

¿Es posible predecir el comportamiento de los precios de los futuros del agua considerando las características estadísticas de sus respectivos índices? Un enfoque desde las redes neuronales.

Is it possible to predict the behavior of water futures prices considering the statistical characteristics of their respective indices? An approach from neural networks.

María José Bustamante

María José Valero Murcia

Trabajo de grado

Asesora de trabajo de grado:

Paula Maria Almonacid

Universidad EAFIT

Escuela de Economía y Finanzas

2021

## **Tabla de contenido**

Resumen.....	3
Introducción .....	3
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Justificación .....	5
Marco .....	7
Metodología .....	10
Resultados Esperados .....	13
Resultados Obtenidos .....	13
Modelo ARIMA .....	14
Modelo Redes Neuronales LSTM .....	15
Conclusiones .....	17
Bibliografía .....	18

**Palabras clave: Contrato de futuros, agua, transar, commodity, escasez, volatilidad, especulación, precio y bolsa de valores.**

### **Resumen**

El temor a la escasez de un bien tan importante como es el agua conlleva a un debate que consiste principalmente de dos ideas. La primera indica que el agua hasta ahora ha sido un bien de consumo público y un derecho de todas las personas y la segunda indica que mercantilizar el agua ayudará a regular su precio por lo que se logrará prevenir la escasez de este bien. En este informe de investigación se toma en cuenta ambas opiniones, sin embargo, se hace un enfoque en las consecuencias que se obtendrían en el mercado de commodities. Se toma como referencia el estado de California en Estados Unidos, el cual ha presentado altos casos de escasez en los últimos años y se hace uso del índice NQH20 el cual muestra el precio de los contratos futuros del agua en este estado y se realiza un análisis haciendo uso de las Redes Neuronales ya que nos permite hacer inferencias que nos llevarán a anticipar múltiples consecuencias negativas que se pueden dar en el futuro si no se controla ahora el uso de este bien. su escasez o abundancia harán fluctuar el precio.

### **Abstract**

The fear of the scarcity of such an important good as water leads to a debate that consists mainly of two ideas. The first indicates that until now water has been a public good of consumption and a right of all people and, the second indicates that commercializing water will help regulate its price, thus preventing a shortage of this good. In this research report, both opinions are taken into account; however, an emphasis is made on the consequences that would be obtained in the commodities market. The state of California in the United States is taken as a reference, since it has presented high cases of scarcity in recent years and uses the NQH20 index, which shows the price of future water contracts in this state. An analysis is carried out using Neural Networks as it allows us to make inferences that will lead us to anticipate multiple negative consequences that may occur in the future, if the use of this good is not controlled now their scarcity or abundance will cause a huge fluctuation in the price.

### **Introducción**

Según Bloomberg Green (2020), los contratos futuros del agua surgieron por primera vez en Estados Unidos en septiembre de 2020 dadas las circunstancias causadas por las olas de calor e incendios forestales que experimentó la costa oeste de los EE.UU ocasionando daños devastadores y cuando California concluía una sequía de aproximadamente ocho años. Estos contratos aparecen con la misión de servir como protección a los grandes consumidores de agua y al mismo tiempo funcionan como un indicador de escasez para los inversionistas a nivel mundial.

El debate sobre los mercados del agua ha sido un asunto polémico desde principios de la década de 1990, “con defensores enamorados de su potencial para cambiar los sistemas de incentivos en la gestión del agua, de modo que no se eluda la implementación de precios racionales por aquellos con poder político (Rosegrant y Binswanger, 1994). Se espera que los mercados del agua proporcionen ganancias en eficiencia económica a medida que el agua se vuelve cada vez más escasa y se reasigna a usos de menor valor a mayor valor” (Turrall et al., 2005)

En las discusiones que han tenido lugar en el campo de las finanzas, como se mencionó anteriormente, la idea del agua como un commodity no es nueva. Específicamente, en los últimos años se han presentado dos ideas principales: La primera “El agua debe tener precio o debe ser transferida mediante las instituciones de mercado, esto es con el fin de obtener un uso eficiente o, en otras palabras, el uso más beneficioso” (Batista-Medina, 2015). La segunda tiene en cuenta el agua como un input o recurso económico, lo que quiere decir para muchas personas que el problema de escasez del agua es una realidad. “Las comunidades tradicionales que enfrentan la escasez de agua siempre han tratado el agua como un bien económico, es decir, una sustancia que requiere decisiones de compensación en tiempos de sequía o escasez. De lo contrario, no habrían sobrevivido durante siglos o milenios. Sus objeciones a los mercados del agua y el precio del agua se basan en cambio en su comercialización como una mercancía desprovista de religión y cultura.” (Brown, 1997).

