

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**Para optar al título de Máster en hidrología y gestión de los recursos
hídricos**

**PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA POTABLE EN UN
CONTEXTO DE CRISIS HUMANITARIAS. CASO DE RHAROUS
(MALI).**

**PREDICTION OF THE DEMAND FOR DRINKING WATER IN A
CONTEXT OF HUMANITARIAN CRISIS. RHAROUS CASE (MALI).**

Presentado por: D. Oumar Abdou Salam Maiga

Dirigido por: Dr. Angel Udias

Septiembre 2019



AGRADECIMIENTOS

Al Todopoderoso, por darme vida, salud y sabiduría para culminar este proyecto.

Al Doctor Ángel Udías por su invaluable colaboración a través de sus aportes, comentarios y sugerencias en el desarrollo de este proyecto.

Muy sinceramente le agradezco a quienes fueron mis profesores, por ser el pilar fundamental en el proceso de mi formación.

A las Universidades de Alcalá y Rey Juan Carlos, por ser las encargadas de mi formación actual.

A las Universidades cubanas de Oriente y de Granma, por haberme enseñado el idioma español y formarme en ingeniería hidráulica.

Agradezco profundamente a mi familia, por ser mi mayor inspiración y razón de ser, por la confianza depositada y su apoyo incondicional.

CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	1
LISTA DE FIGURAS.....	2
RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
1. INTRODUCCIÓN:.....	6
Antecedentes:	7
Justificación	8
2. OBJETIVOS.....	11
3. METODOLOGIA.....	12
3.1. Generalidades sobre los métodos de pronósticos.....	12
3.2. Elección del método de predicción:.....	13
3.3. Procedimiento para la predicción de la demanda:	13
3.3.1. Análisis preliminar de las series de datos existentes	14
3.3.2. Creación de modelos causales basado en las series de las variables registradas....	14
3.3.3. Creación de un Modelo ARIMA basado en la principal variable predictora	16
3.3.4. Creación de un Modelo basado en las principales variables predictoras	19
4. CASO DE ESTUDIO	20
4.1. Características de la localidad	20
4.1.1. Ubicación de Gourma Rharous.....	20
4.1.2. Vías de Acceso:.....	20
4.1.3. Clima.....	20
4.1.4. Relieve:	21
4.2. Sistema de Abastecimiento de agua de la ciudad de Rharous	21
4.2.1. Fuente de Abastecimiento:	22
4.2.2. Tanque:.....	22
4.2.3. Sistema de distribución de agua	22
4.2.4. Gestión del acueducto de Rharous:	24
4.3. Recopilación de las series de datos existentes.	24
4.3.1. Consumo de agua:.....	25
4.3.2. Población:.....	25
4.3.3. Temperatura y humedad:	25
5. RESULTADOS	26
5.1. Análisis descriptivo de las series de datos:	26
5.1.1. Población.....	26
5.1.2. Temperatura y la humedad relativa.....	27

5.1.3. Demandas/Consumos	28
5.2. Análisis de Correlación:	29
5.3. Modelo basado en regresión lineal.....	31
5.4. Modelo ARIMA basado en la población	33
5.5. Modelo de predicción de la componente estacional a partir de variables climáticas.....	37
6. CONCLUSIONES	40
7. RECOMENDACIONES	42
8. BIBLIOGRAFÍAS:.....	43
ANNEXOS.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS

OCHA: Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios

(Siglas en inglés)

DNH: Dirección nacional de recursos hidráulicos (Siglas en francés)

DRH: Dirección regional de recursos hidráulicos (Siglas en francés)

CICR: Comité internacional de recursos hidráulicos (Siglas en francés y/o español)

IDMC: Centro de Monitoreo de desplazamientos internos (Siglas en inglés)

ONGH: Organismos no gubernamentales humanitarios

UNICEF: El Fondo de las *Naciones Unidas para la Infancia* (Siglas en inglés)

PDI: Personas desplazadas internas (Siglas en inglés)

UNHCR: la Agencia *de la ONU para los Refugiados*.

INSTAT: *Instituto nacional de estadística* (Siglas en francés)

FEW NET: Red de sistemas de alerta temprana de hambruna (Siglas en Inglés)

PEA: Población económicamente activa (Siglas en español)

WEP: Principios para el Empoderamiento de las Mujeres (Siglas en inglés)

UNRWA: Agencia de Naciones Unidas para los *Refugiados* de Palestina (Siglas en inglés)

ACNUR: Agencia de la ONU para los *Refugiados* (Siglas en inglés)

ARIMA: Autoregressive integrated moving average (Siglas en inglés)

LS: Mínimos cuadrados o least squares (siglas en inglés)

ARMA Autoregressive–moving–average model (siglas en inglés)

SSR: Suma de los cuadrados de los residuales o sum of squared residual (siglas en inglés)

FAS: Función de autocorrelación simple (Siglas en español)

FAP: funciones de autocorrelación parcial (Siglas en español)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolución por categorías de los desplazamientos forzados de población a nivel mundial entre 2009 y 2018

Figura 2: Evolución del número de personas desplazadas internas (PDI) y refugiados de 2012 hasta 2018

Figura 3: Clasificación métodos de pronósticos

Figura 4: Tabla de clasificación de G.DE LANDSHEERE

Figura 5: Proyecciones.

Figura 6: Metodología para la predicción con modelo ARIMA.

Figura 7: Mapas de ubicación de la ciudad de Rharous (izquierda), y plano de detalle de la ciudad (derecha)

Figura 8: La temperatura promedio por hora, codificada por colores en bandas.

Figura 9: Tanque de 50 m³ de Rharous

Figura 10: fuentes públicas de distribución de agua

Figura 11: Sistema de distribución de Rharous

Figura 12: Evolución de la población total de 2013 hasta 2018

Figura 13: Evolución de las categorías de la población de 2013 hasta 2018

Figura 14: Evolución de la temperatura media de 2013 hasta 2018

Figura 15: Evolución de la humedad relativa de 2013 hasta 2018

Figura 16: Evolución de la población total (arriba) y la demanda total de agua de la ciudad (abajo) entre 2013 y 2018.

Figura 17: Evolución de la demanda media por habitante entre 2013 y 2018

Figura 18: Media móvil semanal y mensual

Figura 19: Correlación entre las variables.

Figura 20: Resultados del modelo 1

Figura 21: Resultados del modelo 2

Figura 22: Importancia de las variables para predecir la demanda

Figura 24: Gráficos de autocorrelación y correlación parcial de la serie de la demanda por persona.

Figura 25: Componente con periodicidad semanal de la demanda

Figura 26: Separación de los componentes de la serie temporal de demanda de aguas considerando periodicidad mensual.

Figura 27: Componente con periodicidad mensual de la demanda para un periodo de 6 meses.

Figura 28: Separación de los componentes de la serie temporal de demanda de aguas considerando periodicidad anual.

Figura 29: Componente estacional de la demanda (arriba), temperatura (abajo izquierda), humedad relativa (abajo derecha)

Figura 30: los resultados de la aplicación del modelo a las variables

Figura 31: Síntesis de los resultados de la aplicación del modelo a las variables

Figura 32: Componente en negro la componente estacional de la demanda y en rojo la predicción de esa misma componente a partir de la temperatura y de la humedad.

Figura 32: Predicción de la demanda usando el nuevo modelo

RESUMEN

La calidad de gestión del abastecimiento urbano de agua muy dependiente de la capacidad para predecir la demanda. De dicha predicción depende conseguir objetivos fundamentales, como la obtención de un suministro continuado con la presión y calidad de servicio adecuadas. En este sentido, durante décadas se han ido proponiendo diferentes métodos para la predicción de la demanda: desde los clásicos modelos ARIMA, hasta los actuales métodos de Aprendizaje Automático. En este trabajo se aplican método de predicción de la demanda de agua potable a un contexto de crisis humanitario generado por el conflicto, a partir de series de consumos de agua y de las variables demográficas y climáticas. Tras aplicar diversos modelos, se optó por uno que combina modelos de regresión y modelos de ARIMA. La componente estacional y la tendencia contribuyen respectivamente a un 65% y 13% de la variabilidad de la demanda. Otras variaciones periódicas (semanales y mensuales) socioculturales, suponen un 2%. El error del modelo de regresión que predice la componente estacional, la parte no explicada de la predicción realizada por los modelos ARIMA es aproximadamente el 3.5% de la demanda total. Con todos estos componentes se dispone de un modelo de predicción capaz de estimar con bastante fiabilidad, la demanda total, a partir del tamaño de la población y del clima y del día del mes.

ABSTRACT

The quality of urban water supply management is highly dependent on the ability to predict demand. The achievement of fundamental objectives, such as obtaining a continuous supply with adequate pressure and quality of service, depends on this prediction. In this sense, for decades different methods have been proposed for the prediction of demand: from the classic ARIMA models to the current methods of Automatic Learning. In this work, a method of predicting the demand for drinking water is applied to a context of humanitarian crisis generated by the conflict, based on series of water consumption and demographic and climatic variables. After applying different models, one was chosen that combines regression models and ARIMA models. The seasonal component and the trend contribute respectively to 65% and 13% of the variability of demand. Other sociocultural periodic (weekly and monthly) variations account for 2%. The error of the regression model predicted by the seasonal component. The unexplained part of the prediction made by the ARIMA models is approximately 3.5% of total demand. With all these components, a prediction model is available that is capable to estimate total demand fairly reliably, based on the size of the population and the climate and the day of the month.

1. INTRODUCCIÓN:

Las situaciones de emergencia originadas por fenómenos naturales y conflictos armados provocan el desplazamiento de las poblaciones afectadas, esta situación exige una atención urgente de las autoridades y organizaciones internacionales humanitarias responsabilizadas con la mitigación del impacto de estos desastres. En 2018, se registraron 28 millones de nuevos desplazamientos: 17,2 millones por desastres naturales y 10,8 millones por conflictos o violencia (IDMC, 2019) ubicándose en África subsahariana los mayores movimientos forzados de población a causa de conflictos, con casi 7,5 millones o sea el 69% del total.

En la figura 1, se puede apreciar la magnitud de estos desplazamientos a nivel mundial según cuatro categorías : internos, refugiados ACNUR, refugiados UNRWA y solicitantes de asilo.

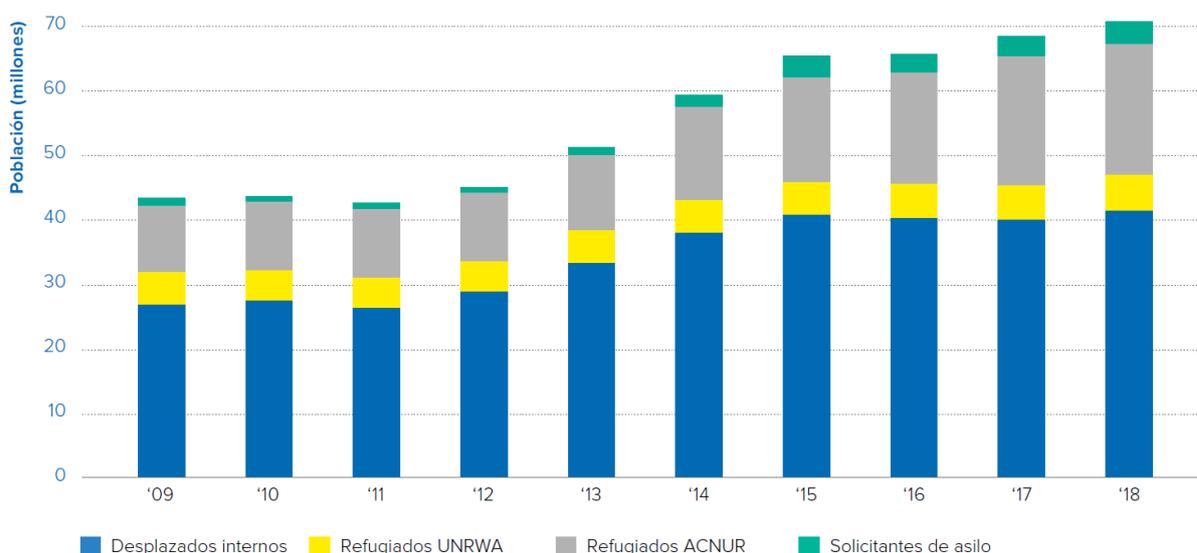


Figura 1: Evolución por categorías de los desplazamientos forzados de población a nivel mundial entre 2009 y 2018 (UNHCR, 2019).

Durante estos eventos naturales y conflictos armados, el número de personas que demandan acceso a los servicios de agua y saneamiento es mucho mayor que los muertos, heridos, albergados o población que necesita atención médica (Defensora del pueblo Ecuador, 2016).

El mismo estudio demuestra que la suspensión de los servicios de agua y saneamiento agudiza los efectos negativos que se generan en estas situaciones y causa aún más sufrimiento que el propio siniestro. Debido a esto, el agua y saneamiento deben figurar

entre las prioridades en casos de conflictos o desastres naturales porque cuanto más rápidas y efectivas sean las medidas, menores serán los riesgos ambientales que pueden derivar en brotes epidémicos (CICR, 2009).

Antecedentes:

En el contexto africano, a pesar de disponer de abundantes recursos hídricos más de 320 millones de personas no tiene acceso al agua potable, esta situación se ve fundamentalmente en las regiones en conflictos armados y en las zonas alejadas de las principales fuentes fluviales. En el caso específico de la República de Mali, la tasa de cobertura en agua potable se estima en 68 %, se cuenta con dos de los ríos continentales más importantes: el río Níger, con 4160 km de longitud y el río Senegal de 1600 km de largo y dispone además de importantes reservas en lagos y acuíferos subterráneos. No obstante, 2/3 del territorio que abarca este país en conflicto no dispone de suficientes recursos hídricos para gestionar el desarrollo de actividades y procesos en los cuales interviene el agua, debido a la irregular repartición temporal y espacial de los mismos (DNI, 2019).

En el contexto de la República de Mali, las consecuencias del cambio climático, así como la crisis política y de inseguridad que enfrenta el país, han conllevado a declarar condiciones de crisis humanitaria. Esta condición se agrava debido a la gestión deficiente de los recursos de que dispone el país y a la falta de voluntad política de las personas e instituciones encargadas de hacer realidad las soluciones necesarias para enfrentar los diversos fenómenos antrópicos y naturales que deterioran los medios de subsistencia del país y limitan la capacidad de respuesta del Estado (UNICEF, 2015).

Esta situación se hizo más crítica a partir del conflicto armado y el golpe de estado perpetrado en el año 2012, lo cual provocó daños importantes en la infraestructura de los sistemas de abasto y saneamiento fundamentalmente en las regiones Central y Norte del país. A pesar del orden institucional establecido luego de la intervención francesa durante el año 2013, la situación continuó siendo inestable en las regiones anteriormente referidas, debido a que persistían los enfrentamientos entre grupos armados, los ataques contra el ejército institucional y la indisciplina social, así como por la ocurrencia de fenómenos de sequía e inundaciones que de manera cíclica se presentaban, generando epidemias, inestabilidad en los mercados y pobreza crónica en una parte importante del territorio (OCHA, 2015).

En la figura 2 se muestra la evolución las personas desplazadas como consecuencias del contexto de inseguridad descrita en los párrafos anteriores.

