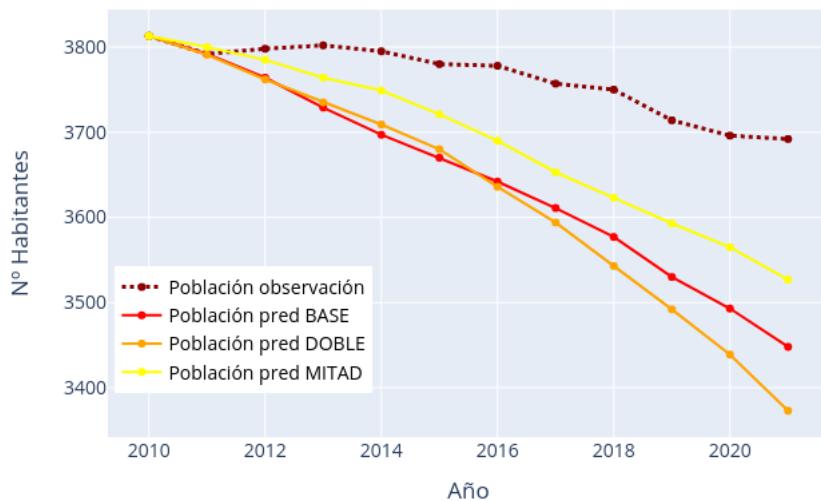


Figura 4.28: Comparación del nº de habitantes en Campoo de Enmedio. 2010 – 2021.

Comparación de PIRÁMIDE POBLACIONAL de Campoo de Enmedio en 2021

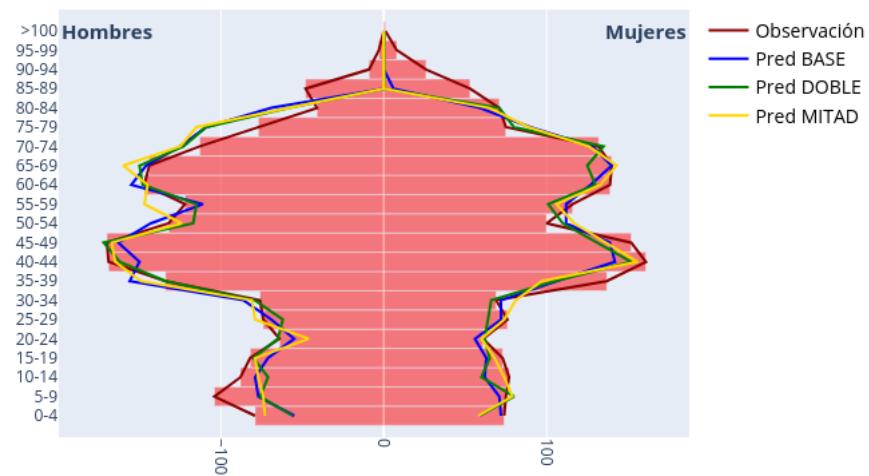


Figura 4.29: Comparación de la pirámide poblacional en Campoo de Enmedio. 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN VEGETATIVA en Campoo de Enmedio

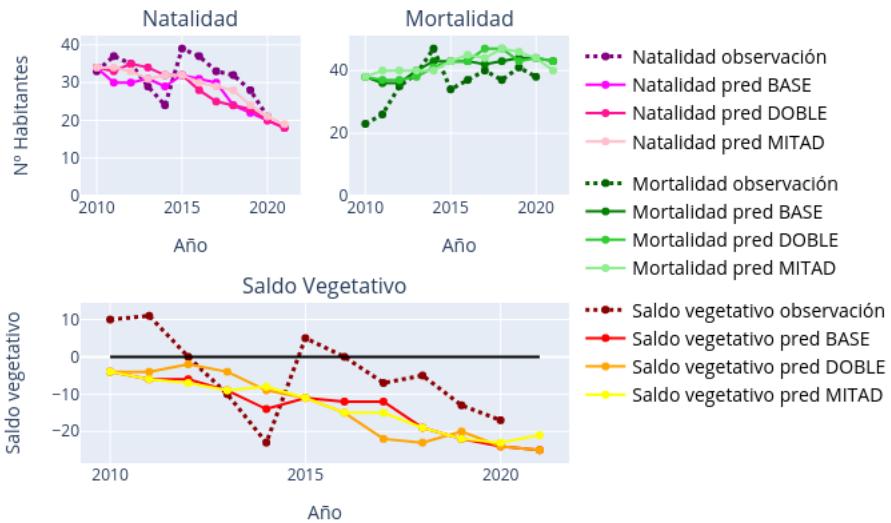


Figura 4.30: Comparación de la evolución vegetativa en Campoo de Enmedio. 2010 – 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN MIGRATORIA en Campoo de Enmedio

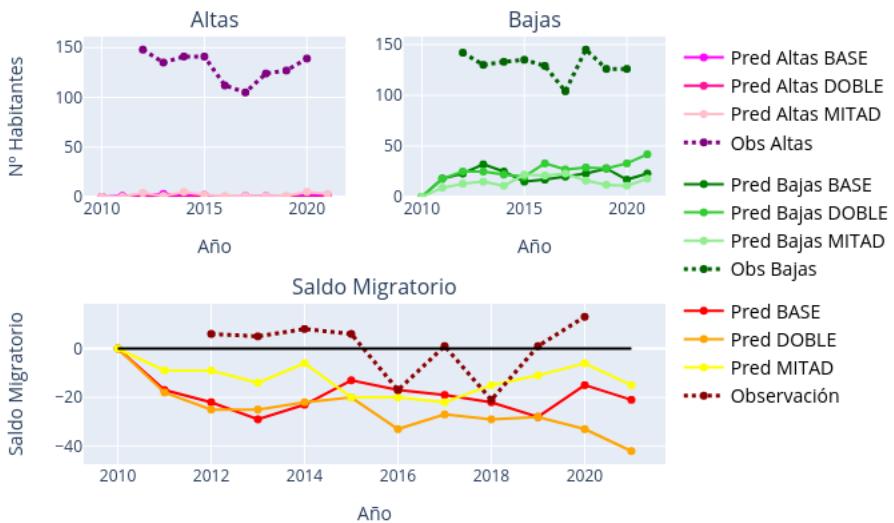


Figura 4.31: Comparación de la evolución migratoria en Campoo de Enmedio. 2010 – 2021.