De acuerdo con Buitter (2014), economista jefe de Citigroup “El agua como activo, en mi opinión, eventualmente se convertirá en el producto físico más importante: el petróleo, el cobre, los productos agrícolas y los metales preciosos empequeñecen.”. Sin embargo, la idea de convertir el agua en un commodity puede resultar alarmante entre las comunidades. Dumaine (2014), argumenta que el acceso al agua limpia debería ser un derecho humano. Por otro lado, acceder a que las fuerzas del mercado realicen la asignación del recurso traería la posibilidad de poner en peligro a miles de millones de personas que escasamente cuentan con suficiente agua limpia y potable.

Desde la época de los 70 se ha visto que las sequías que ocurren en diferentes partes del mundo, cada vez se han vuelto más largas y se ha venido expandiendo en áreas cada vez más amplias, por lo que el problema de escasez de agua es real, serio y concierne a todos, como indica el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de la ONU.

Sin embargo, con la inversión en agua se plantea un nuevo desafío, ya que para este recurso no se encuentra aún un mercado global establecido, como si existe para otros commodities. La inexistencia de dicho mercado se debe a que este bien acarrea altos costos, por ejemplo; la dificultad de ser transportado. Además, se discute la posibilidad de que se eleven los precios del uso extensivo del agua y con el fin de fomentar la conservación de este bien, las empresas de agua alteren su estructura de precios del bien. (Tang, & Haoxiang Zhu, 2016).

## **Objetivo general**

Predecir el precio en el que cotizará el agua en el mercado de futuros de Estados Unidos haciendo uso de redes neuronales utilizando series de precios diarios en un periodo de tiempo desde el 2019 al 2021.

## **Objetivos específicos**

- Analizar y contextualizar las razones por las cuales surge el agua como commodity a cotizar en el mercado de futuros mediante la revisión de la literatura académica existente sobre el tema.
- Explicar cómo se crean los índices del agua mediante la exploración de las características estadísticas del mismo para detectar posibles patrones en las series de los datos que los constituyen.
- Caracterizar la distribución de cada uno de los índices utilizados para la valoración de los contratos mediante el uso de estadística descriptiva.
- Construir un índice utilizando los datos existentes con el fin de implementarlo como variable dependiente en los algoritmos de redes neuronales y que sea posible visualizarlo mediante elaboraciones gráficas que permiten interpretar estos resultados.

## **Justificación**

En la actualidad se ha evidenciado que la escasez de este recurso es un problema que afecta a toda la población, y una alternativa que se ha presentado para darle solución al problema es asignarle un precio al derecho de poseer el recurso, por lo que se ha decidido transar este commodity en bolsa junto con otros como el petróleo, el gas, el oro, etc. Por otro lado, se evidencia que existe insuficiencia de información sobre cómo se calcula el precio del agua, es por esto que se pretende estimar el precio del agua teniendo en cuenta algunos índices ya establecidos en Estados Unidos.

Estudiar los mercados de futuros del agua trae consigo varios beneficios. En primera instancia, el mercado de futuros del agua conllevará a descubrir el precio mediante el valor de escasez del recurso, lo que resultará en un uso eficiente del mismo. Así mismo, el mercado ayuda a una distribución apropiada, a una asignación eficiente, y presenta mecanismos para lograr la optimización social en el consumo y la producción. (Ghosh N. , 2014)

En segundo lugar, los tomadores de decisiones sociales, a la hora de optimizar el bienestar económico frecuentemente, tienen en cuenta el consumo y la producción de una economía sujeto a algunas restricciones. Aquí radica la importancia de proveer un indicador de precios para el agua almacenada en el futuro, ya que esto ayudará a los tomadores de decisiones a formular planes en temas de inversión y también a la gestión de riesgos. Asimismo, el precio de los futuros, que se forma a partir de la información disponible, proporcionará una base

cuantificada para clasificar los proyectos y eventualmente ayudará a la toma de decisiones. (Ghosh N. , 2014)

Determinar un valor alto para un recurso natural significa la importancia que tendrá para la sociedad, incluso, el hallazgo de los precios en un mercado de futuros indicará el valor de escasez del recurso en función de la disponibilidad futura, por ende, establecerá conciencia pública y una norma sobre la debida gestión de una crisis inminente.