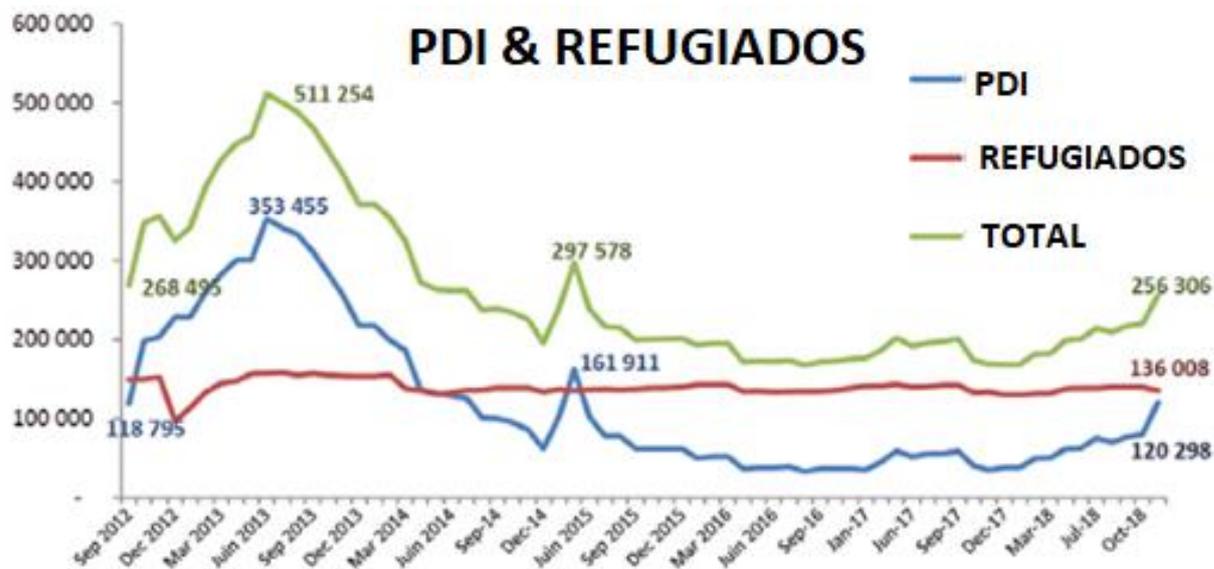


Figura 2: Evolución del número de personas desplazadas internas (PDI) y refugiados de 2012 hasta 2018 (<http://data.unhcr.org/SahelSituation/country.php?id=501>)

En términos de cifras se reportan indicadores que evidencian las condiciones de crisis humanitaria generada: La tasa de acceso al agua y la distancia media a recorrer para abastecerse del preciado líquido, no cumplen los requisitos exigidos en las normas de consumo establecidas (DNH, 2019), el 57 % de los sistemas de suministro de agua fueron afectadas por el conflicto armado (Cluster wash, 2016). A pesar de los esfuerzos hechos, más de 1 260 000 personas no tienen acceso a suficiente agua para satisfacer sus necesidades, muchos de los acueductos rehabilitados presentan deficiencias en el funcionamiento debido a problemas para satisfacer demandas cambiantes de poblaciones residentes y desplazados. (OCHA MALI, 2019).

Justificación

El uso del agua en los centros urbanos es dinámico, varía entre la población que se quiere atender y tiende a aumentar con el tiempo (Dube y Van der Zaag, 2003). Por lo anterior, durante mucho tiempo se ha tratado de pronosticar el comportamiento futuro de la demanda de agua urbana para su adecuado aprovechamiento y consumo.

La estimación correcta de la demanda de agua potable representa una condición indispensable para la planificación y el diseño de los sistemas de suministro, que en gran

medida determina las inversiones necesarias y calidad del servicio (Tzatchkov y Alcocer-Yamanaka, 2016).

En la actualidad, uno de los principales desafíos a los que las empresas de acueductos situadas en zonas de crisis humanitarias se enfrentan, son los cambios bruscos de poblaciones y a veces de comportamiento de estas, que provocan fluctuaciones inesperadas de la demanda de agua en contextos normales de paz y desarrollo. Estos fenómenos traen como consecuencia dificultades en el suministro de agua de ciudades ubicadas en estas zonas, surgiendo de esto la necesidad de disponer de una herramienta de predicción de la demanda de agua en estos contextos que ayuda a establecer los criterios necesarios para planificar el funcionamiento de los sistemas y los proyectos necesarios para garantizar el acceso al vital líquido. (DNH, 2018 y 2019).

Este tipo de planificación se ve afectada por el hecho de que las demandas de suministro dependen además de la estación, del mes, del día de la semana e incluso de la hora del día considerados. Para poder hacer frente a las necesidades de suministro de una manera eficiente y fiable, la empresa suministradora ha de ser capaz de anticipar con cierta precisión las variaciones probables de la cantidad demandada de agua. Si la cantidad demandada acaba siendo mucho menor que la prevista, se habrán despilfarrado recursos. Si la cantidad demandada es mayor que la proyectada, habrá que imponer restricciones de uso. Esto reduce la fiabilidad del sistema y se traduce en excesivos costes adicionales (Boland, 1997).

Para la estimación de demanda de agua en proyectos del contexto de crisis humanitario del norte de Mali, se utilizan métodos de proyección de población y dotaciones que provienen de valores teóricos o estándar. Entre los métodos tradicionales de proyección de población se encuentran el método aritmético, el método geométrico, método de la variación logarítmica, método de la tasa decreciente; los cuales son basados en información de censos y tasas de crecimiento de la región. (DNH, 2009)

Según los reportes de las mesas redondas realizadas por Dirección Regional de Recursos Hidráulicos (DRH) de Tombouctou en febrero de 2019, los modelos de predicción actualmente utilizados no han aportado resultados confiables (imprecisión) desde la complicación de la crisis humanitaria en el año 2013 hasta el presente, dado que no consideran otros factores adicionales que modifican la demanda de agua (por ejemplo, la temperatura). Esta situación ha afectado mucho la calidad de los servicios en muchas

ciudades del norte de Mali generándose gastos innecesarios en insumos para la potabilización, materiales para el mantenimiento y reparación.

Por otro lado, la proyección de la demanda basada en las metodologías actuales del contexto ha llevado a los proyectistas de los organismos no gubernamentales humanitarios (ONGH) a hacer sobredimensionamiento de las obras creando problemas en la operación y mantenimiento. Así, en el informe anual de febrero del 2018, la DRH de Tombouctou informó que muchos de los acueductos ejecutados desde el año 2013 presentan deficiencias en el funcionamiento debido a problemas en las demandas utilizadas para sus diseños.

Estos elementos infieren la necesidad de desarrollar investigaciones que proporcionen la base para una mejor comprensión del comportamiento de la demanda en contextos de crisis humanitarias introduciendo dinámicas poblacionales en las estimaciones de demanda de agua, ya que dichas dinámicas están articuladas y estrechamente ligadas a los consumos de agua que demanda la población. Estas dinámicas incluyen factores sociales, económicos y territoriales de la demanda.

Las publicaciones científicas relacionadas con la temática de modelación de la demanda de agua en contextos de crisis humanitaria generados por conflictos armados son escasas. Los proyectistas usan las mismas metodologías y enfoques de recolección de datos que se utilizan para contextos diferentes y los estudios están basados en criterios sujetos en la experiencia de los proyectistas dado que no se ha definido las metodologías apropiadas para estos casos.

2. OBJETIVOS

Este proyecto final de máster tiene como objetivo general: Predecir el comportamiento de la demanda de agua potable utilizando las series de consumos de agua y de las variables demográficas y climáticas en un contexto de crisis humanitaria.

Para concretar este reto, será necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar y analizar de las series de consumos de agua, de las variables demográficas y climáticas en un contexto de crisis humanitaria
- Encontrar un modelo adecuado para la predicción de la demanda de agua suministrada mediante acueductos con énfasis en situaciones de crisis humanitaria
- Validar dicho modelo en un escenario específico del norte de Mali.

Estructura de la memoria.

El resto de la tesis está organizado de la manera siguiente:

En **METODOLOGIA**, se describe la metodología propuesta para abordar el problema de pronóstico de la demanda de agua de esta ciudad que se encuentra en una situación de crisis.

En **CASO DE ESTUDIO** se describe el sistema sujeto a pronóstico. Se muestran análisis preliminares de las series que representan la demanda de efectivo en donde se muestran sus características de estacionalidad, tendencia y alta variación.

En el **RESULTADOS** se analizan los resultados que se obtienen al seguir la metodología propuesta.

Finalmente, se da una conclusión al trabajo presentado, así como recomendaciones para el desarrollo de trabajos futuros.

3. METODOLOGIA

3.1. Generalidades sobre los métodos de pronósticos

Nahmias (2007) afirma que existen aproximadamente 70 métodos para realizar pronósticos, y este autor propone una clasificación general en métodos cualitativos o cuantitativos.

El enfoque cualitativo valora la experiencia y se aprovecha de opiniones para construir pronósticos en forma subjetiva; son usados cuando se carece de información histórica. Por lo contrario, los cuantitativos requieren de información histórica para estimar los valores futuros de la variable de interés (PYME, 2017).

Existen dos técnicas de pronóstico cuantitativos, el modelo causal que se basa en un procedimiento matemático llamado análisis de regresión que relaciona una variable dependiente con una variable independiente a través de una ecuación (Moreno, 2008); y las de series de tiempo que son modelos de proyección histórica que se manejan cuando existen los suficientes registros, pudiendo predecir valores futuros de la variable de interés, suponiendo que el patrón histórico de los datos continuará (Masini & Vazquez, 2014).

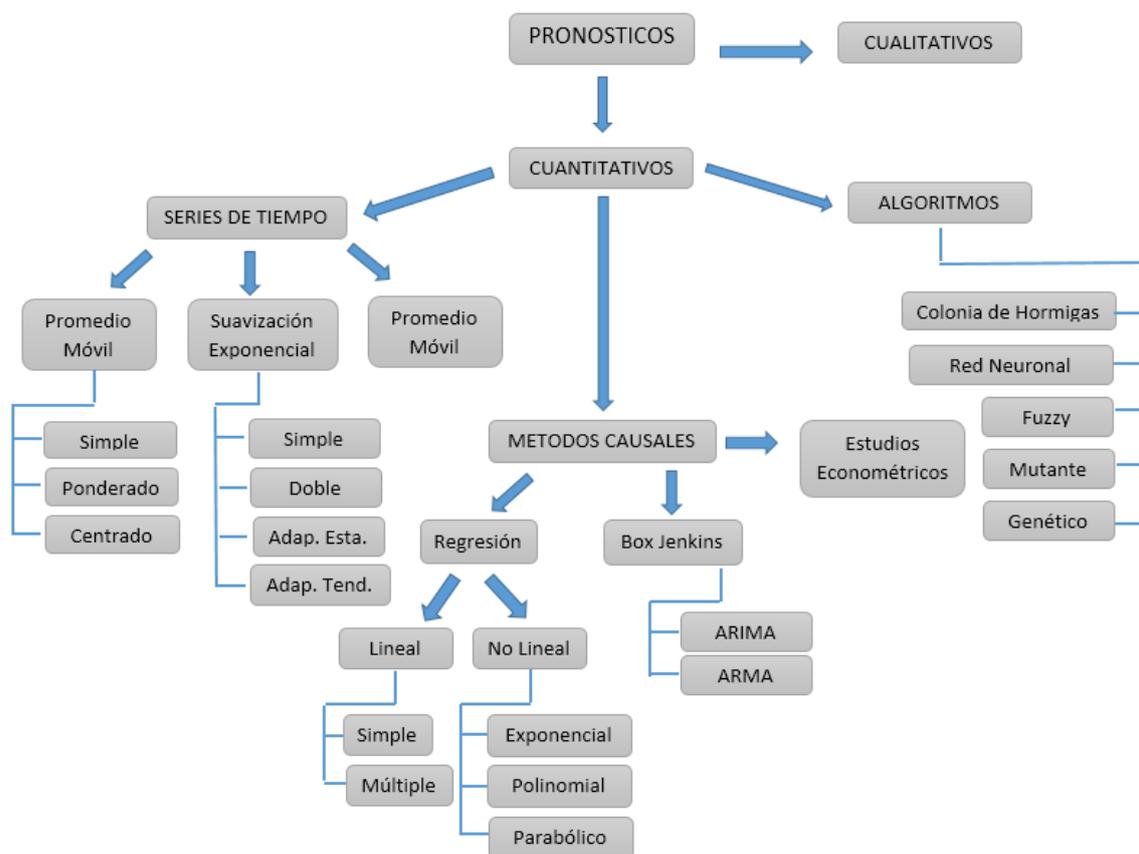


Figura 3: Clasificación métodos de pronósticos (Zapata T, López S, Silva G. Clasificación métodos de pronósticos, 2017, Bogotá D.C)

3.2. Elección del método de predicción:

La metodología elegida para realizar este proyecto es el método de las series temporales dado que han dado históricamente buenos resultados en la predicción de variables para los cuales se dispone de series históricas. (Pavón, 2019).

Así, según varias investigaciones, los métodos de análisis de series temporales son los más apropiados para estudiar la estructura temporal que presenta la demanda del agua, la cual podría estar influenciada por variables demográficas de los hogares como cantidad de personas que los conforman y número de hombres y mujeres; variables relacionadas con características de la vivienda; y variables de clima (Danielson, 1979; Foster y Beattie, 1979; Maidment y Parzen, 1984; Nieswiadomy e Molina, 1989; Espey, Espey & Douglass, 1997; Hanemann, 1998; Höglund, 1999; Arbués et al., 2003; Dalhuisen et al., 2003; Olmstead et al., 2007; Worthington & Hoffman 2008; Sebri, 2014).

Siguiendo la lógica de estos autores al analizar series temporales, la influencia de la tendencia debe diferenciarse de las variaciones periódicas, y el modelo creado debe constar de cuatro componentes:

- ❑ Variaciones tendenciales y cíclicas a largo plazo asociadas con el desarrollo del centro urbano, la expansión del área de suministro y con cambios en factores socioeconómicos.
- ❑ Variaciones estacionales asociadas con variaciones naturales del clima y con factores económicos, como cambios en actividad comercial e industrial.
- ❑ Componentes irregulares derivados de acontecimientos pasados (autocorrelación) que están constituidos por oscilaciones no sistemáticas que se caracterizan por tener una estructura puramente aleatoria. En general, estas sólo afectan a la serie en el momento en que ocurren y suelen ser de muy corta duración.
- ❑ Componentes irregulares relacionados con los factores que afectan el consumo de agua (por ejemplo, las condiciones climáticas).

3.3. Procedimiento para la predicción de la demanda:

El procedimiento propuesto está descrito en las etapas siguientes:

3.3.1. Análisis preliminar de las series de datos existentes

El objetivo del análisis preliminar es identificar las características generales de la serie temporal en estudio para contar con argumentos con los cuales tomar decisiones respecto al tipo de modelo estadístico que le será ajustado posteriormente. Se realizará un análisis cualitativo y cuantitativo de la serie de demandas, considerando la serie completa, así como series individualizadas por año. Se hará un análisis descriptivo de estadística clásica y de métodos gráficos con el fin de identificar características relevantes que nos expliquen rasgos del comportamiento de la serie.

Además de lo anterior un estudio de correlación será hecha con fin de analizar el nivel de relación entre las variables. En esta fase, se hará teniendo en cuenta la clasificación de G.DE LANDSHEERE (1979).