## Resultados en Campoo de Yuso

Comparación de POBLACIÓN en Campoo de Yuso

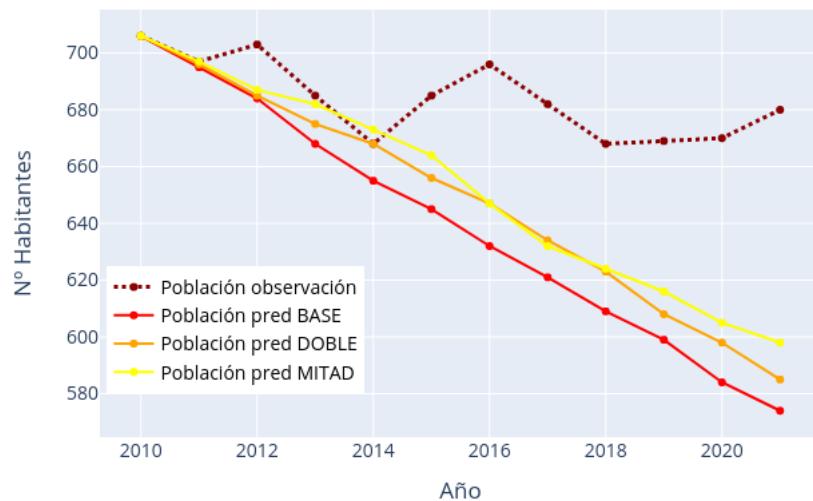


Figura 4.32: Comparación del nº de habitantes en Campoo de Yuso. 2010 – 2021.

Comparación de PIRÁMIDE POBLACIONAL de Campoo de Yuso en 2021

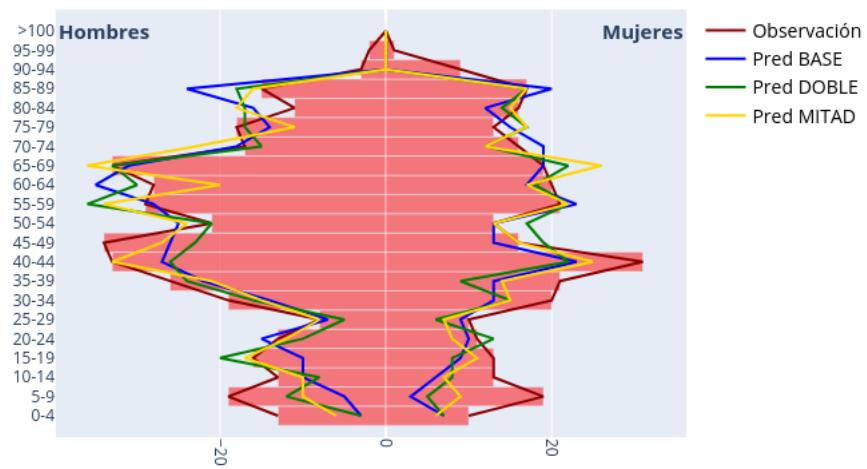


Figura 4.33: Comparación de la pirámide poblacional en Campoo de Yuso. 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN VEGETATIVA en Campoo de Yuso

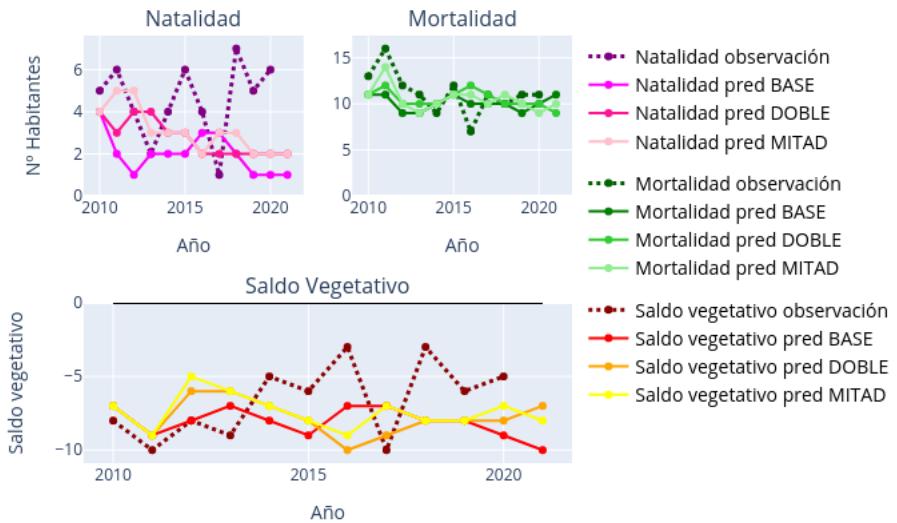


Figura 4.34: Comparación de la evolución vegetativa en Campoo de Yuso. 2010 – 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN MIGRATORIA en Campoo de Yuso

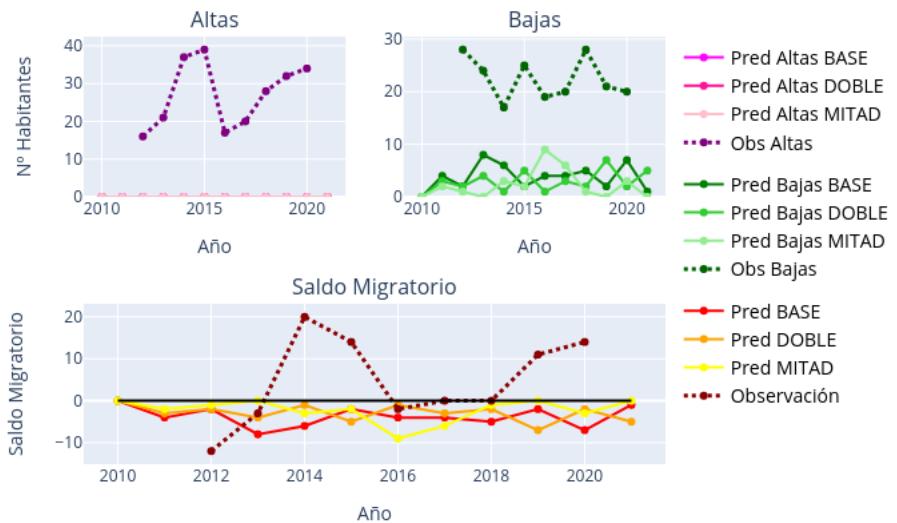


Figura 4.35: Comparación de la evolución migratoria en Campoo de Yuso. 2010 – 2021.