Adicionalmente, los inversionistas del sector financiero realizan la compra de los commodities para obtener una garantía que le entregue mayores ganancias. Por consiguiente, se evidencia que, a mayor demanda de estos bienes, aumenta el precio spot global y se generan mayores retornos esperados. Los precios futuros de este commodity llenaran de herramientas financieras a los inversionistas ya las entidades financieras que necesiten invertir en el sector rural de una manera más transparente, lo que resultaría en una inversión a largo plazo que realmente entregue agua a las áreas que la necesitan en lugar de simplemente asegurar su ausencia. Además, podrán desarrollar nuevos productos convenientes para sus clientes haciendo uso del mercado de futuros del agua. (Australian Stock Exchange, 2006).

Con dicho mercado se logrará promover una mejor tecnología que promueva el uso eficiente de este bien, teniendo en consideración que el desarrollo de este mercado se enfoca en el desarrollo de la información y el procesamiento de datos, por lo que habrá una mayor inversión en herramientas de recopilación de información lo que estimulará aún más la investigación sobre los recursos hídricos y así ayudar en la gestión de crisis del futuro; la razón por la cual no hay incertidumbre alguna de que el mercado de futuros tiene una función primordial más que ejercer en la toma de decisiones, es que el precio descubierto en el mercado de futuros puede ofrecer un mecanismo para extender la justicia e instaurar prioridades de conservación dentro de un presupuesto limitado. (Ghosh N. , 2014)

La cobertura en la bolsa de futuros del agua minimizará el riesgo tanto del productor como el del proveedor pues se crean compensaciones adecuadas por las pérdidas, además, los proveedores estarán en condiciones de traspasar parte de los beneficios a los consumidores. Por otro lado, la sequía ha obligado a los gobiernos a crear más redes de seguridad, estas lograran ayudar de manera significativa a los agricultores. Esto a menudo ha generado presiones sobre el tesoro público; no obstante, un mercado de futuros para el agua actuará como una “institución de rescate” para todos los beneficiarios, reduciendo así la presión sobre el tesoro público. Los municipios también pueden tomar posiciones apropiadas en el intercambio de futuros por agua y así, usar los fondos para el desarrollo de infraestructura con el fin de mejorar los servicios urbanos. (Ghosh & Goswami, 2014).

Teniendo en cuenta los riesgos en que incurren los inversionistas a la hora de adentrarse al mercado del agua, se puede ver que las estrategias propuestas hasta ahora se limitan principalmente a gestionar la oferta y la demanda, por lo cual resulta de gran dificultad que los planes donde se incrementa la oferta tengan éxito en diferentes aspectos como, construcción de presas, interconexión de ríos, etc., ya que el agua se ha asignado por completo y una mayor manipulación de la naturaleza podría, inclusive, resultar

económicamente inviable y ecológicamente insostenible, referente a lo anterior, se puede inferir que ninguna de las estrategias de mitigación de riesgo actual pueda compensar una situación donde el agua ya no esté disponible, más aun, hay una pérdida de valor debido a la falta de disponibilidad de agua, y el costo de la adaptación, mediante el cambio de cultivos o la construcción de almacenes.

Las instituciones crediticias como los bancos pueden asumir un riesgo a la disponibilidad de agua. Como, por ejemplo, un banco puede prestar dinero a un agricultor para que lo invierta en la siembra de un cultivo y se enfrenta a un riesgo inherente cuando el cultivo falla debido a que no llueve. También, si a un procesador agrícola le falta agua le impedirá adquirir los productos que necesita procesar, por lo que igualmente se enfrentaría a un riesgo. Ninguna de estas partes tiene ningún incentivo para negociar los derechos físicos de agua por dos razones: en primer lugar, no pueden usar el agua física una vez comprada. En segundo lugar, los derechos de agua físicos no mitigan el riesgo asociado con la disponibilidad de agua. No hay duda de que el mundo requiere actualmente una institución diferente para protegerse contra este tipo de riesgo. (Ghosh N. , 2014).