Intervalo en que sitúa el coeficiente de correlación	Clasificación
$r > 0.8$	Correlación muy fuerte
$0.6 < r < 0.8$	Correlación fuerte
$0.4 < r < 0.6$	Correlación media
$0.25 < r < 0.4$	Correlación débil
$r < 0.25$	Correlación muy débil

Figura 4: Tabla de clasificación de G.DE LANDSHEERE

3.3.2. Creación de modelos causales basado en las series de las variables registradas

Los métodos causales son aquellos donde existe un factor causal el cual influye en los datos de una manera conocida y puede ayudar al pronóstico. Conocidos también como modelos asociativos; estos asumen que el elemento a pronosticar muestra una relación causa-efecto con una o más variables independientes. (López y Zuluaga, 2018)

En nuestro caso, el propósito de la creación de estos modelos es representar la forma de relación entre las variables y usarla para predecir valores futuros de la variable dependiente. Se espera por ejemplo que se pueda utilizar la población y la temperatura para predecir el comportamiento de la temperatura.

Dentro de los métodos causales mayormente utilizados se encuentran las técnicas de regresión (Contreras, Atziry, Martínez y Sánchez, 2016).

En la figura se visualizan las proyecciones que se generan cuando se modelan regresiones (Esparza, 2008).

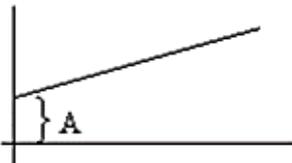
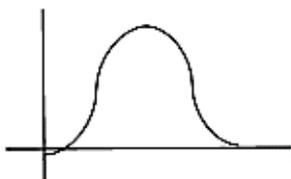
TIPOS DE PROYECCIÓN	ECUACIÓN F (TIEMPO)	GRAFICO
Proyección lineal	$Y = A + EX$	
Proyección Exponencial	$Y = ae^{bx}$	
Proyección Cuadrática	$Y = a + bx + cx^2$	

Figura 5: Proyecciones. (Esparza, 2008).

A continuación, se detallan los métodos causales utilizados para el pronóstico de la demanda de agua.

Regresión lineal simple

Es el análisis que incluye una variable dependiente e independiente, para las cuales la relación entre las variables se puede aproximar a una línea recta. (Bowerman y O'Connell, 2007)

Regresión lineal múltiple

La regresión lineal simple es un modelo de regresión en los que se emplean más de una variable independiente. (López y Zuluaga, 2018)

Regresión exponencial:

Se utiliza para conocer la relación de dos variables entre las cuales se supone que poseen una relación exponencial; por ejemplo, el crecimiento poblacional en el tiempo (Quijada & Banda, 2011).

Regresión cuadrática o parabólica:

Se emplea cuando aquellos fenómenos que se observan en un diagrama de dispersión se muestran con una concentración de puntos inicial ascendentes e inmediatamente descendentes o lo contrario (Martínez, 2012)

3.3.3. Creación de un Modelo ARIMA basado en la principal variable predictora

En la figura siguiente muestra las etapas esenciales en la aplicación de la metodología utilizada, en la cual se destacan 5 etapas principales:

- Estacionariedad
- Identificación
- Estimación
- Evaluación
- Pronostico

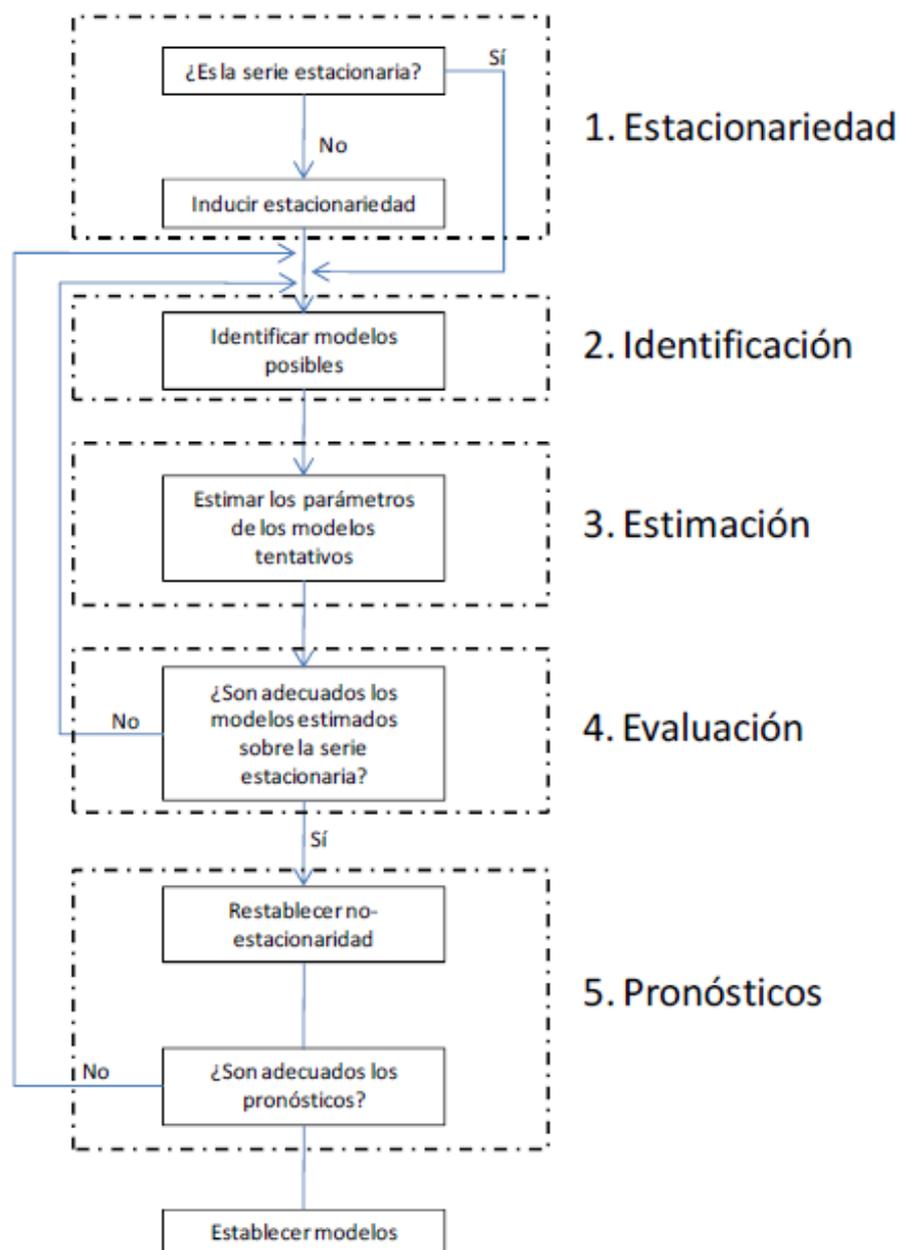


Figura 6: Metodología para la predicción con modelo ARIMA.

Estacionalidad:

Son patrones periódicos en una serie de tiempo que se completa dentro de un año civil que se repiten cada año. Factores como el clima y las costumbres ocasionan las variaciones estacionales. (Bowerman y O'Connell, 2007).

Un proceso estacionario se describe como una secuencia de datos o valores que no presentan cambio sistemático en la media ni en la varianza, se dice que la serie es estable. En caso de cambios en la media y/o varianza la serie es no estacionario o estable.

Existen dos formas de conocer si una serie es estacionaria: por medio grafico de la serie y mediante la exploración de función de autocorrelación simple.

Este concepto es importante porque es el primer paso en la metodología es determinar si la serie de tiempo es estacionaria. En caso de que la serie de datos no sea estable a lo largo del tiempo, es necesario aplicar una transformación de la serie para inducirlo a ello. Este paso es indispensable para poder aplicar las demás etapas de esta metodología.

Una vez introducido el tema de estabilidad en una serie de tiempo, es importante esclarecer la diferencia entre un modelo ARMA y un modelo ARIMA. La diferencia se halla en que un modelo ARMA (p,q) es capaz de operar únicamente sobre series estacionarias, mientras que un modelo ARIMA (p,d,q) es capaz de operar tanto sobre series de tiempo no estacionarias, como en series estacionarias.

▪ **Identificación**

Una vez que se asegura que la serie es estable en el tiempo, el siguiente paso en la metodología es la identificación del modelo probable que rige el proceso de la serie de tiempo.

Las ideas básicas de esta fase son las siguientes:

- La serie de tiempo que se encuentre en proceso de estudio cuenta con sus respectivas funciones de autocorrelación simple y parcial (FAS y FAP), que se denominan practicas o calculadas.
- Por otra parte, cada una de las distintas configuraciones ARMA posee su FAS y FAP teóricas asociadas al modelo.
- Si la FAS y FAP calculadas de la serie a la que deseamos ajustar un modelo se asemeja a alguna o varias FAS y FA teóricas, entonces podemos decir que el modelo ARMA teórico es un modelo tentativo para la serie.

Queda claro entonces que la identificación del modelo probable se realiza por medio de la comparación de las funciones de autocorrelación calculadas contra las teóricas (tanto simples como parciales).

▪ **Estimación:**

En esta etapa se estiman los coeficientes del modelo escogido tentativamente en el paso anterior, existen distintos criterios para dicho propósito. Usualmente se realiza por medio de paquetes informáticos. Además, en esta etapa se puede previsualizar la adecuación del

modelo a la serie de tiempo. Particularmente si los coeficientes no satisfacen ciertas condiciones matemáticas, el modelo es rechazado.

Como sugiere la mayoría de la literatura existente, se utilizará el criterio de mínimos cuadrados o least squares (LS por sus siglas en inglés) para el caso de estudio. La estimación de los parámetros del modelo ARMA seleccionado, se realiza por medio de minimizar la suma de los cuadrados de los residuales SSR (sum of squared residual). En general, estos estimados de los mínimos cuadrados deben obtenerse mediante un procedimiento no lineal de mínimos cuadrados. Un procedimiento no lineal de mínimos cuadrados es, sencillamente, un algoritmo que encuentra el mínimo de la suma de la función de errores cuadrados, mediante un proceso iterativo.

Suele suceder que, para una misma serie de tiempo, existen varios modelos que cumplen con las características de un modelo adecuado y proporcionan resultados similares, sin embargo debe escogerse aquel que se ajuste mejor a la serie.

Una medida útil que ayuda a conocer el grado de ajuste del modelo a la serie es la RMSE (root-mean squared error). Esta medida da a conocer la desviación estándar de los residuales \hat{a}_t , y se calcula como:

$$RMSE = \hat{\sigma}_a^2 = \frac{1}{n-m} \sum \hat{a}_t^2$$

Donde:

\hat{a}_t : residuales del modelo

n : número de residuales

m : número de coeficientes del modelo

▪ Evaluación del modelo

En esta etapa se comprueba la eficiencia del modelo y se decide si es estadísticamente adecuado.

El modelo estadísticamente adecuado es aquel cuyos residuales son independientes entre sí. Es decir, si los residuales son completamente aleatorios.

Para comprender mejor el objetivo de esta etapa, es conveniente recordar algunas ideas importantes:

- La idea básica de la metodología es modelar aquellos datos que estén correlacionados entre sí, mediante la combinación de términos AR y MA.
- Los fenómenos reales siempre presentan perturbaciones aleatorias (a_t), también llamados choques aleatorios o proceso de ruido blanco.
- La metodología Box-Jenkins asume que las perturbaciones aleatorias (a_t) pertenecientes a un proceso Y_t son independientes entre sí. No existe correlación alguna entre ellas. Por tanto, estas perturbaciones no se modelan mediante términos AR o MA.

En nuestro caso, los residuales del modelo ARIMA proporcionan un cálculo aproximado de las perturbaciones reales.

- **Pronóstico:**

Antes de hacer predicciones puntuales es escribir el modelo incluyendo el restablecimiento de la no estacionariedad. Para restablecer las características originales se la serie se hace un proceso inverso que se conoce integración.

En esta parte se deben estimar los intervalos de confianza y la suficiencia de los pronósticos.

3.3.4. Creación de un Modelo basado en las principales variables predictoras

Para analizar el modelo de regresión se pueden establecer básicamente dos pasos.

Paso 1. Estimar los parámetros del modelo de regresión. Este proceso es llamado **ajuste del modelo a los datos**.

Paso 2. El siguiente paso de un análisis de regresión es chequear que tan bueno es el modelo ajustado. El resultado de este chequeo puede indicar si el modelo es razonable o si el ajuste original debe ser modificado.

En esta parte, se incorporará al análisis de las otras variables que influyen la demanda siguiendo los procedimientos descritos en los epígrafes anteriores.

4. CASO DE ESTUDIO

4.1. Características de la localidad

4.1.1. Ubicación de Gourma Rharous

Gourma-Rharous es una provincia rural ubicado en la región de Tombouctou de Mali. La comuna tiene una superficie de aproximadamente 7.000 kilómetros cuadrado y contiene 29 pueblos y nueve municipios (Bambara Maoudé, Banikane, Gossi, Hamzakoma, Haribomo, Inadiatafane, Ouinerden, Ciudad de Rharous, Serere (OCHA,2013). En el censo de 2009 tenía una población de 26.115 (INSTAT MALI, 2009).

La ciudad de Rharous es el centro administrativo de la provincia de Gourma-Rharous y se encuentra en la orilla derecha del río Níger 150 km al este de Tombuctú. Esta ciudad tenía en 2009 unos 9 768 habitants de tribus Tamasheks et Sonrhais.



Figura 7: Mapas de ubicación de la ciudad de Rharous (izquierda), y plano de detalle de la ciudad (derecha)

4.1.2. Vías de Acceso:

Los medios de transporte son escasos y provienen de la ciudad de Tombouctou en días específicos de la semana. Normalmente el tiempo de viaje es de 4 a 6 horas, ya sea en camiones o camionetas rurales (que son las más usadas); mientras que, en épocas de lluvia puede aumentar a más de 8 horas.

4.1.3. Clima

La ciudad de Rharous, por ubicarse muy cerca del Sahara presenta un clima desértico, es decir cálido y seco, con muy poca precipitación pluvial durante el período de verano (junio a septiembre). Este clima es considerado BWh según la clasificación climática de Köppen-Geiger. La temperatura promedio en Gourma-Rharous es 28.9 ° C. La precipitación media

aproximada es de 170 mm. Con un promedio de 72 mm, la mayor precipitación cae en agosto. El mes más seco es enero y hay 0 mm de precipitación en enero. (<https://es.climate-data.org/africa/mali/tombouctou/gourma-rharous-715641/>)

El promedio de la cifra climática de Gourma Rharous es de **8,4**. Esto se basa en varios factores, como las temperaturas medias, las posibilidades de precipitación y las experiencias climáticas de otros. (<https://www.cuandovisitar.co.cr/mali/gourma-rharous-2602294/>)

La figura siguiente muestra una ilustración compacta de las temperaturas promedio por hora de todo el año. El eje horizontal es el día del año, el eje vertical es la hora y el color es la temperatura promedio para ese día y a esa hora.