## Resultados en Hermandad de Campoo de Suso

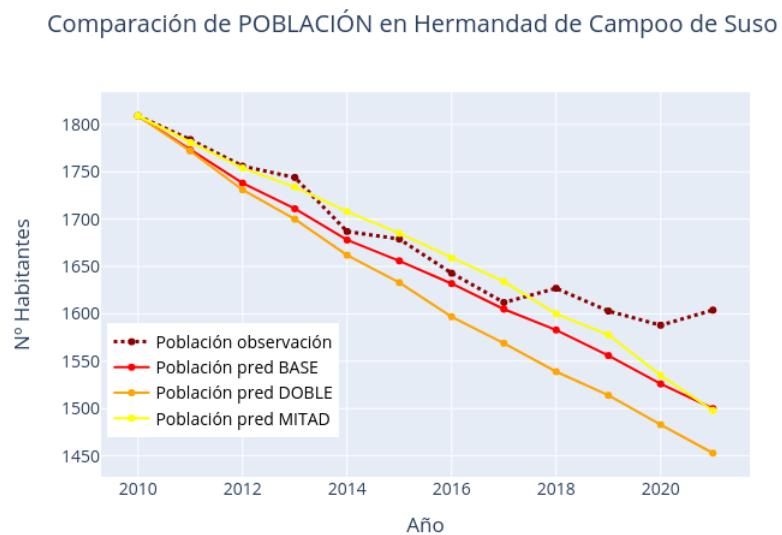


Figura 4.36: Comparación del nº de habitantes Hermandad de Campoo de Suso. 2010 – 2021.

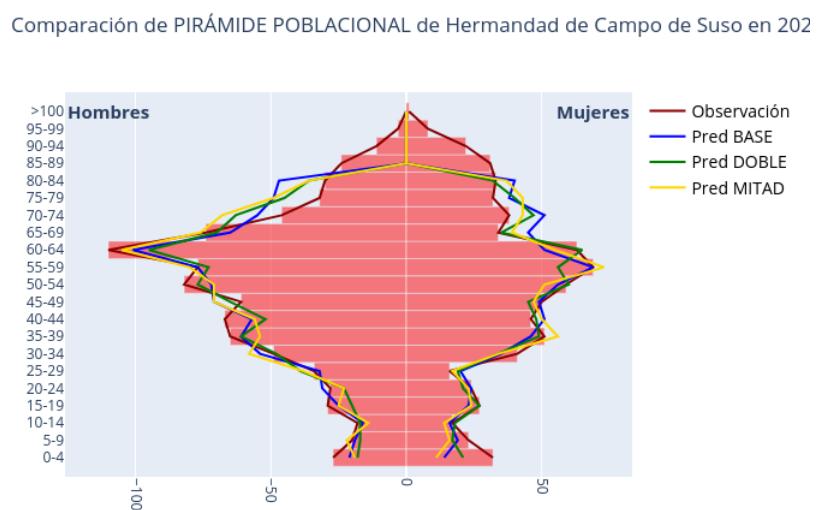


Figura 4.37: Comparación de la pirámide poblacional en Hermandad de Campoo de Suso. 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN VEGETATIVA en Hermandad de Campoo de Suso

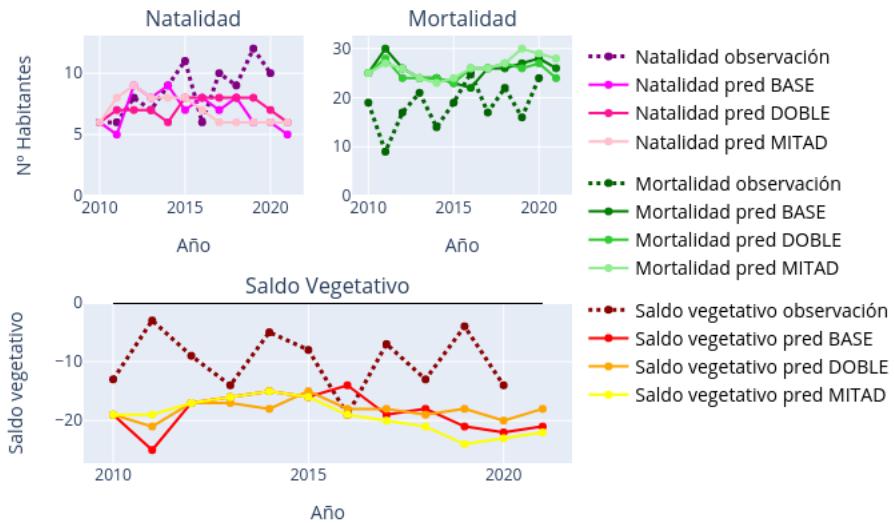


Figura 4.38: Comparación de la evolución vegetativa en Hermandad de Campoo de Suso. 2010 – 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN MIGRATORIA en Hermandad de Campoo de Suso

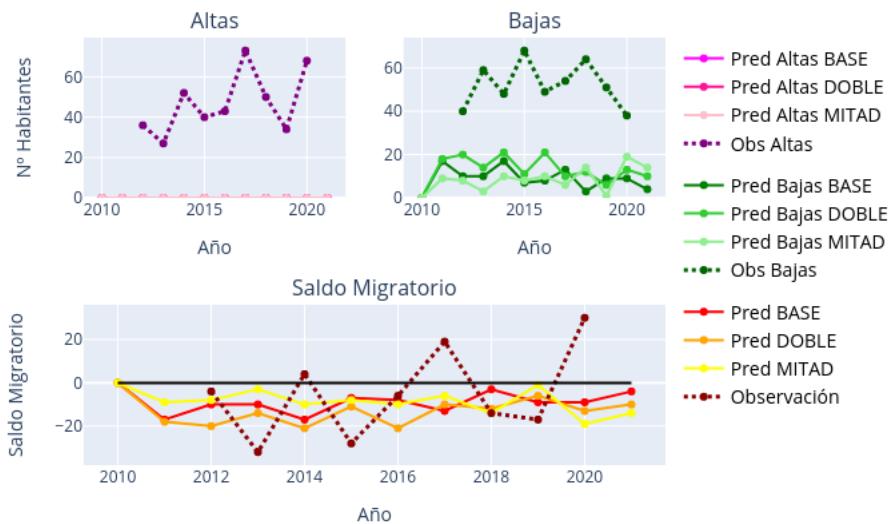


Figura 4.39: Comparación de la evolución migratoria en Hermandad de Campoo de Suso. 2010 – 2021.