Las operaciones que se dan en el mercado del agua requieren del arrendamiento o venta de un extenso conjunto de participaciones en la propiedad del agua, un derecho de agua le da poder al propietario de bombear o desviar agua de ríos, arroyos y cuencas de agua subterránea. Adicionalmente, existen derechos que se transan frecuentemente tales como acciones en bancos de agua subterránea, derechos de almacenamiento en embalses superficiales y derechos a aguas residuales tratadas.

Teniendo en cuenta la teoría clásica del almacenamiento, la relación inventario y rendimiento de conveniencia se vuelve cada vez menos negativa si los inventarios también se mantienen con fines de garantía, por lo que precios altos en las materias primas no reflejan una fuerte demanda solamente, sino que pueden implicar una demanda causada por fricciones de control de capital y financiamiento.

Se prueba una teoría sobre el uso de productos básicos como garantía para el financiamiento; los inversionistas importan productos básicos y los prometen como garantía para obtener mayores rendimientos esperados, bajo el control del capital y la restricción de garantías, las demandas de garantías más altas aumentan los precios de las materias primas y hacen que la relación entre el rendimiento y el inventario sea menos negativa. (Ke Tang, & Haoxiang Zhu, *Commodities as Collateral*. 2016)

### **Marco teórico y antecedentes de la literatura**

Si algo es incuestionable es que el agua es la base de la vida y que dependemos de este recurso para nuestra existencia, para la producción de bienes y servicios que son la base en la que se construye la economía, es por esto que no es extraño que el agua sea un bien muy cotizado y que se haya traído a colación si el agua debiese ser o no tratado como un bien económico.

El uso mundial de este recurso se ha incrementado aproximadamente seis veces en el último siglo y sigue multiplicándose a una escala constante de 1% anualmente, esto ha sido principalmente a causa del crecimiento demográfico, el desarrollo económico y a la variación

en los patrones de consumo conforme explica el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020 Agua y Cambio Climático

La disponibilidad del agua se ha visto afectada también en parte por el cambio climático el cual compromete el acceso y disfrute al agua y saneamiento de millones de personas. Según argumenta Paula Sánchez (2020) "... la ONU estima que en la actualidad unos 2.200 millones de personas carecen de agua potable y 4.200 millones carecen de un sistema de saneamiento adecuado. Esta situación es aún más acusada en regiones que no gozan de una buena gestión hídrica y que sufren las consecuencias del cambio climático."

Y es puntualmente esta tensión hídrica lo que ha conllevado a que el agua llegue al próximo nivel como un bien económico.

La escasez del agua ha traído consigo fuertes consecuencias en los distintos mercados viéndose principalmente afectado el mercado de la agricultura, por consiguiente, con el fin de proteger la disponibilidad del recurso en este sector se opta por llevar a cabo el plan de incorporar el agua como un activo que cotiza en la bolsa con el objetivo de asignarle un precio a este recurso y obtener un control sobre la oferta del recurso considerando que, fijar un precio para los recursos naturales conlleva al aumento de la conciencia pública y política sobre la importancia y disponibilidad del recurso. En ausencia de un mercado formal de agua, no hay forma de expresar los valores de escasez de esta en un marco institucional. Al descubrir los precios, un mercado de futuros indicará el valor de escasez del recurso en función de la disponibilidad futura y, por lo tanto, creará conciencia pública y política sobre cómo manejar una crisis inminente. (Ghosh N. , 2014).

Distintos autores han hecho sus críticas hacia la necesidad de tratar el agua como un bien económico y han argumentado en artículos académicos la importancia de ello. Por ejemplo, de manera más destacada, como se explica en la Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible que se dio en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente de 1992, en Irlanda, se constituyó como uno de sus principios fundamentales que "el agua tiene un valor económico en todos sus aspectos competitivos y debe ser reconocido como un bien económico" y de acuerdo con la misma declaración de Dublín "el fracaso pasado en reconocer el valor económico del agua ha dado lugar a usos derrochadores y dañinos para el medio ambiente y del recurso, la gestión del agua como un bien económico es una forma importante de lograr un uso eficiente y equitativo y de fomentar la conservación y protección de los recursos hídricos." (Barton H. Thompson, 2011)

El hecho de que varios autores académicos contemplen el agua como una mercancía, hace cada vez más esencial el comercio internacional. Tal como lo muestra Dumaine (2014) "esto se debe a que cuando las naciones comercian con cereales, productos agrícolas o incluso madera, en realidad están intercambiando agua, ya que la agricultura consume mucha agua. Este concepto, apodado el comercio de agua virtual por Tony Allan, profesor del King's College de Londres, se volverá cada vez más importante a medida que el agua se vuelva más escasa."