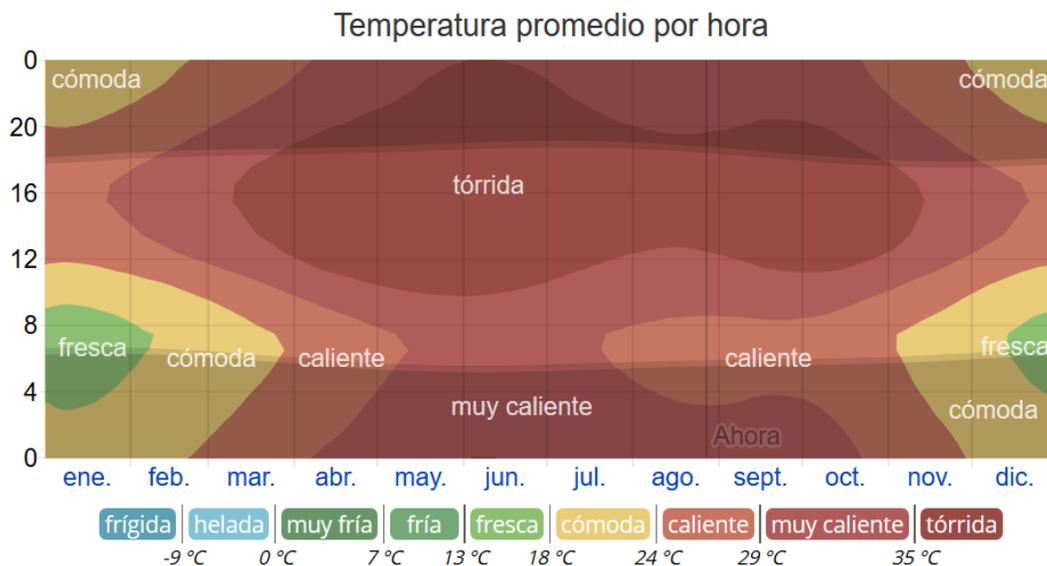


Figura 8: La temperatura promedio por hora, codificada por colores en bandas. Las áreas sombreadas superpuestas indican la noche y el crepúsculo civil.

(<https://es.weatherspark.com/y/40169/Clima-promedio-en-Gourma-Rharous-Mali-durante-todo-el-a%C3%B1o>)

4.1.4. Relieve:

La zona de estudio presenta un relieve variado, se distinguen zonas planas con características de cierta aridez. Además, algunas zonas más inclinadas, con presencia de cerros cubiertos de poca vegetación con abundante material rocoso. Igualmente, algunas quebradas secas o con muy poca agua.

4.2. Sistema de Abastecimiento de agua de la ciudad de Rharous

El sistema tecnológico externo del mismo está compuesto por:

- Fuente de abasto de agua.
- Tanque
- Sistema de distribución.

4.2.1. Fuente de Abastecimiento:

La fuente de abasto es uno de los principales elementos a tener en cuenta en un sistema de acueducto, debido a que indica el caudal de agua a utilizar en el presente y en el futuro (Pérez, 2001). El suministro de agua históricamente ha tenido como fuente de abastecimiento dos pozos que tienen una producción diaria máxima de 75 m³.

4.2.2. Tanque:

El agua bombeada es conducida por gravedad hasta un tanque con una capacidad de almacenamiento de 50 m³ que está situado en las inmediaciones de los pozos, los cuales tienen El nivel de agua se mantiene siempre de esta manera entre 3 y 5 m.



Figura 9: Tanque de 50 m³ de Rharous

4.2.3. Sistema de distribución de agua

La red de distribución consta de 10,3 km que suministran a 15 fuentes públicas y 97 conexiones domiciliarias. En las figuras se puede ver las imágenes de las fuentes públicas de distribución de agua.



Figura 10: fuentes públicas de distribución de agua

El sistema de regulación y control de las conductoras del sistema de acueducto cuenta actualmente con un total de 27 válvulas, de ellas 3 están completamente cerradas, 19 son regulables y el resto permanecen abiertas. La operación de los equipos de bombeos garantiza el nivel de agua en el tanque, necesario para la distribución de caudal y presión óptimos, este tanque trabaja con las válvulas de salida abiertas totalmente. La regulación de los caudales se realiza mediante la operación de las válvulas de cada una de las conductoras a la salida de los tanques y la medición en los caudalímetros instalados en cada una de ellas.

En la siguiente figura se ve el sistema de distribución compuesto de la red inicialmente hecha (color azul) y de la extensión hecha en 2013.



Figura 11: Sistema de distribución de Rharous

4.2.4. Gestión del acueducto de Rharous:

Acueducto de la ciudad de Rharous, suministra servicios de agua potable para mejorar las condiciones de vida de los habitantes de la ciudad de Rharous. Sin embargo, existen zonas como la urbana y rural donde se presentan diferentes escenarios de planificación y distribución por las necesidades de la población, en dependencia de la cantidad de habitantes por zonas.

En el departamento de Agua “No Contabilizada” de la empresa se elabora el análisis de oferta y demanda que ayuda a estimar las pérdidas de agua en un periodo determinado por diferencia entre la cantidad de agua producida y de agua facturada. Dicha unidad se encarga resolver cualquier tipo de problema de distribución de agua.

La predicción de la demanda es importante por muchas razones, entre las que cabe destacar el dimensionamiento de las instalaciones de distribución, almacenamiento y potabilización. Por supuesto, una predicción adecuada permitirá mejorar la calidad de servicio a los clientes.

4.3. Recopilación de las series de datos existentes.

Para el caso de estudio se ha colectado información diaria de siete variables: consumo de agua, población total, hombres, mujeres, niños, desplazados, temperatura y humedad. El periodo de tiempo del que se dispone de información es desde el 19 de enero de 2013 hasta el 23 de diciembre de 2018. Algo menos de 6 años. (2166 datos sabiendo que $365 \times 6 = 2190$).

En este contexto, no es de esperar que haya un alto grado de error relacionado con la manipulación de los datos, aunque sí podría haber errores de medición, mantenimiento de registros, etc. dependiendo del origen de los datos. Este trabajo se basa en datos secundarios, por lo que tenemos que asumir que los datos obtenidos son fiables. Sin embargo, es preciso recordar que mantener un alto nivel de fiabilidad de la información es costoso para las entidades encargadas de la recolección.

Desde un punto de vista económico, es teóricamente plausible que éstas dediquen recursos al mantenimiento cuidadoso de los datos solamente hasta el punto en que el coste marginal de este esfuerzo sea igual al beneficio marginal. No sería, pues, razonable esperar un 100% de exactitud en la información disponible. Este tipo de incertidumbre afecta no sólo a los resultados de la estimación, sino también a las predicciones basadas en esa estimación.

A continuación, explicaremos el proceso de recolección de los datos de las variables:

4.3.1. Consumo de agua:

Los datos de consumo corresponden a la cantidad de metros cúbicos aportados cada día a la red de distribución de agua potable que abastece a la totalidad de la población de la ciudad de Rharous desde el tanque mencionadas en el punto 4.2.2. de este documento.

Los datos de consumos proporcionados por **el departamento técnico del acueducto de Rharous**, se corresponden con las mediciones diarias en la conducción principal que sale del tanque y distribuyen agua en todo el sistema.

4.3.2. Población:

Las series de datos de la población fueron obtenidas contactando la **coordinación de grupos de defensa de la ciudad (Plataforma y ejército)**. Por razones de seguridad, dado las posibilidades de ataques debido la crisis que afecta el país, estos grupos de defensa en colaboración con la alcaldía de la ciudad crearon registros en cuatros puntos de entrada/salida en la ciudad, lo que permitió identificar diariamente a las personas que salen y entran en la ciudad. Posteriormente, estas informaciones son procesadas en nuevos registros cada dos semanas y transmitidas a la alcaldía. En estos nuevos registros se calcula las estadísticas y se precisa el número de personas que entran y salen de la ciudad por categorías mujeres, hombres, niños y desplazados.

4.3.3. Temperatura y humedad:

Las series de temperaturas y humedad fueron obtenidas en el **Servicio de Meteorología de la región de Tombouctou** y corresponden a los datos registrados en la estación meteorológica que se localiza en la ciudad de Rharous.

5. RESULTADOS

5.1. Análisis descriptivo de las series de datos:

A continuación, se hará el análisis preliminar de las series de datos:

5.1.1. Población

La evolución de la población se caracteriza por grandes variaciones en cada fin de años como se puede ver en las figuras:

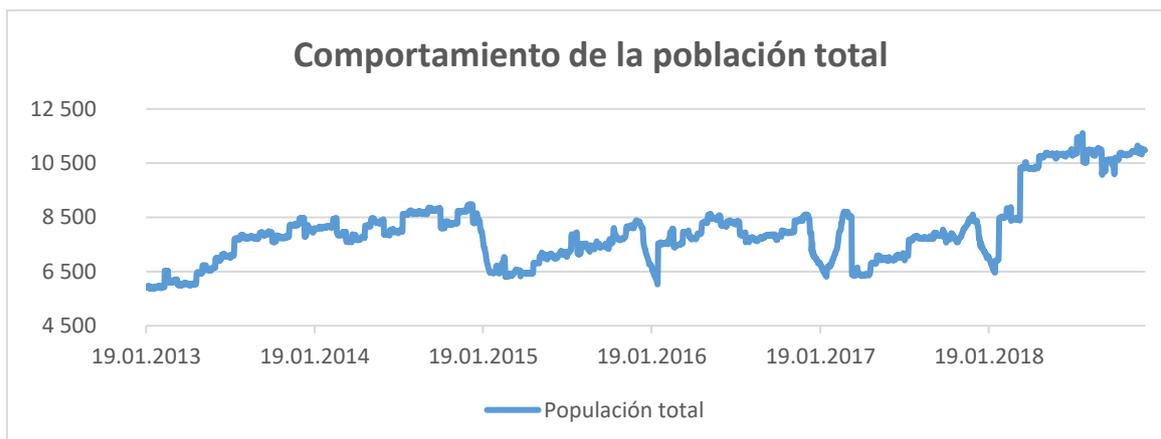


Figura 12: Evolución de la población total de 2013 hasta 2018

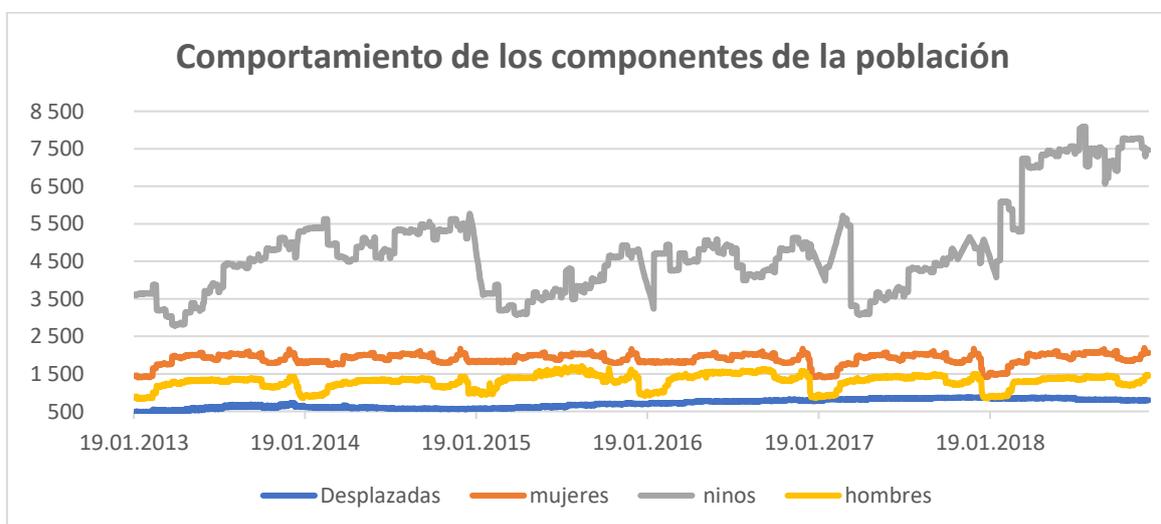


Figura 13: Evolución de las categorías de la población de 2013 hasta 2018

Estas variaciones pueden ser explicados por actividades económicas y socioculturales:

- En función del año en la zona, de finales de diciembre hasta en principio de marzo, hay muchas personas que se desplazan para actividades agrícolas. La agricultura no es moderna y depende del régimen hidrológico del Rio Níger.

- En las vacaciones o ausencia de escuelas las familias mandan los niños a otras ciudades. En caso de problemas de seguridad que implica desplazamientos de población, ponen a los niños en seguridad primero. En estas situaciones, los adultos (hombre y mujeres) se quedan para proteger los bienes de la familia.
- Los niños ayudan con ciertas actividades de ganadería.

5.1.2. Temperatura y la humedad relativa

La estación calurosa dura 3 meses y la temperatura máxima promedio diaria es de más de 39 °C. La temporada fresca dura 2 meses, del 8 de diciembre al 6 de febrero, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 31 °C.

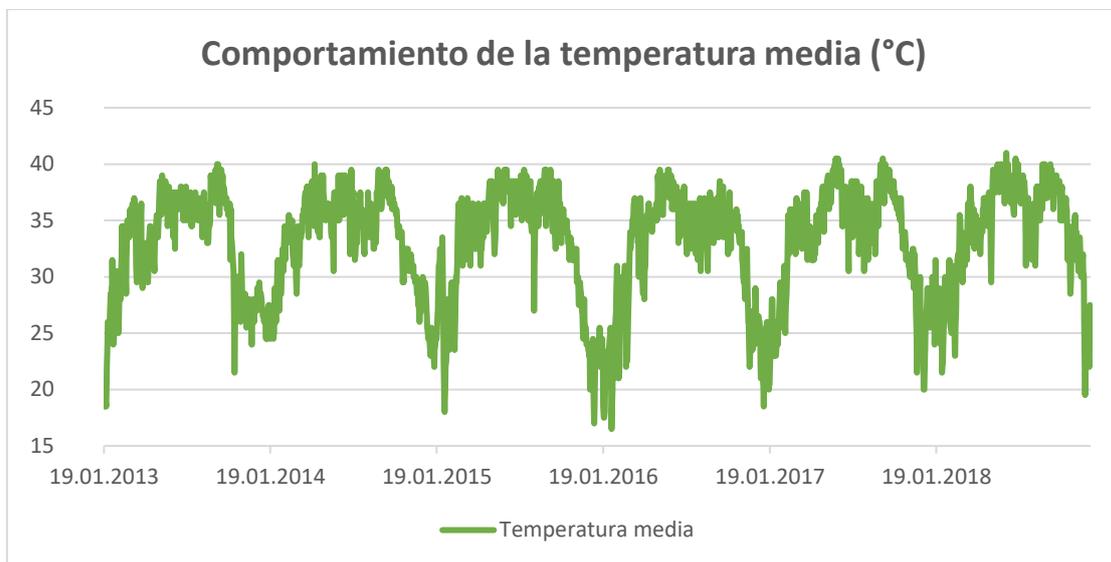


Figura 14: Evolución de la temperatura media de 2013 hasta 2018

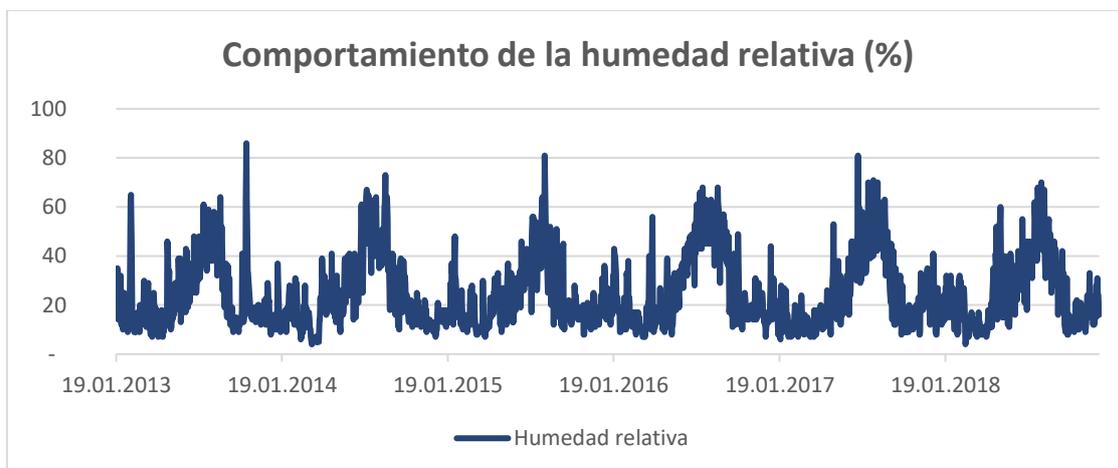


Figura 15: Evolución de la humedad relativa de 2013 hasta 2018

5.1.3. Demandas/Consumos

En la figura 15 se muestra la evolución de la población y de la demanda total de agua de la ciudad en el periodo de estudio. Parece inferirse que las variaciones más importantes están asociadas a las variaciones en la población