## Resultados en Las Rozas de Valdearroyo

Comparación de POBLACIÓN en Las Rozas de Valdearroyo

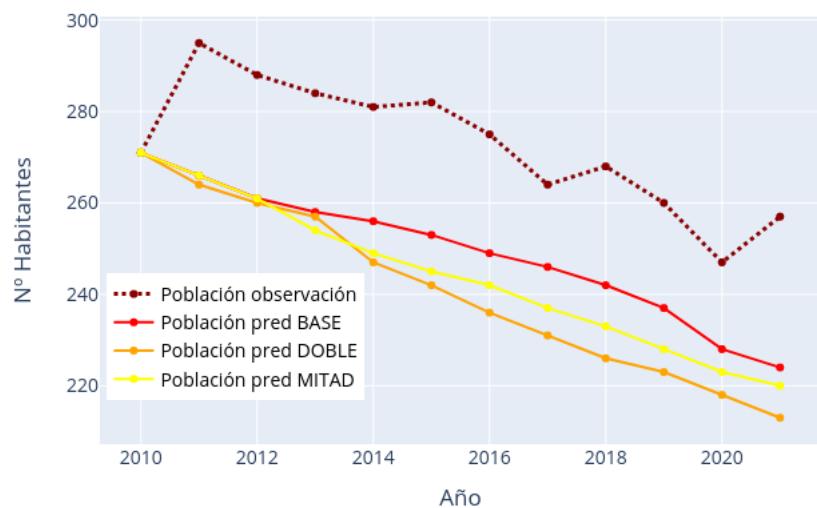


Figura 4.40: Comparación del nº de habitantes en Las Rozas de Valdearroyo. 2010 – 2021.

Comparación de PIRÁMIDE POBLACIONAL de Las Rozas de Valdearroyo en 2021

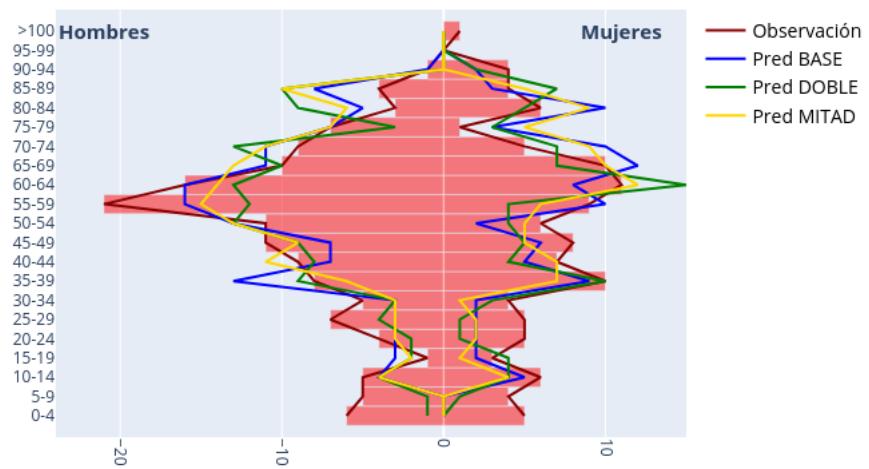


Figura 4.41: Comparación de la pirámide poblacional en Las Rozas de Valdearroyo. 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN VEGETATIVA en Las Rozas de Valdearroyo

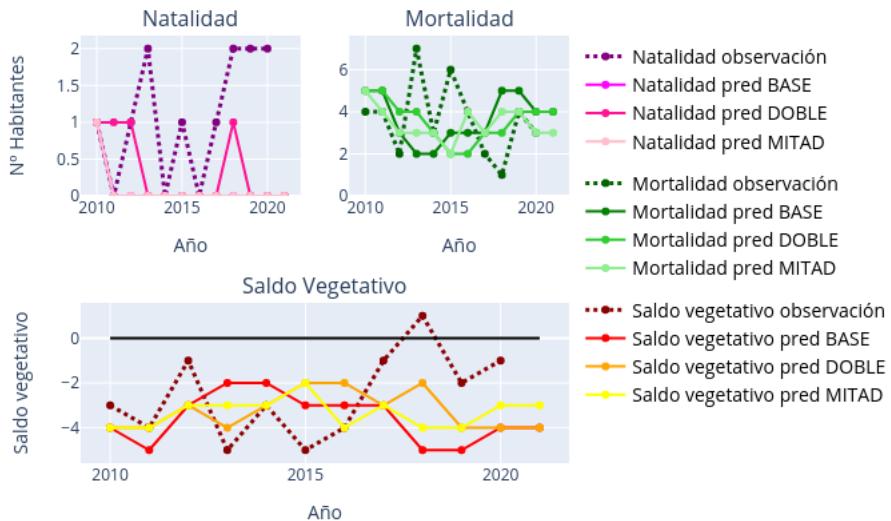


Figura 4.42: Comparación de la evolución vegetativa en Las Rozas de Valdearroyo. 2010–2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN MIGRATORIA en Las Rozas de Valdearroyo

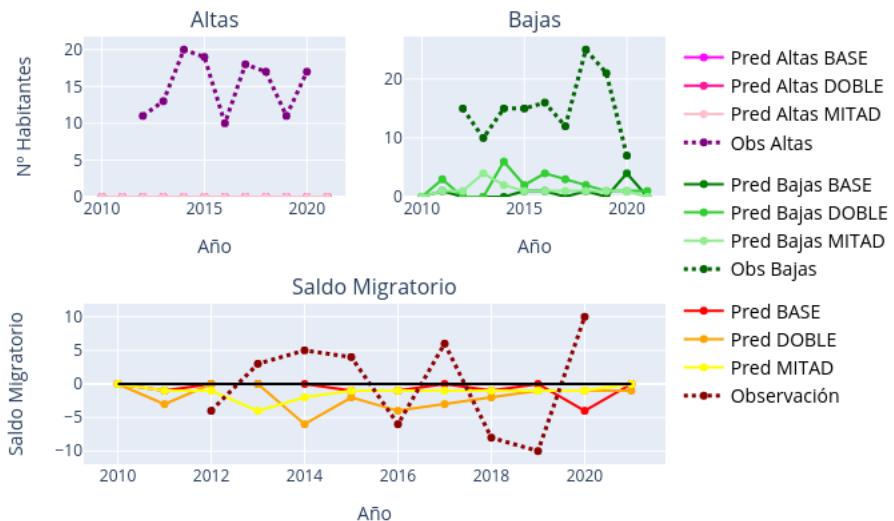


Figura 4.43: Comparación de la evolución migratoria en Las Rozas de Valdearroyo. 2010 – 2021.