De acuerdo con Howard Chong y David Sunding, quienes muestran distintos casos sobre como algunos investigadores intentan precisar el valor económico del recurso, “las críticas de los economistas y de todas las disciplinas generalmente se dirigen a cómo se determinan los valores de uso del agua y qué usos se incluyen. Los economistas han desarrollado métodos para determinar el valor económico del agua en varios usos. Otros investigadores han cuestionado la conveniencia de utilizar una medida de la disposición a pagar como base del valor.” (Sunding., Chong, 2006). Sin embargo, Brian Dumaine objeta que “la idea de tratar el agua como una mercancía como el petróleo o el oro puede parecer inquietante a primera vista. El acceso al agua limpia debería ser un derecho humano, sostienen muchos, y, de hecho, la ONU aprobó una resolución en 2010 que confirma esta premisa. Además, permitir que las fuerzas del mercado se hagan cargo, podría poner en peligro a miles de millones de personas que, para empezar, apenas tienen suficiente agua limpia y potable.” Dumaine (2014).

El Papa Francisco no está de acuerdo con volver al agua una mercancía, pues teniendo en cuenta la emergencia sanitaria vivida en el 2020 y 2021, explica que no se puede limitar el uso de este recurso e invita la población a reflexionar sobre su valor apoyando las iniciativas educativas que difunden la importancia del agua esto es debido principalmente a que en el saneamiento contra el COVID 19 el agua es esencial. Expresa que “Es necesario garantizar el agua potable y el saneamiento para todos. Agradezco y animo a quienes, con diferentes competencias y responsabilidades profesionales, trabajan por este objetivo tan importante... sin la higiene adecuada, la vida de miles de millones de personas corre peligro». Así explico Dicasterio para el Servicio del Desarrollo Humano Integral (SDHI).

En otro orden de ideas, se evidencia que, en las zonas más áridas del planeta, la agricultura presenta una dependencia fuerte del desvío de los recursos hídricos para la irrigación. De manera simultánea, el rápido incremento de las comunidades, el crecimiento de la industrialización y, lo que es más trascendental, la mayor conciencia pública de los beneficios ambientales de mejorar los flujos internos está ejerciendo una tremenda presión sobre las agencias federales y estatales para reducir estos desvíos. Según Howard Chong y David Sunding, “en el oeste de los Estados Unidos, alrededor del 80% del agua utilizada se usa para la agricultura, y el resto se destina a usos municipales e industriales. Los usuarios urbanos regularmente pagan más que los usuarios agrícolas, hasta diez veces más por el agua, incluso después de tener en cuenta los costos de transacción, entrega y tratamiento.” (Sunding y Chong, Water Markets and Trading, 2006).

Los tipos de ONG, los geólogos y los científicos del clima han estado advirtiendo sobre la escasez de agua dulce durante algún tiempo. "El agua ahora se discute a nivel de la junta", dice David Grant, gerente senior de riesgos y asociaciones del agua en SAB Miller. Asimismo, la directora ejecutiva de PepsiCo, Indra Nooyi, dice: "La crisis mundial del agua es uno de los desafíos más urgentes de nuestra era" e incluso, China está en medio de la construcción de un acueducto para mover el agua del río Yangtze, en el sur del país, hacia el norte, que padece escasez de agua.

Es importante también mencionar e indagar sobre los aspectos económicos del suministro del agua, con el fin de indicar cuales consecuencias traería la escasez de este bien. En el artículo “What is water worth” se muestra claramente un ejemplo de esta situación: en la sequía severa en California en los años 2011-2014 se evidencian las consecuencias que traería la escasez del agua, viéndose principalmente afectada, la contaminación, la agricultura y así mismo, las empresas de industrias alimenticias y bebidas.

Teniendo en cuenta el tamaño del mercado de los recursos naturales que se comercializan de manera más frecuente al compararlo con el del agua, este tiene un tamaño relativamente más pequeño, ahora bien, dada la relativa escasez de suministro de agua, la región ha visto la creación de mercados nacientes y un crecimiento rápido para las transacciones de este bien. El comercio de agua se produce en todos los estados del oeste de Estados Unidos, con más de 20 regiones distintas donde la actividad del mercado ocurre de forma rutinaria.