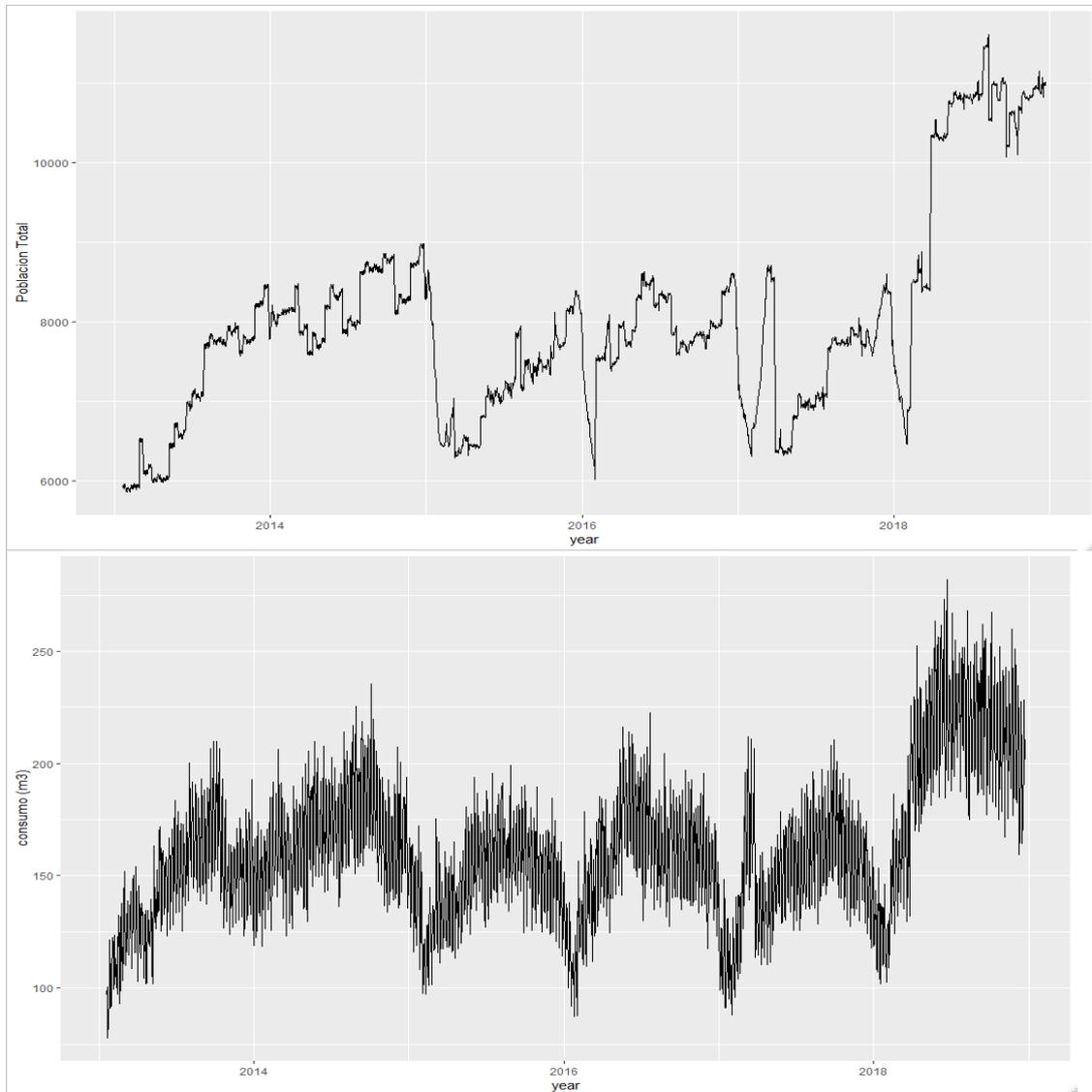


Figura 16: Evolución de la población total (arriba) y la demanda total de agua de la ciudad (abajo) entre 2013 y 2018.

Para inducir la estacionalidad, se hace una transformación lógica de la variable consumos (El consumo total), dividiéndola por la población total, y así se crea una nueva variable que es el consumo por persona. En la figura 17 se muestra la evolución de esta nueva variable a lo largo del tiempo. En esta figura se aprecia que es una serie temporal de periodicidad anual, probablemente por el efecto climático, y con bastantes oscilaciones en el corto plazo.

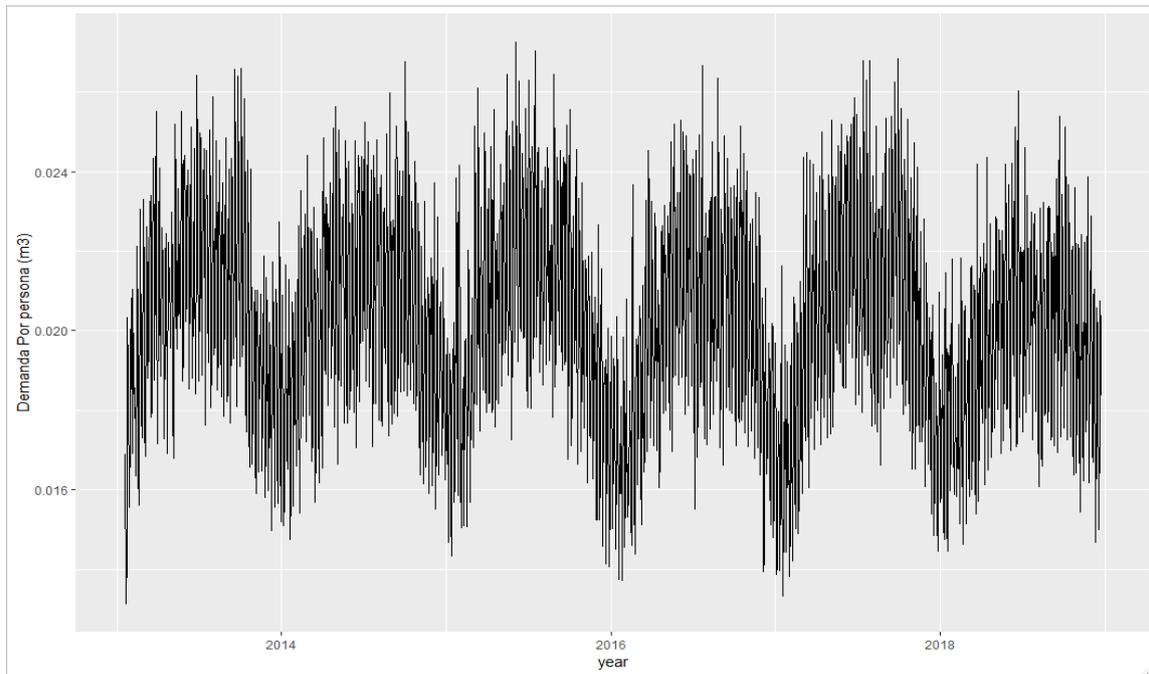


Figura 17: Evolución de la demanda media por habitante entre 2013 y 2018

Dada esa importante volatilidad diaria, es conveniente examinar la serie de demanda aplicando medias móviles semanales y mensuales para reducir dicha volatilidad (figura 18).

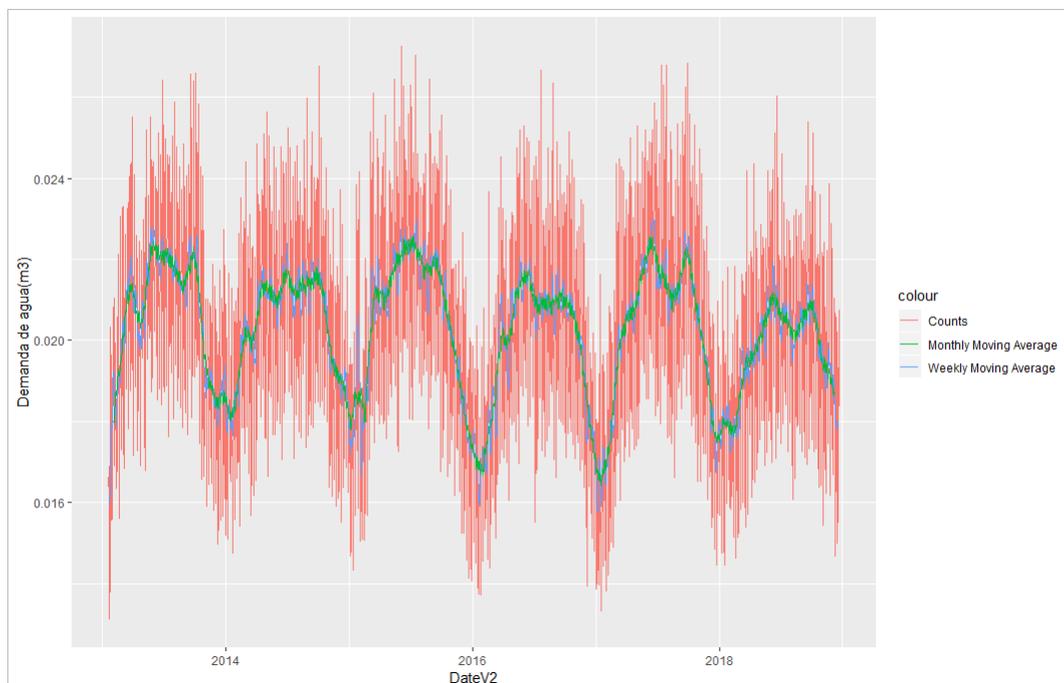


Figura 18: Media móvil semanal y mensual

5.2. Análisis de Correlación:

La correlación más significativa es la que existe entre población de niños y población total. Lo cual es bastante evidente, porque la población de niños es la que más variaciones fuertes tiene a lo largo del periodo de estudio, y es una parte importante de la población total.

Se esperaba una correlación mayor entre consumo y población total. No es más alta quizá porque la temperatura y humedad relativa tienen su influencia sobre la demanda, y seguramente porque hay algún patrón de repetición mensual o semanal de la demanda. Este aspecto será esclarecido en los análisis de modelos causales.

Hay muchos factores que pueden afectar el consumo y que pueden explicar el hecho que para nuestro caso de estudio la población puede no ser el principal predictor:

- El río, los pozos equipados de Bombas Manuales y los pozos tradicionales tienen también una influencia. Las personas pobres que no pueden comprar el agua del acueducto suelen utilizar estas fuentes como complementario del agua suministrado por el acueducto.

Las cantidades de agua distribuidas por estas fuentes no son conocidas.

- No todas las casas tienen conexiones domiciliarias (estas conectada al acueducto), algunas familias cogen agua en punto de distribución público. Sus hábitos de consumo pueden ser distinto de las que tienen estas conexiones.
- Los aparatos sanitarios tienen influencia en el consumo de agua. Las familias que usan letrinas (fosas) no tienen el mismo consumo que los tienen aparatos modernos.
- El precio del agua también afecta este consumo dado que ciertas personas no pueden comprar toda la cantidad que necesitan.
- Las precipitaciones, aunque raras pueden afectar el consumo de agua. Por ahora no disponemos de los datos de esta variable.

En la figura siguiente se puede ver la correlación entre las variables.

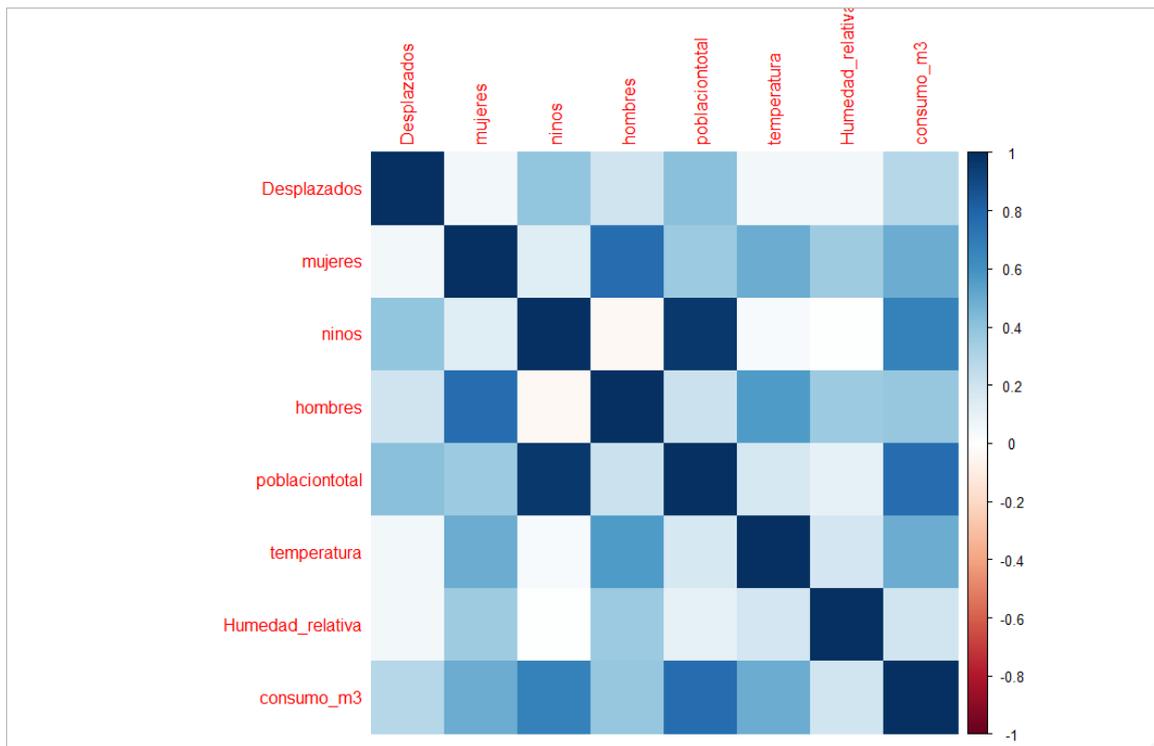


Figura 19: Correlación entre las variables.