## Resultados en San Miguel de Aguayo

Comparación de POBLACIÓN en San Miguel de Aguayo

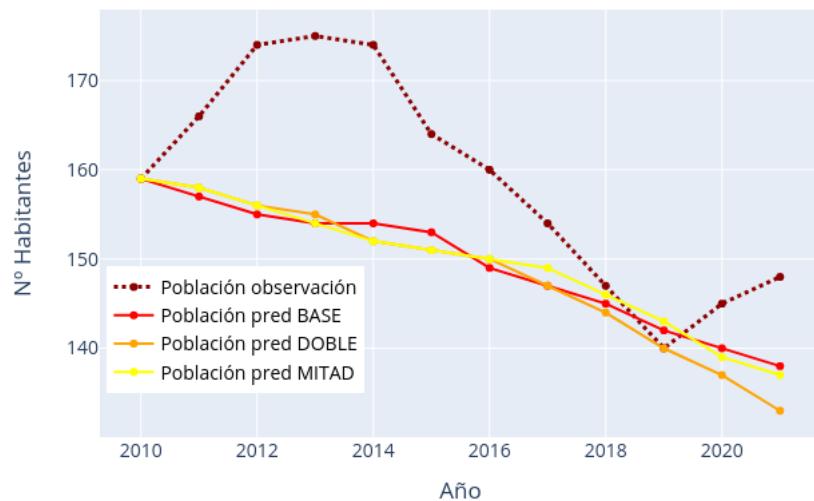


Figura 4.44: Comparación del nº de habitantes en San Miguel de Aguayo. 2010 – 2021.

Comparación de PIRÁMIDE POBLACIONAL de San Miguel de Aguayo en 2021

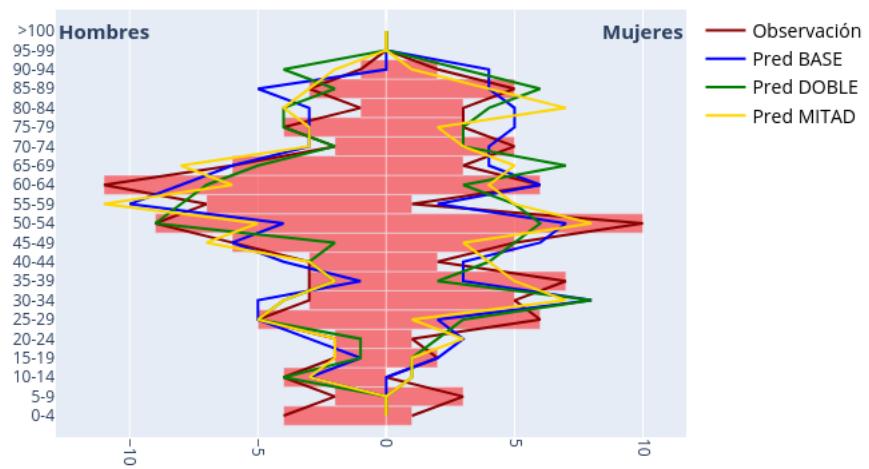


Figura 4.45: Comparación de la pirámide poblacional en San Miguel de Aguayo. 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN VEGETATIVA en San Miguel de Aguayo

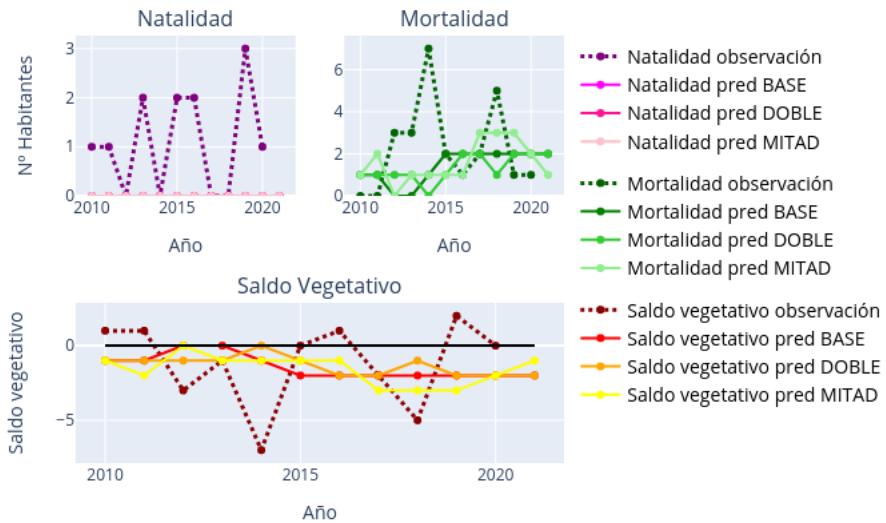


Figura 4.46: Comparación de la evolución vegetativa en San Miguel de Aguayo. 2010 – 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN MIGRATORIA en San Miguel de Aguayo

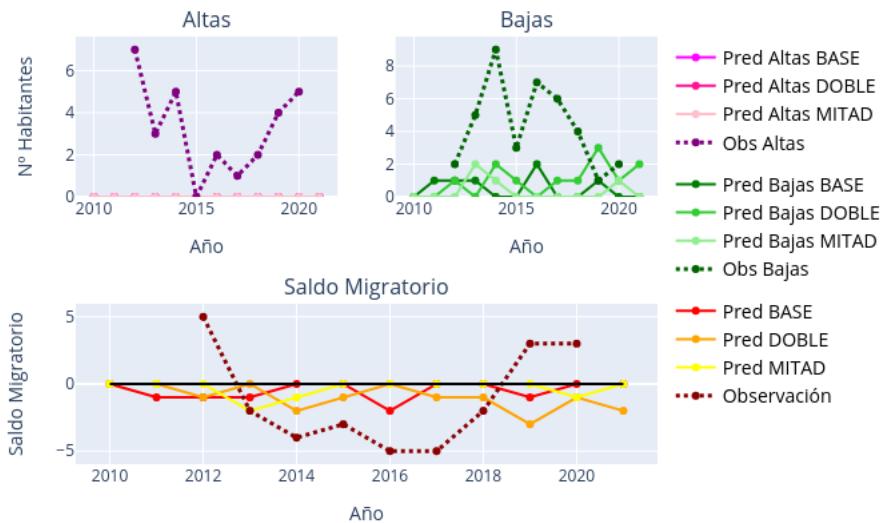


Figura 4.47: Comparación de la evolución migratoria en San Miguel de Aguayo. 2010 – 2021.