### **Metodología**

En cuanto al ejercicio de la predicción del precio del agua como un commodity se analizan dos índices del agua ya establecidos en el mundo, el Nasdaq Veles California Water Index Futures (NQH2O) y el World Water Index (WOWAX). El primero rastrea el precio de los arrendamientos de derechos de agua y las transacciones de venta en las cinco regiones más grandes y comercializadas de California y el segundo son dos benchmarks del sector hídrico mundial, los cuales están formados por las 30 empresas más grandes en los campos de servicios, infraestructura y tratamiento de agua a nivel mundial. El índice Nasdaq Veles California Water Index (NQH2O) es producto de la asociación entre el Nasdaq, Veles Water y WestWater Research, llegando a ser el primer índice de agua que compara el precio spot del agua en el estado de California.

Así como menciona el director académico del Foro de la Economía del Agua, Gonzalo Delacamara, el índice a estudiar se creó el 31 de octubre del 2018 y en ese mismo año se presentó el 7 de diciembre el primer periodo para adquirir futuros. Los contratos de futuros son derivados financieros que reflejan un contrato entre dos partes que se comprometen en una fecha concreta y a un precio acordado, a intercambiar un derecho de uso de agua. Es decir, no se adquiere el agua hoy sino el derecho a usarla en el futuro. (Delacamara, 2018)

Este índice lleva a cabo un rastreo de los precios del agua en el estado de California, por consiguiente, representa la valoración actual del agua acorde a lo determinado por las transacciones de derechos del activo en el mercado de aguas superficiales de California. Respondiendo así a las condiciones de demanda y oferta dentro de los mercados físicos de agua subyacentes; provee soluciones innovadoras de gestión de riesgos a las personas y entidades que dependen de los mercados del agua para alinear el mercado.

Teniendo en cuenta otros estudios similares y de acuerdo con la revisión de literatura, para el presente trabajo se recolecta información extraída de Bloomberg, en la cual se realiza una extracción de los precios de cierre para ambos índices y además se realiza una búsqueda de diferentes variables de mercado como lo son el VIX (Cboe Volatility Index) el cual mide la volatilidad del mercado de Chicago, el DXY (U.S Dollar Index) el cual mide la cotización

del dólar frente a un grupo de divisas, los bonos del tesoro a 3 meses para corto plazo y a 10 años para largo plazo. Toda esta información es presentada con una frecuencia diaria con una historia que data de diciembre de 2018 a abril de 2021.

Durante la exploración de la información obtenida, existen diferentes aspectos que deben ser tenidos en cuenta a la hora de trabajar con series de tiempo como, por ejemplo, verificar si la serie es estacionaria, si existe estacionalidad y si está auto correlacionada con la variable objetivo.

La autocorrelación hace referencia a que la relación entre los retornos en función del tiempo es constantemente insignificante; la estacionalidad se relaciona como las fluctuaciones periódicas y podría observarse en una gráfica que muestra la autocorrelación si esta misma muestra una figura sinusoidal y la estacionariedad comprende 3 condiciones: media constante, varianza constante y que la covarianza dependa solo de la distancia entre observaciones.

A cada serie de tiempo ubicada en la base de datos original se le realiza una prueba de raíces unitarias de Dickey-Fuller para detectar presencia de una raíz unitaria bajo el supuesto de normalidad con el fin de testear si la serie en cuestión es estacionaria o si, por el contrario, necesita ser diferenciada, en orden de ser estacionaria en diferencia. Comúnmente, estas series de tiempo financieras no son estacionarias y necesitan ser diferenciadas hasta que se pueda comprobar que son estacionarias, este proceso es denominado como estacionarización. La prueba de raíces unitarias toma como hipótesis nula que la serie tiene una raíz unitaria y que es estacionaria en diferencia y como hipótesis alterna que la serie no tiene una raíz unitaria y que es estacionaria en tendencia.

Con las series de tiempo sin diferenciar se halla el último rezago significativo de la función de autocorrelación y de la función de autocorrelación parcial, el cual es significativo bajo un criterio en el que se halla una cota o una banda de significancia y el último rezago que sea mayor o que sobrepase esa cota entonces será el último rezago significativo esto con el fin de tener una idea más clara de cuantos rezagos usar para realizar la modelación en series de tiempo clásicas y realizar una comparación con el modelo de redes neuronales. Posteriormente se realiza el proceso de estacionarización de la serie en el cual se diferencia una vez cada serie y se realiza de nuevo la prueba de raíces unitarias para determinar si la serie no necesita ser diferenciada nuevamente.