5.3. Modelo basado en regresión lineal

A continuación, se muestra el resultado de dos modelos de regresión, uno que emplea todas las variables (excepto la población total) para predecir la demanda y otra que emplea la población total (en lugar de las poblaciones por grupos, mujeres, hombre, niños). Hay que tener en cuenta que la variable población es una combinación lineal de todas las otras (suma de todas las otras), entonces en el modelo regresión si hay dependencia lineal la detecta y no la usa. En la tabla 1 y 2 se muestran los resultados de los dos modelos de regresión:

Tabla 1: Parámetros del primer modelo de regresión lineal

	Estimate	std	Error	T value	Pr(> t)
(Intercept)	-7.526e+01		5.501e+00	-13.682	< 2e-16
Hombres	1.623e-02		3.599e-03	4.510	6.84e-06
Mujeres	3.168e-02		4.012e-03	7.896	4.54e-15
niños	1.766e-02		3.587e-04	49.246	< 2e-16
Desplazados	-6.760e-03		3.773e-03	-1.792	0.07333
Temperatura	2.206e+00		9.229e-02	23.907	< 2e-16
Humedad relativa	8.760e-02		2.786e-02	3.144	0.00169

Tabla 2: Parámetros del segundo modelo de regresión lineal

	Estimate std	Error	T value	Pr(> t)
(Intercept)	-5.888e+01	3.496e+00	-16.840	< 2e-16
Población total	1.821e-02	3.262e-04	55.816	< 2e-16
Desplazados	-9.293e-03	3.520e-03	-2.640	0.00835
temperatura	2.355e+00	7.782e-02	30.258	< 2e-16
Humedad relativa	1.212e-01	2.634e-02	4.602	4.43e-06

El primer modelo tiene un R-squared: 0.723, y el segundo R-squared: 0.7206.

Es decir, la calidad de la predicción es casi idéntica, con lo que parece que para la predicción de demanda no tiene demasiada importancia la distribución de la población. En cualquier caso, según los resultados parece que el modelo regresivo no tiene una capacidad de predicción de la demanda altísima.

Lo que es más interesante es, a partir del modelo de regresión, examinar cual es la importancia de las variables para predecir la demanda como se ve la figura siguiente:

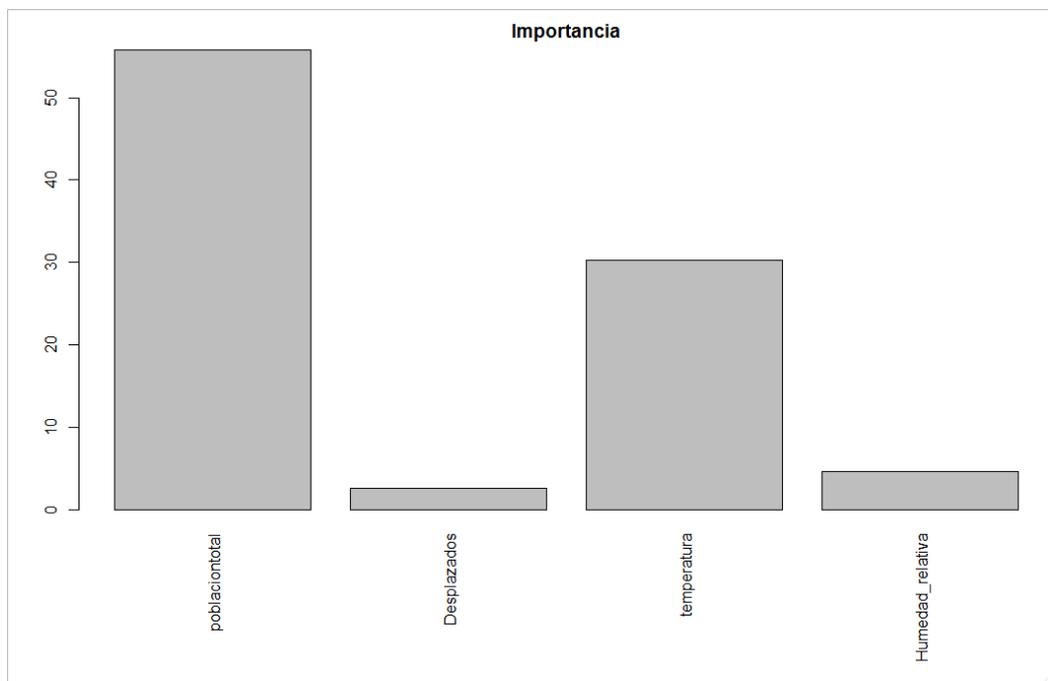


Figura 22: Importancia de las variables para predecir la demanda

Se observa que lo más importante es la población seguida de la temperatura y la humedad relativa.

5.4. Modelo ARIMA basado en la población

Como se vio en el epígrafe anterior, la población total es tan buen predictor como las demandas de cada tipo por separado (hombres mujeres, niños), descartamos estas tres variables explicativas para los siguientes análisis.

En la figura 16 se observa gráficamente, cómo la demanda de agua evoluciona a lo largo del tiempo, siguiendo el patrón de la población total con ciertas variaciones. Se nota además que los consumos a priori no parecen una serie temporal. Esto es debido a las importantes variaciones de la población a lo largo del tiempo.

En el análisis de series temporales es muy importante que la serie temporal sea estacionaria. La serie correspondiente a los consumos totales de la ciudad no lo es (figura 16), sin embargo, la serie de demanda media por persona sí que lo es, por tanto, nos conviene emplear esta variable en este modelo.

Gráficamente se aprecia la periodicidad anual (estacionalidad) de la demanda por persona, aunque como hemos comentado hay importante volatilidad en el corto plazo. Procesamos la serie de datos de demanda por persona como una serie temporal, para separar la componente estacional, la tendencia y el factor aleatorio o inexplicable. Para este procesamiento se debe indicar cuál es la periodicidad de la serie. En la figura 18 se observaba la periodicidad anual, pero como primer análisis vamos a considerar una periodicidad semanal para que sea el modelo quien nos indique si existe o no dicha periodicidad. En la siguiente figura se muestra la descomposición de la serie considerando periodicidad semanal.

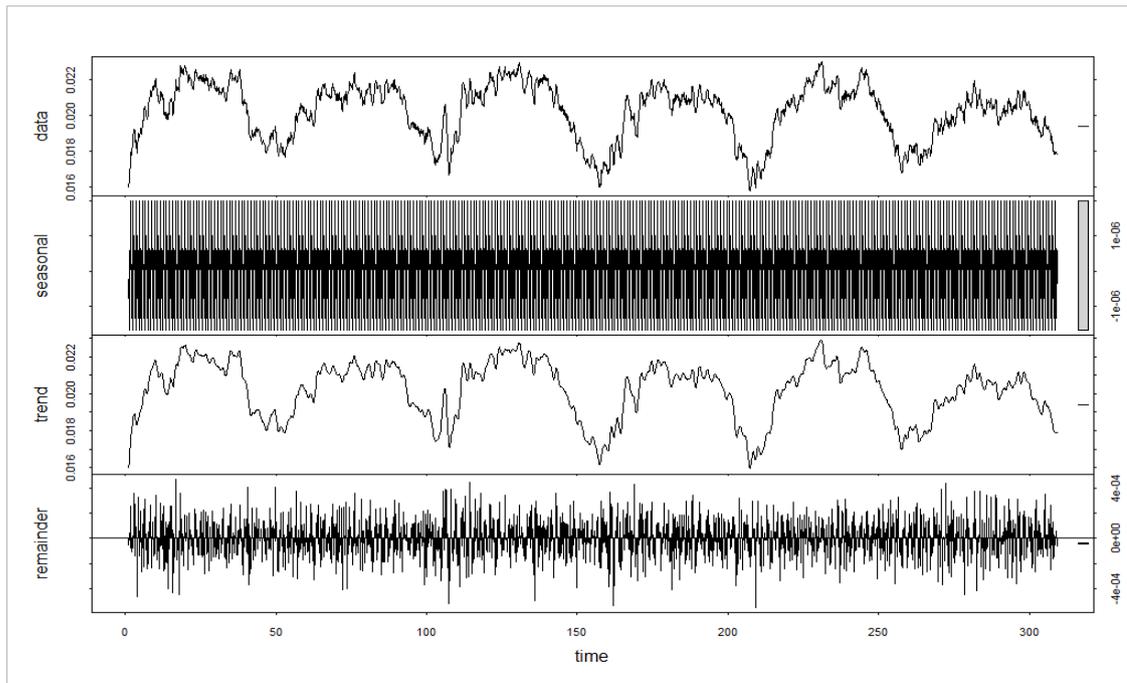


Figura 23: Separación de los componentes de la serie temporal de demanda de aguas considerando periodicidad semanal.

Al considerar periodicidad semanal, lo que ocurre es que la estacionalidad anual la separa como si fuese la tendencia y en la estacionalidad ha detectado el componente periódico que la serie, que aparentemente se repite con un patrón claro cada semana. Para confirmarlo analizamos la autocorrelación y correlación parcial de la serie, confirmándose la periodicidad semanal tal y como se muestra en la siguiente figura:

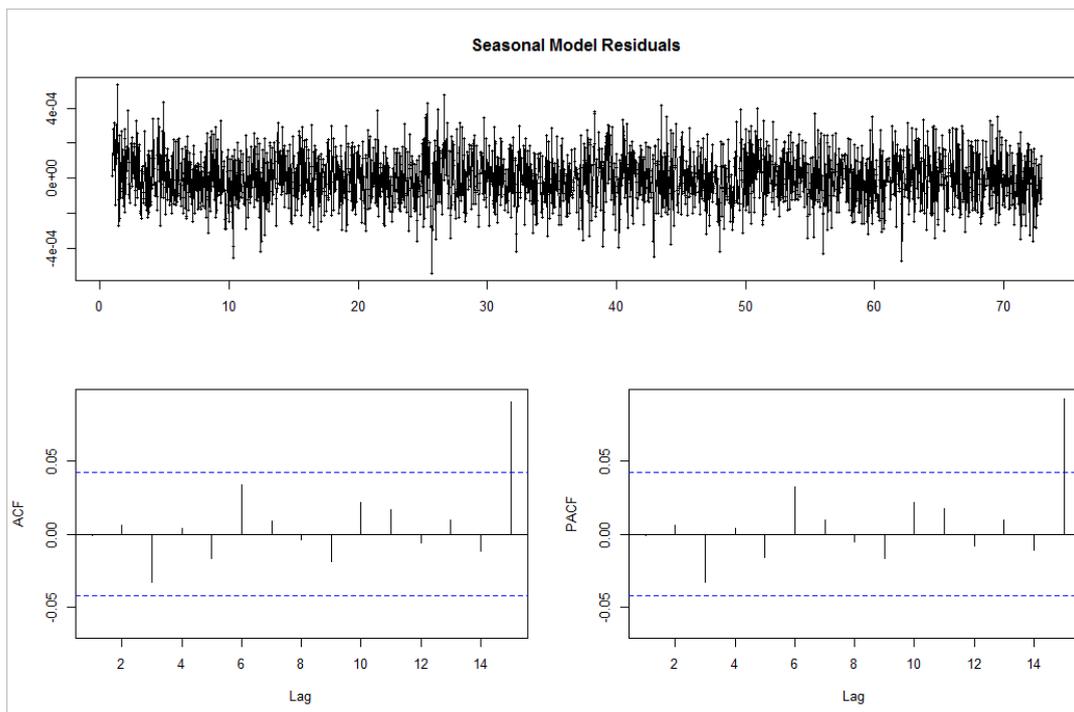


Figura 24: Gráficos de autocorrelación y correlación parcial de la serie de la demanda por persona.

La siguiente figura muestra la componente con periodicidad semanal de la demanda.

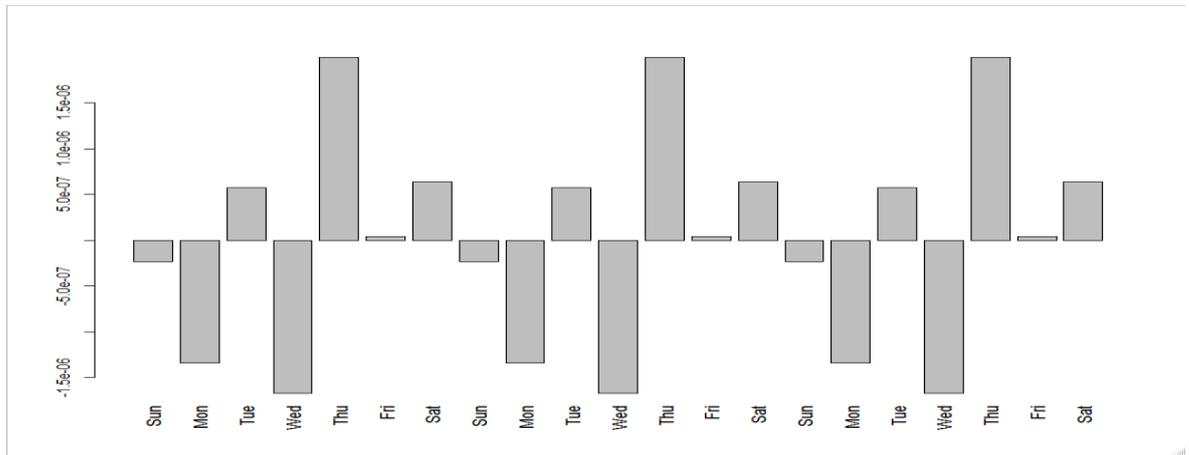


Figura 25: Componente con periodicidad semanal de la demanda

Repetiendo el análisis de la demanda considerando que la serie temporal tienen una periodicidad mensual, el resultado es aún más interesante, dado que esta periodicidad es más importante que la semanal.

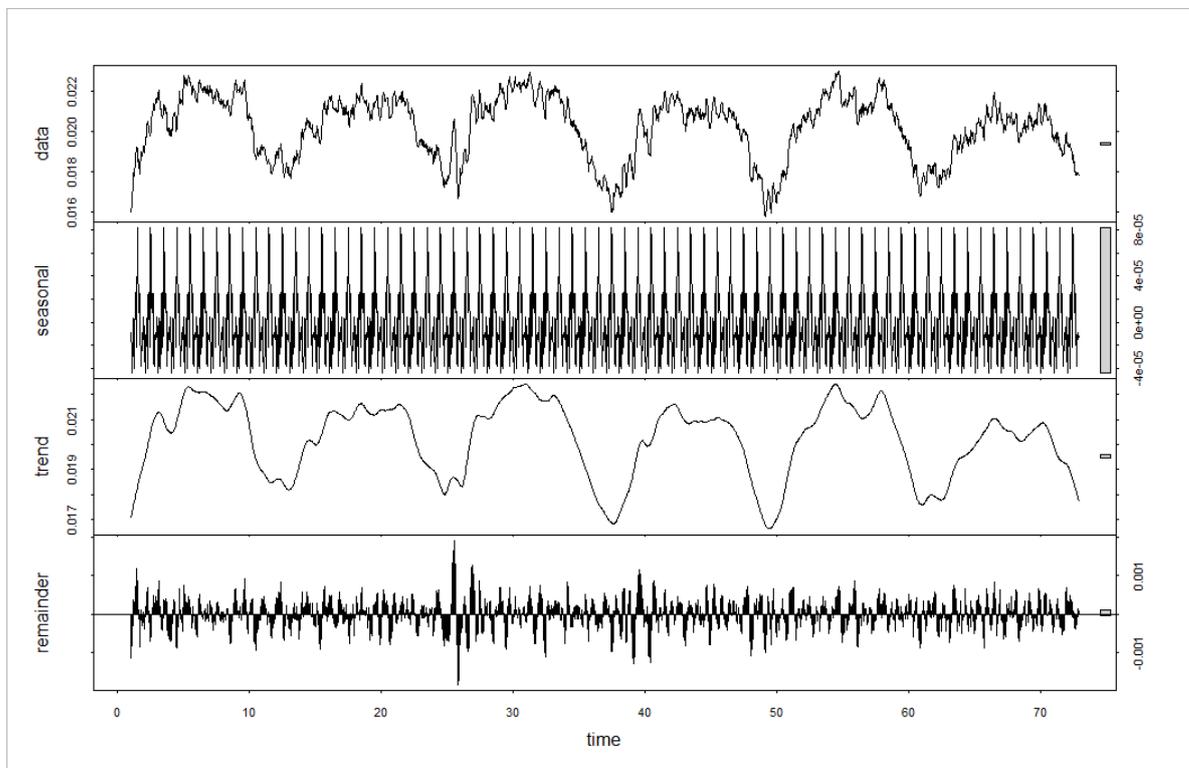


Figura 26: Separación de los componentes de la serie temporal de demanda de aguas considerando periodicidad mensual.