## Resultados en Santiurde de Reinosa

Comparación de POBLACIÓN en Santiurde de Reinosa

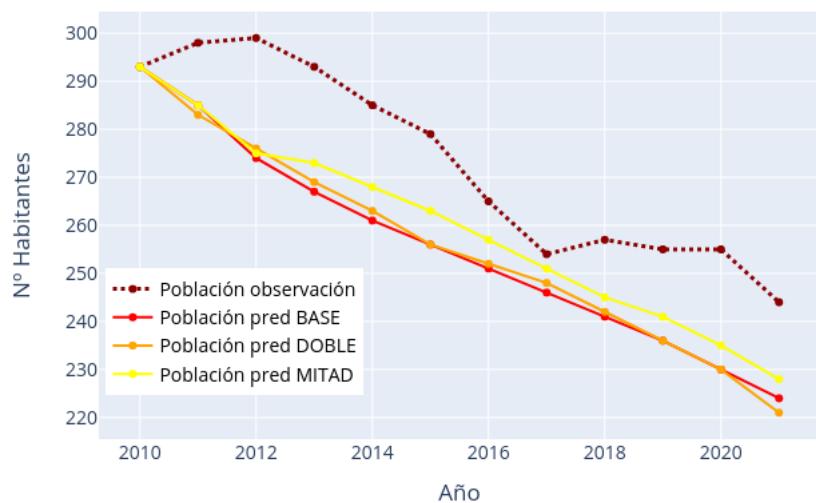


Figura 4.48: Comparación del nº de habitantes en Santiurde de Reinosa. 2010 – 2021.

Comparación de PIRÁMIDE POBLACIONAL de Santiurde de Reinosa en 2021

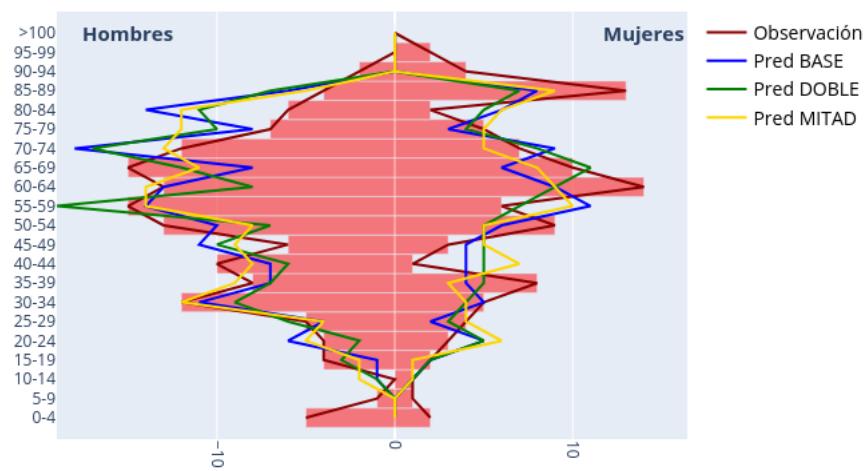


Figura 4.49: Comparación de la pirámide poblacional en Santiurde de Reinosa. 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN VEGETATIVA en Santiurde de Reinosa

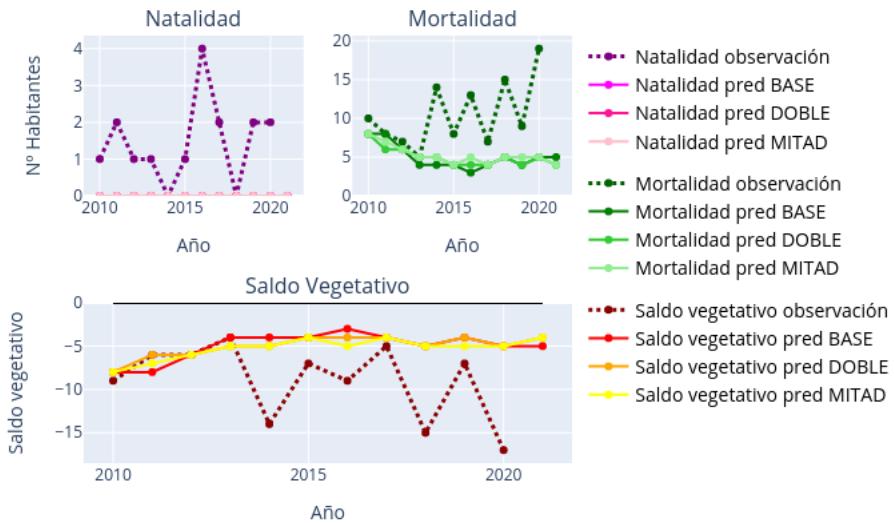


Figura 4.50: Comparación de la evolución vegetativa en Santiurde de Reinosa. 2010 – 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN MIGRATORIA en Santiurde de Reinosa

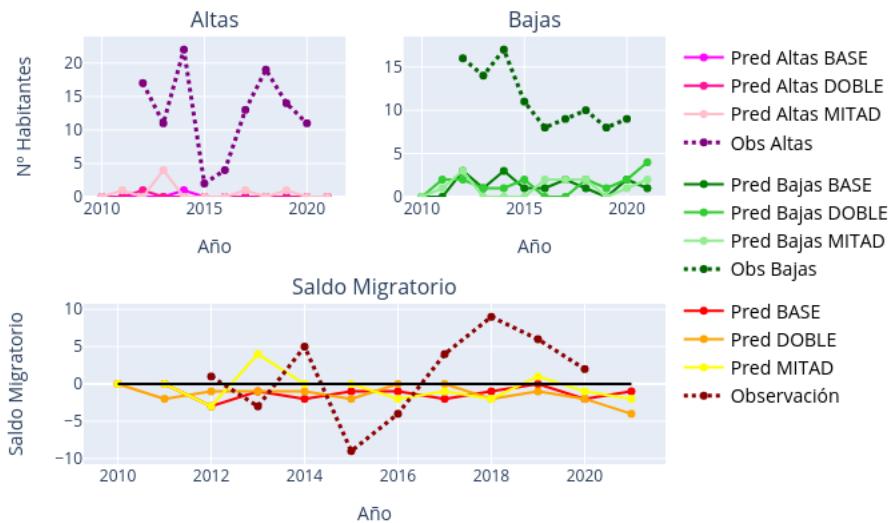


Figura 4.51: Comparación de la evolución migratoria en Santiurde de Reinosa. 2010 – 2021.