Si representamos para varios meses el componente periódico de la demanda se aprecia perfectamente como varia a lo largo del mes (figura 27).

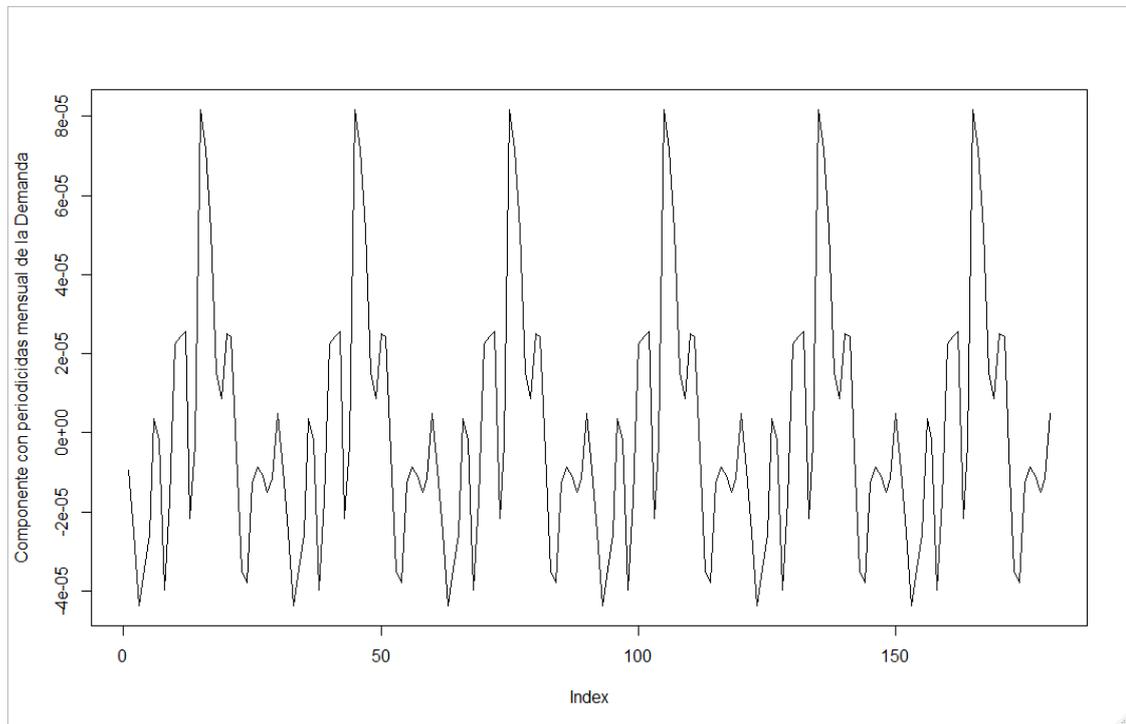


Figura 27: Componente con periodicidad mensual de la demanda para un periodo de 6 meses

Con los análisis anteriores se estima que las variaciones periódicas (semanales o mensuales), representan aproximadamente el 2% de la variabilidad de demanda. Sin embargo, la variación estacional, debida con toda seguridad al clima representa 65% de la variabilidad de la demanda, y un 20% de la demanda propiamente dicha.

Finalmente aplicamos el modelo ARIMA considerando la periodicidad anual y vemos como ya se aprecia perfectamente la componente estacional que seguramente se debe al clima, y también se aprecia por primera vez un componente que se corresponde con la tendencia real. Se aprecia como hay una tendencia decreciente (aunque no sea uniforme) que durante el periodo de análisis contribuye a un 13% de la variabilidad de la demanda.

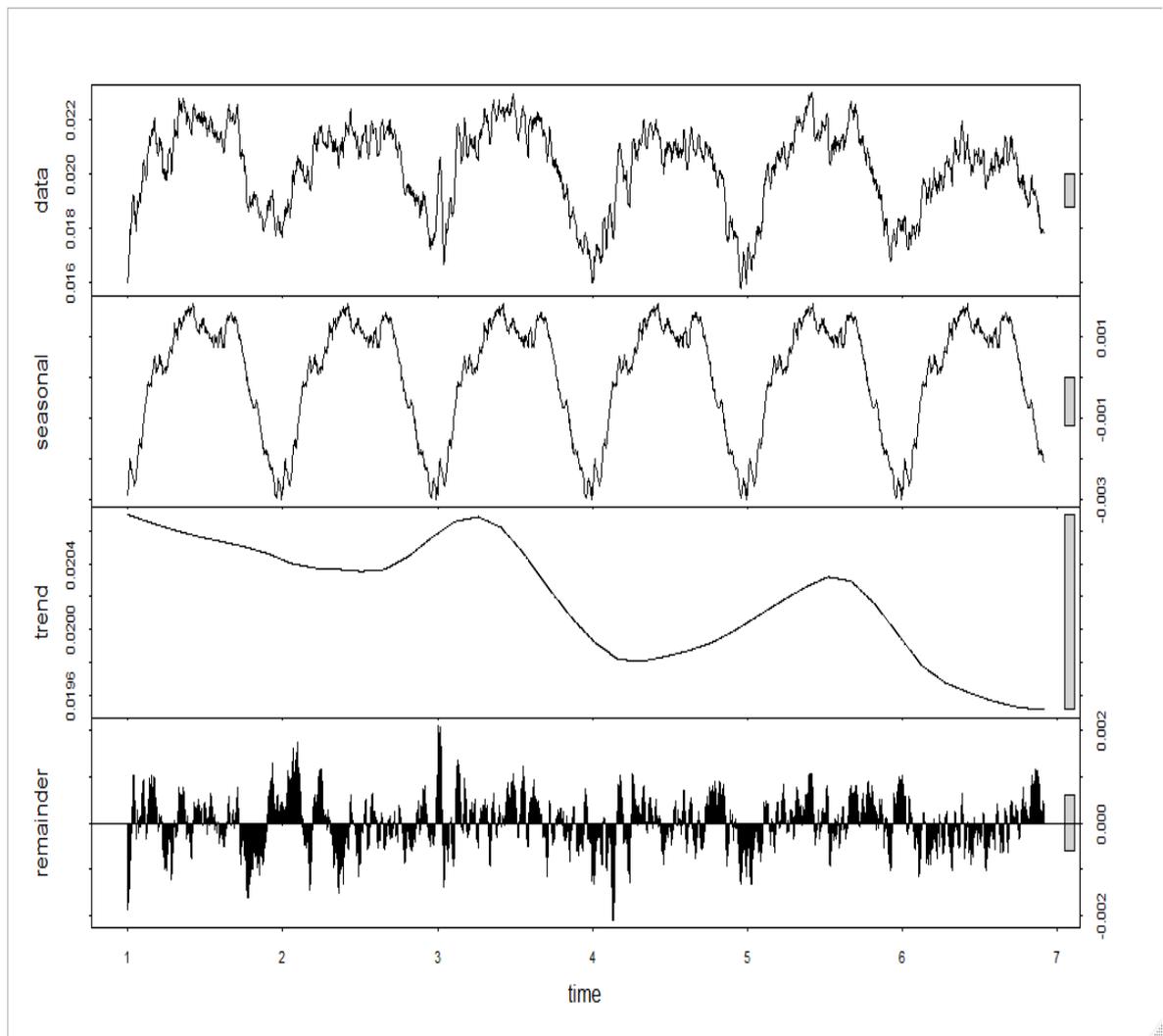


Figura 28: Separación de los componentes de la serie temporal de demanda de aguas considerando periodicidad anual.

De las figuras 23, 26 y 28, se puede inferir que la parte no explicada de la predicción realizada por los modelos arima es aproximadamente el 3.5% de la demanda total.

5.5. Modelo de predicción de la componente estacional a partir de variables climáticas

La componente estacional de la demanda evoluciona a lo largo del tiempo de forma muy similar a la temperatura y a la humedad, tal y como se muestra en la siguiente figura:

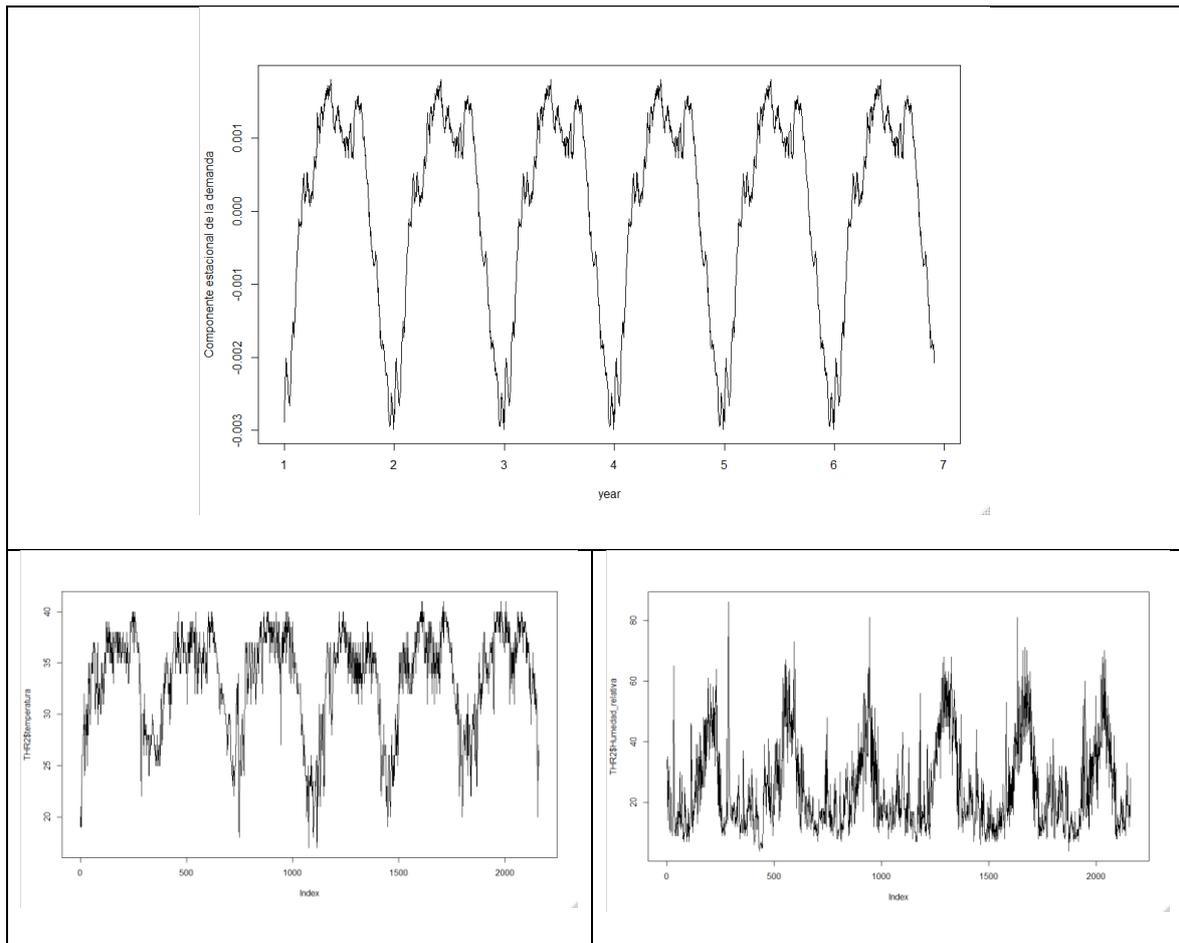


Figura 29: Componente estacional de la demanda (arriba), temperatura (abajo izquierda), humedad relativa (abajo derecha)

Por esta razón, analizamos la posibilidad de predecir la componente estacional a partir de estas dos variables. Lo hacemos aplicando un modelo de regresión cuyos coeficientes se muestran a continuación en las tablas.

Tabla 3: Parámetros del modelo de predicción de la componente estacional a partir de los predictores climáticos

Coefficients	Estimate	std	Error	T value	Pr(> t)
(Intercept)	-8.432e-03		8.901e-05	-94.73	<2e-16
temperatura	2.366e-04		2.685e-06	88.11	<2e-16
Humedad relativa	2.368e-05		9.145e-07	25.90	<2e-16

Tabla 4: Síntesis de los resultados de la aplicación del modelo a las variables

Residual standard error:	0.0005979	degrees of freedom	2156
Multiple R-squared:	0.8171	Adjusted R-squared	0.817
F-statistic:	4817 on 2 and 2156 DF	p-value:	< 2.2e-16

Se observa como el modelo tiene un coeficiente de correlación bastante alto (0.817), es decir que la variabilidad de la componente estacional se explica en gran medida por factores climáticos. La siguiente figura compara los valores reales y los valores predichos de la componente estacional de la demanda empleando el modelo de regresión.

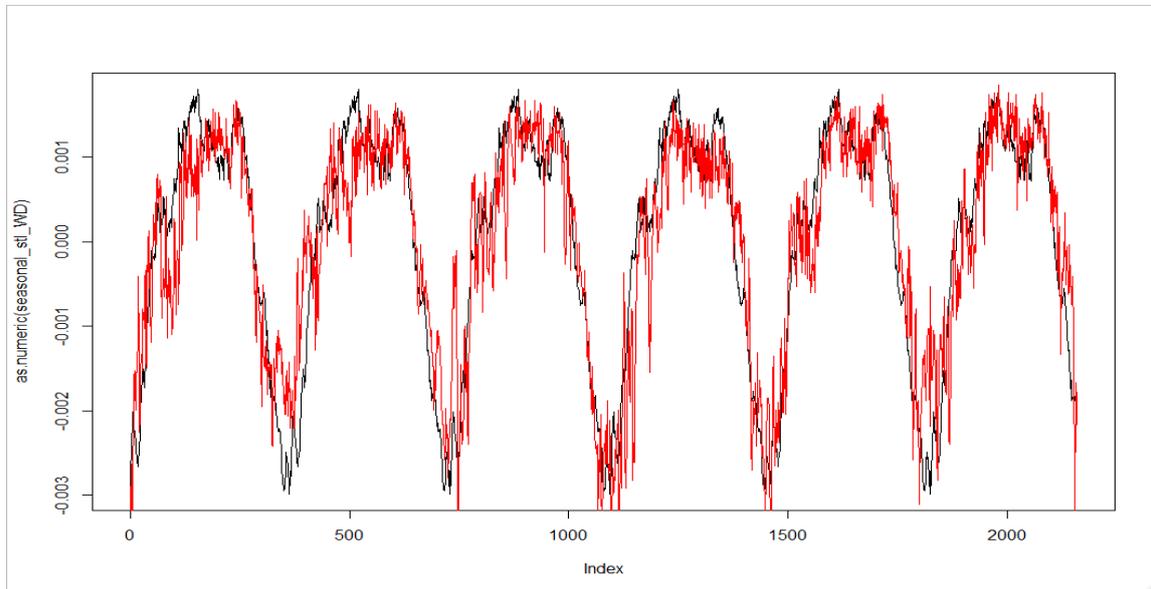


Figura 32: Componente en negro la componente estacional de la demanda y en rojo la predicción de esa misma componente a partir de la temperatura y de la humedad.