## Resultados en Valdeolea

Comparación de POBLACIÓN en Valdeolea

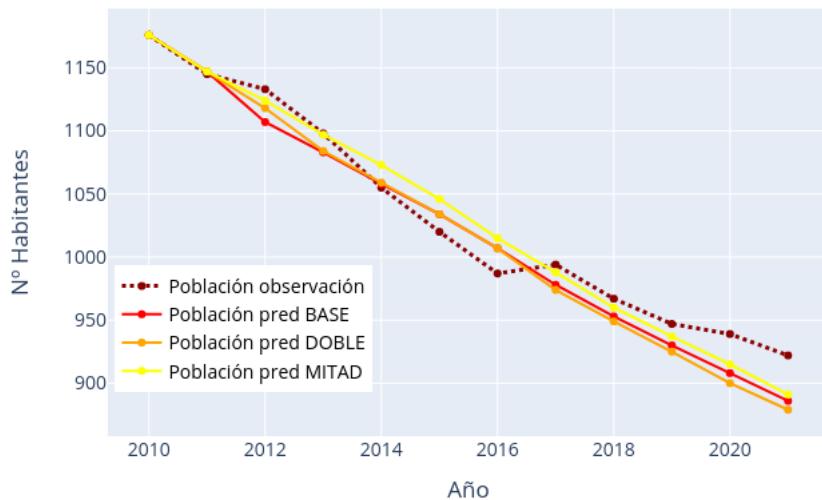


Figura 4.52: Comparación del nº de habitantes en Valdeolea. 2010 – 2021.

Comparación de PIRÁMIDE POBLACIONAL de Valdeolea en 2021

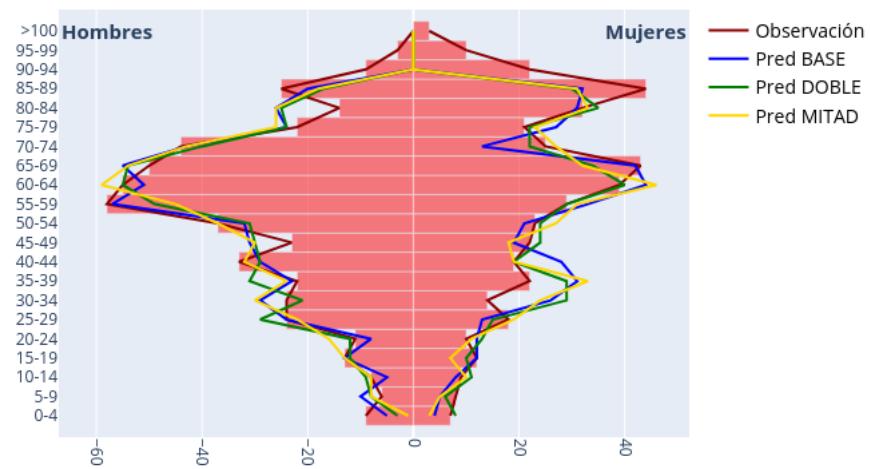


Figura 4.53: Comparación de la pirámide poblacional en Valdeolea. 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN VEGETATIVA en Valdeolea

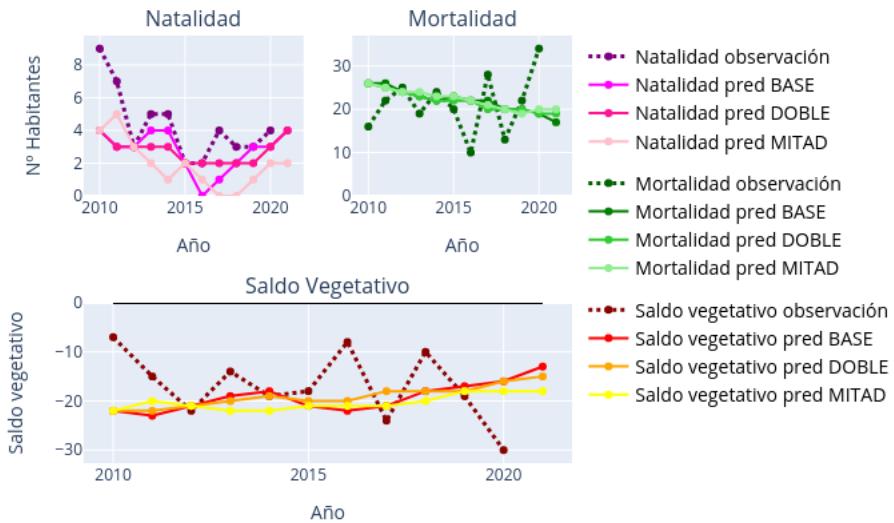


Figura 4.54: Comparación de la evolución vegetativa en Valdeolea. 2010 – 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN MIGRATORIA en Valdeolea

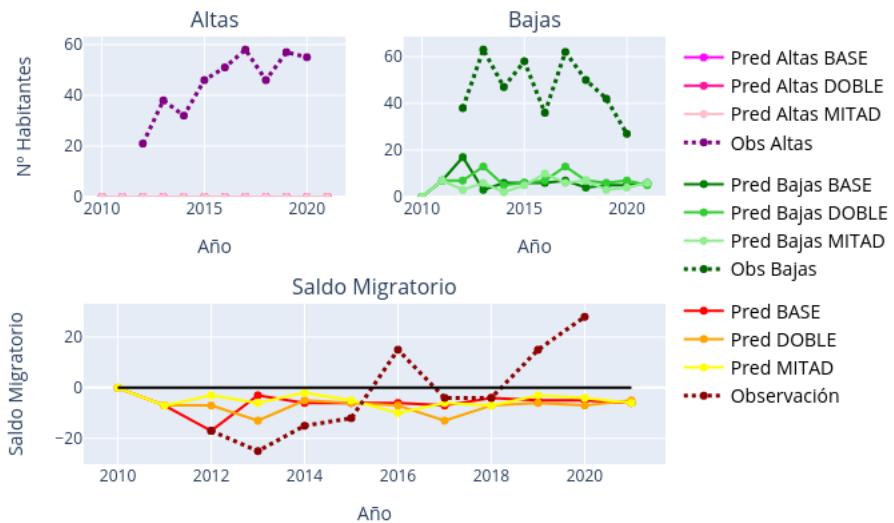


Figura 4.55: Comparación de la evolución migratoria en Valdeolea. 2010 – 2021.