Finalmente, combinando los parámetros del modelo ARIMA con estacionalidad anual y el modelo de regresión para predecir la estacionalidad a partir de la información climática, calculamos la predicción de la demanda. La siguiente figura muestra una diferencia entre la demanda real y la demanda predicha por el modelo.

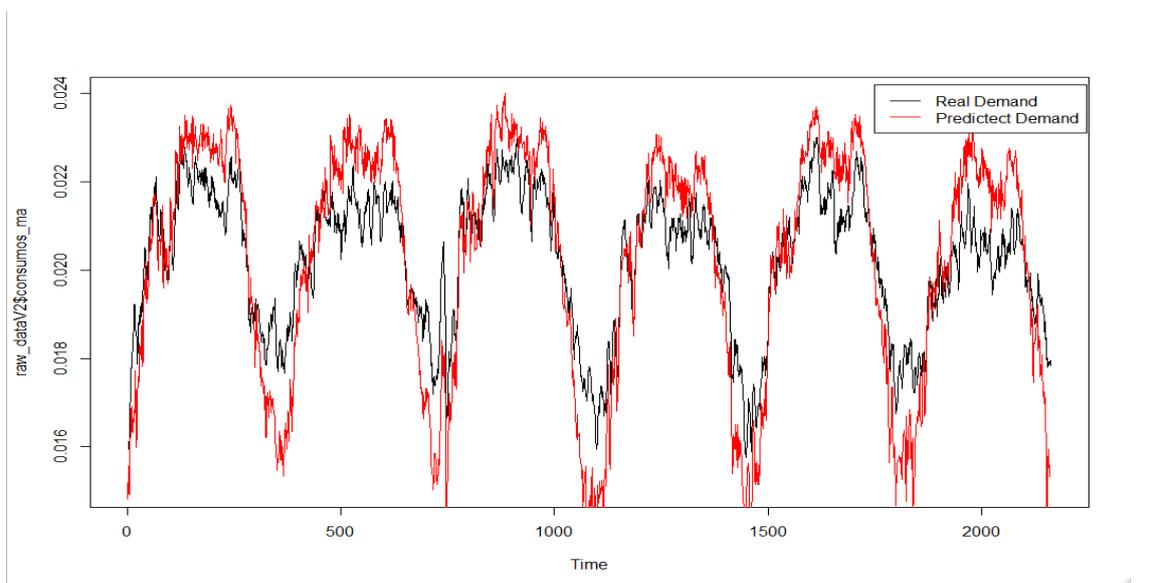


Figura 33: Predicción de la demanda usando el nuevo modelo

6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de la investigación realizada y al diseño y aplicación de la metodología utilizada para la predicción de la demanda de agua en un contexto de crisis humanitaria, se logró generar un modelo cuantitativo que ofrece una precisión significativa para dicha predicción.

Las aportaciones de este trabajo proporcionen una base para una mejor comprensión del comportamiento de la demanda en el contexto de crisis humanitaria del caso de estudio utilizando las series de consumos de agua y de las variables demográficas y climáticas.

Por lo tanto, los objetivos planteados al inicio de esta investigación fueron cumplidos exitosamente:

- Se recopiló y analizó las series de consumos de agua, de las variables demográficas y climáticas en un contexto de crisis humanitaria
- Se han analizado las variables predictoras disponibles y se han aplicado diversos modelos, observándose que el factor más importante es la evolución de la población. En el contexto de crisis humanitarias hay importantes movimientos de personas, que depende de diversos factores sociales, políticos, guerras. Así pues, no se ha considerado la predicción de evolución de la población y nos hemos concentrado sobre la predicción de la demanda media por persona.
- Se han combinado modelos de regresión y modelos de ARIMA para predecir la evolución de dicha demanda. Se ha encontrado diversos patrones temporales (semanal/mensual) que provocan hasta un 2% de la variabilidad, dichos patrones son con toda seguridad debidos a factores socioeconómicos (el día del mercado, el día del rezo, el fin de semana, etc).
- Se encontró un fuerte componente estacional relacionado con la temperatura y humedad relativa, que contribuye en un 65% de la variabilidad de la demanda. También se notó un componente de tendencia que indica que se está reduciendo la demanda por persona (13% durante el periodo de estudio). Dicha reducción podría deberse a los números de personas por fuente público que ha aumentado considerablemente y la capacidad de las personas a pagar el agua.

- Con todos estos componentes se dispone de un modelo de predicción capaz de estimar con bastante fiabilidad, la demanda total, a partir del tamaño de la población y del clima y del día del mes.

7. RECOMENDACIONES

Esta investigación constituye un primer intento de identificar modelos adecuados para la predicción de la demanda de agua potable en un contexto de crisis humanitarias generadas por conflictos armados. En la misma resultan novedosos la utilización de las series de consumos de agua y de las variables demográficas y climáticas para la creación del modelo de predicción de demanda de agua, no habiéndose encontrado publicaciones científicas sobre el uso de estas herramientas en estos escenarios de crisis.

Además de disponer de un modelo más preciso y confiable, el departamento de Agua No Contabilizada de la empresa de Acueducto de Rharous y los ONG que planifican proyectos para la ciudad obtendrán como resultado una mejora en el conocimiento de los elementos de tendencia, estacionalidad y ciclos que presentan la demanda de agua durante el año al establecerse cuantitativamente estos elementos a través de la metodología propuesta.

Para continuar con la mejoría del conocimiento del comportamiento de la demanda en el contexto de estudio, se hacen las recomendaciones siguientes:

1. De acuerdo con la información proporcionada por la empresa y con base en los resultados obtenidos, se propone investigar ¿qué otras variables se deben incorporar al caso de estudio para elaborar pronósticos y simular escenarios futuros?
2. Con los datos colectados se propone investigar también ¿qué otra metodología podría para minimizar el error en las predicciones futuras?
3. Con el advenimiento de los avances en técnicas basadas en inteligencia computacional para pronóstico de series temporales, tanto en las técnicas de inteligencia artificial y sus combinaciones con otras técnicas para modelar variables complejas, se propone seguir buscar modelos más precisas en la predicción del comportamiento dinámico de la demanda.

8. BIBLIOGRAFIAS:

1. IDMC (2019). Informe Global sobre Desplazamiento Interno, Obtenido de <http://www.internal-displacement.org/global-report/grid2019/>
2. UNHCR (2019). Escasez de agua en el África Subsahariana. Obtenido de <https://eacnur.org/blog/escasez-de-agua-en-africa-subsahariana/>
3. UNHCR (2019). Tendencias Globales de desplazamientos forzados en 2018, Obtenido de <https://www.acnur.org/stats/globaltrends/5d09c37c4/tendencias-globales-de-desplazamiento-forzado-en-2018.html>
4. DNH (2019). Cadre de dépenses a moyen terme CDMT 2020-2022 ‘‘Sous-Secteur Eau’’. Obtenido de www.dnhmali.org/IMG/pdf/-275.pdf
5. UNICEF (2015). Mali : Contrôle de la durabilité des interventions WASH au Mali. Obtenido de https://www.unicef.org/evaldatabase/index_89774.html
6. UNICEF (2018) : Evaluation de la Réponse Humanitaire de l’UNICEF à la Crise Malienne 2013-2017. Obtenido de https://www.unicef.org/evaldatabase/index_103461.html
7. Defensoría del pueblo de Ecuador (2016). Agua y saneamiento en situaciones de emergencia y desastres naturales, Obtenido de https://www.cndh.org.mx › files › doc › Doc_2016_046
7. CRS (2009) AGUA Y CONFLICTO : INCORPORAR LA CONSTRUCCIÓN DE PAZ AL DESARROLLO DE AGUA . Obtenido de https://www.crs.org/sites/default/files/tools-research/agua-y-conflicto_0.pdf
8. CICR (2009). Agua y la guerra: La respuesta del CICR. Obtenido de https://www.icrc.org/es/doc/assets/files/other/icrc_003_0969.pdf
9. CICR (2012). Malí: el acceso al agua potable preocupa a la población del norte del país. Obtenido de <https://www.icrc.org/es/doc/resources/documents/update/2012/mali-update-2012-07-27.htm>
10. OCHA MALI (2019). Plan de réponse humanitaire (Janvier à décembre 2019). Obtenido de <https://reliefweb.int/report/mali/mali-plan-de-r-ponse-humanitaire-janvier-d-cembre-2019-version-r-vis-e-juillet-2019>
11. OCHA MALI (2015). Bulletin humanitaire Afrique de l’Ouest et du Centre, Obtenido de <https://reliefweb.int/report/mali/bulletin-humanitaire-afrique-de-l-ouest-et-du-centre-d-cembre-2015>

12. CLUSTER WASH, NORD MALI (2016). Revue de données secondaires EHA, décembre 2016. Obtenido de http://www.reachresourcecentre.info/system/files/resource-documents/reach_gwc_mli_revue_de_donnees_secondaires_eau_hygiene_et_assainissement_decembre_2016.pdf
13. DNH (2018), Rapport annuel d'activités 2017, Obtenido de <https://www.dnhmali.org/IMG/pdf/-233.pdf>
14. DNH (2019), RAPPORT Bilan 2018, Obtenido de www.dnhmali.org/IMG/pdf/-274.pdf
15. VELITCHKO G. TZATCHKOV, VÍCTOR H. ALCOCER-YAMANAKA (2016). Modelación de la variación del consumo de agua potable con métodos estocásticos. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000300115
16. DUBE E y VAN DER ZAAG, P. Analysing water use patterns for demand management : The case of the city of Masvingo, Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth 28, 805 – 815. 2003.
17. JUAN SEBASTIÁN VELÁSQUEZ TRUJILLO (2009). Estimación de la demanda de agua urbana residencial: factores que la afectan, conservación del recurso y planteamiento metodológico desde el ordenamiento territorial y las medidas de conservación. Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/867/1/71383331_2009.pdf
18. BOLAND, J. J. (1997), Urban Water Demand Management and Planning. McGraw-Hill, New York.
19. CLUSTER WASH DE TOMBOUCTOU (2018). Compte-rendu de la réunion du groupe thématique Wash. Obtenido de https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/compte_rendu_-_reunion_du_cluster_wash_tombouctou-mali_de_novembre_2018.pdf
20. DNH (2010), Rapport annuel d'activités 2019, Obtenido de http://mali.countrystat.org/fileadmin/user_upload/countrystat_fenix/congo/docs/Bilan_DNH_2009%20V5%20130310.pdf
21. Nahmias, S., (2007). Análisis de la producción y las operaciones. Mc Graw Hill. Mexico.
22. PYME (2017). Revista PYME. Obtenido de <http://revistapyme.com/2017/05/18/pronostico-de-la-demanda/>

23. Moreno, E (2008). Predicción con series de tiempo y regresión. Panorama No. 4. Tecnología de sistemas PYMES.
24. Masini, J, & Vazquez, F. (2014). Compendio de los modelos cuantitativos de pronósticos. Obtenido de <https://books.google.com.mx/>
25. Zapata T, López S, Silva G. Clasificación métodos de pronósticos. Mc Graw Hill, p. 496, 2017, Bogotá D.C.
26. Danielson, Leon E. (1979). “An Analysis of Residential Demand for Water Using Micro Time-Series Data”, Water Resources Research, Vol. 15, No. 4, pp. 763-767.
27. Foster, Henry & Beattie, Bruce (1979). “Urban Residential Demand for Water in the United States”, Land Economics, Vol. 55, No. 1, pp. 43-58.
28. Nieswiadomy, Michael & Molina, David (1989). “Comparing Residential Water Demand Estimates under Decreasing and Increasing Block Rates Using Household Data”, Land Economics, Vol. 65, No. 3, pp. 280-289.
29. Espey, Molly; Espey, Jae & Douglass, Shaw (1997). “Price Elasticity of Residential Demand for Water: A Meta-Analysis”, Water Resources Research, Vol. 33, No. 6, pp. 1369-1374.
30. Hanemann, Michael (1998). “Determinants of Urban Water Use”. In: J. D. Baumann, J. J. Boland & W. M. Hanemann, Urban Water Demand Management and Planning (pp. 31-76). New York: McGraw-Hill.
31. Höglund, Lena (1999). “Household Demand for Water in Sweden with Implications of a Potential Tax on Water Use”, Water Resources Research, Vol. 35, No. 12, pp. 3853-3863.
32. Arbués, Fernando; García-Valiñas, María & Martínez-Espiñeira, Roberto (2003). “Estimation of Residential Water Demand: A State-of-the-Art Review”, The Journal of Socio-Economics, Vol. 32, No. 1, pp. 81-102.
33. Dalhuisen, Jasper; Florax, Raymond; de Groot, Henry & Nijkamp, Peter (2003). “Price and Income Elasticities of Residential Water Demand: A Meta-Analysis”, Land Economics, Vol. 79, No. 2, pp. 292-308.
34. Olmstead, Sheila (2009). “Reduced-Form versus Structural Models of Water Demand under Nonlinear Prices”, Journal of Business & Economic Statistics, Vol. 27, No. 1, pp. 84-94.
35. Worthington, Andrew & Hoffman, Mark (2008). “An Empirical Survey of Residential Water Demand Modelling”, Journal of Economic Surveys, Vol. 22, No. 5, pp. 842-871.

36. Sebri, Maamar (2014). "A Meta-Analysis of Residential Water Demand Studies", *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 16, No. 3, pp. 499-520.
37. Sindy Mayerly López Rodríguez & Tatiana Zapata Zuluaga (2018). *Técnicas de pronósticos en revisión sistémica de literatura para empresas de confecciones*. Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá D.C.
38. Arturo Contreras, Atziry, Martínez Flores y Sánchez (2016). *Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la demanda de almacenamiento de productos perecederos*. Universidad ICESI. Publicado por Elsevier España, S.L.U.
39. B. L. Bowerman, R. T. O'Connell, A. B. Koehler, y M. Balderas Lozada (2017), *Pronósticos, series de tiempo y regresión: un enfoque aplicado*. México: Cengage 50 Learning.
40. Quijada, M.J, y Banda, J.M (2011). *Manual de regresiones*. Puebla-México.
41. Martínez, J. (2012). *Estadística y muestreo*. Bogotá: Ecoe Ediciones.

ANNEXOS

Annexo 1: Series de datos de la población (total, hombre, mujeres, niños y desplazado), temperatura media y humedad. (Fichero Excel externo)

Annexo 2: Código en R de la modelación de la demanda de agua (Fichero Excel externo)