## Resultados en Valdeprado del Río

Comparación de POBLACIÓN en Valdeprado del Río

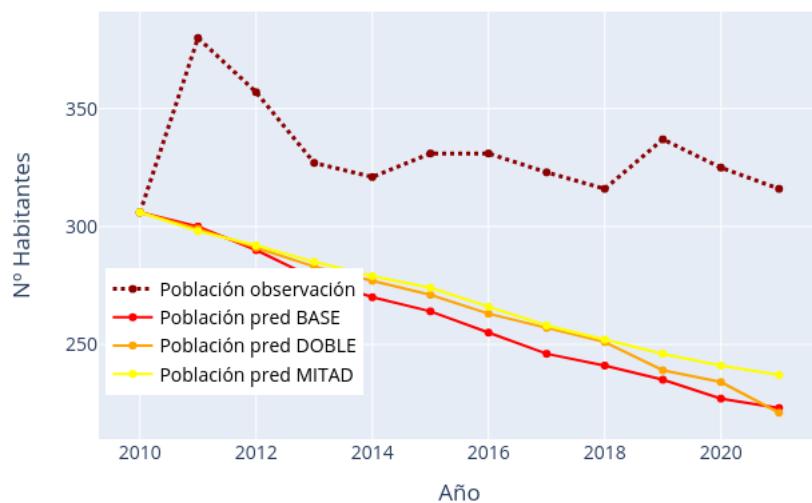


Figura 4.56: Comparación del nº de habitantes en Valdeprado del Río. 2010 – 2021.

Comparación de PIRÁMIDE POBLACIONAL de Valdeprado del Río en 2021

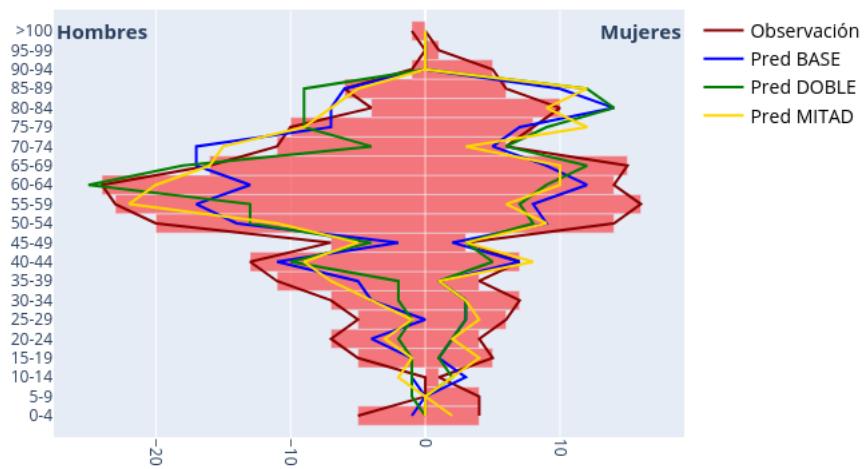


Figura 4.57: Comparación de la pirámide poblacional en Valdeprado del Río. 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN VEGETATIVA en Valdeprado del Río

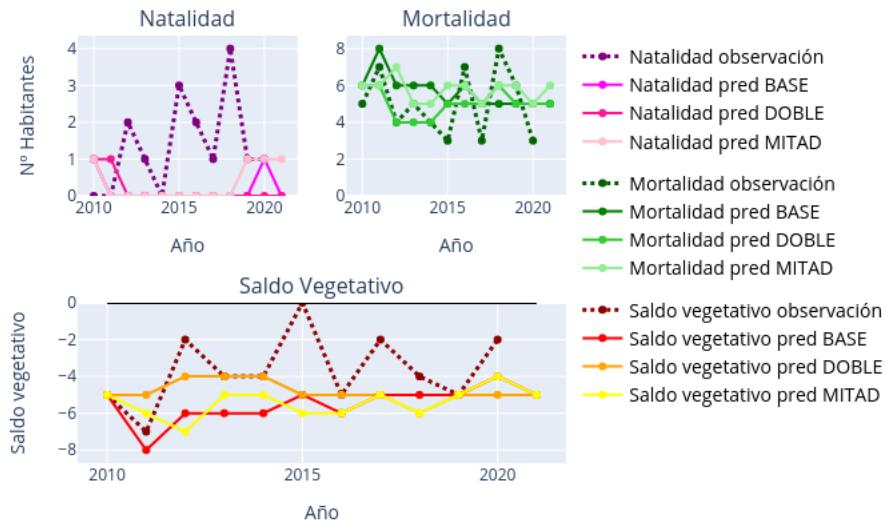


Figura 4.58: Comparación de la evolución vegetativa en Valdeprado del Río. 2010 – 2021.

### Comparación de EVOLUCIÓN MIGRATORIA en Valdeprado del Río

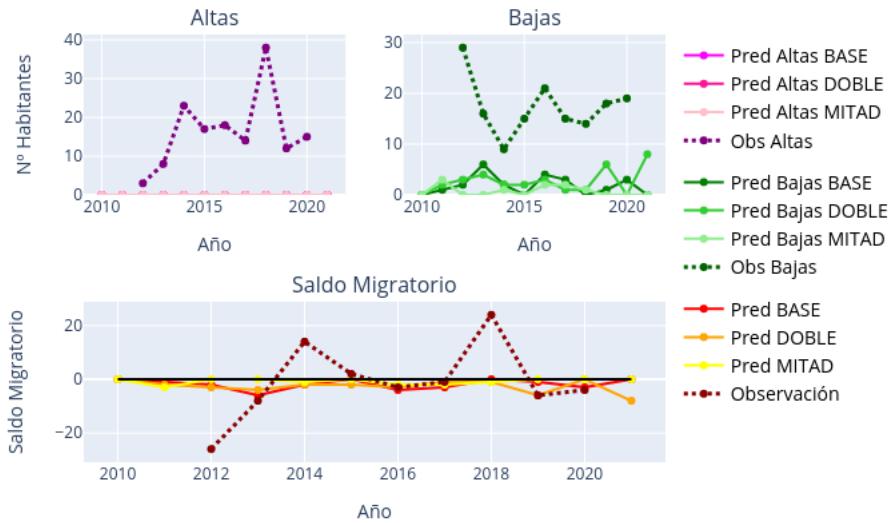


Figura 4.59: Comparación de la evolución migratoria en Valdeprado del Río. 2010 – 2021.