A la base de datos de entrada sin procesar para el entrenamiento se le realiza un proceso de estandarización para cada período de estudio, de modo que cada característica en los datos de entrenamiento tiene una media de 0 y una desviación estándar de 1 y una vez se tiene la base de datos estandarizada se procede a realizar un índice promedio de los dos índices del agua con el fin de tener una sola variable dependiente.

En orden de evaluar la capacidad de las redes neuronales en la predicción del precio futuro del agua, implementamos el modelo de Baseline Prediction con el algoritmo de K-vecinos más cercanos (K-NN). Este proceso realiza el cálculo de la distancia desde un punto de datos nuevo a todos los otros puntos de datos y posteriormente, hace una selección de los puntos

K más cercanos y, por último, destina el punto de datos a la clase que corresponden el mayor punto de datos K.

A continuación, se procede a realizar un enfoque de red neuronal recurrente (RNN) y memoria a corto plazo (LSTM), se hace uso de un modelo univariado y de uno multivariado para predecir los precios del contrato de futuros teniendo en cuenta el promedio de los índices bursátiles.

Las redes neuronales recurrentes usan la salida u output del modelo como una nueva entrada o input y con esto el modelo ahora puede generar una nueva salida y continuar así indefinidamente. A su vez, una red neuronal recurrente se ocupa de los problemas de secuencia porque sus conexiones forman un ciclo dirigido. Dicho de otra manera, consiguen mantener el estado de una iteración hasta la siguiente utilizando su mismo output como input para el paso consecutivo.

La red LSTM o red de memoria a largo y corto plazo es una red neuronal recurrente muy usada en el Deep Learning debido a que se logra entrenar exitosamente grandes arquitecturas de datos. Esta misma es entrenada por medio de una técnica de retropropagación a través del tiempo y puede resultar en la creación de redes recurrentes de gran tamaño y al mismo tiempo, se pueden usar en el machine learning para afrontar problemas complejos de secuencias obteniendo resultados de vanguardia.

Según Jason Brownlee (2016) “En lugar de neuronas, las redes LSTM tienen bloques de memoria que están conectados a través de capas. Un bloque tiene componentes que lo hacen más inteligente que una neurona clásica y una memoria para secuencias recientes. Un bloque contiene puertas que administran el estado y la salida del bloque y opera sobre una secuencia de entrada y cada puerta dentro de un bloque usa las unidades de activación sigmoidea para controlar si se activan o no, lo que condiciona el cambio de estado y la adición de información que fluye a través del bloque.”.

Este tipo de metodología es escogida dado que se ha evidenciado que el hacer uso de las redes neuronales para la predicción del precio del commodity es una de las herramientas con mejor capacidad predictiva debido a que las redes neuronales pueden detectar patrones en los datos y obtener una precisión y clasificación más acertada en comparación a otros métodos de predicción como lo son las regresiones múltiples. Además, el objetivo de las redes neuronales es aprender modificándose automáticamente a medida que va recibiendo más datos o más entradas. E igualmente, las redes neuronales tienen la capacidad de asemejar cualquier tarea.

Es por esto que se pone la atención en el uso de las redes neuronales como herramienta para la predicción del precio futuro del agua ya que al ser un método de inteligencia artificial, ha demostrado ser de vital importancia para hacer pronósticos del mercado de valores, ya que, predecir los precios de los activos es comúnmente visto como una tarea compleja para muchos investigadores y analistas, por lo que se considera de gran importancia poder tener una visión acertada sobre la situación futura del mercado de valores con la finalidad de obtener una inversión buena y exitosa.

Como argumenta Marijana Zekic en su artículo *Neural Network Applications in Stock Market Predictions A Methodology Analysis* "... numerosas investigaciones y aplicaciones de las redes neuronales en la resolución de problemas empresariales han demostrado su ventaja en relación con los métodos clásicos que no incluyen la inteligencia artificial." Es por esto por lo que es esencial contar con sistemas de predicción buenos y efectivos para el mercado de valores ya que estos contribuyen a los comerciantes, inversores y analistas al proporcionar información de apoyo como la dirección futura del mercado de valores.

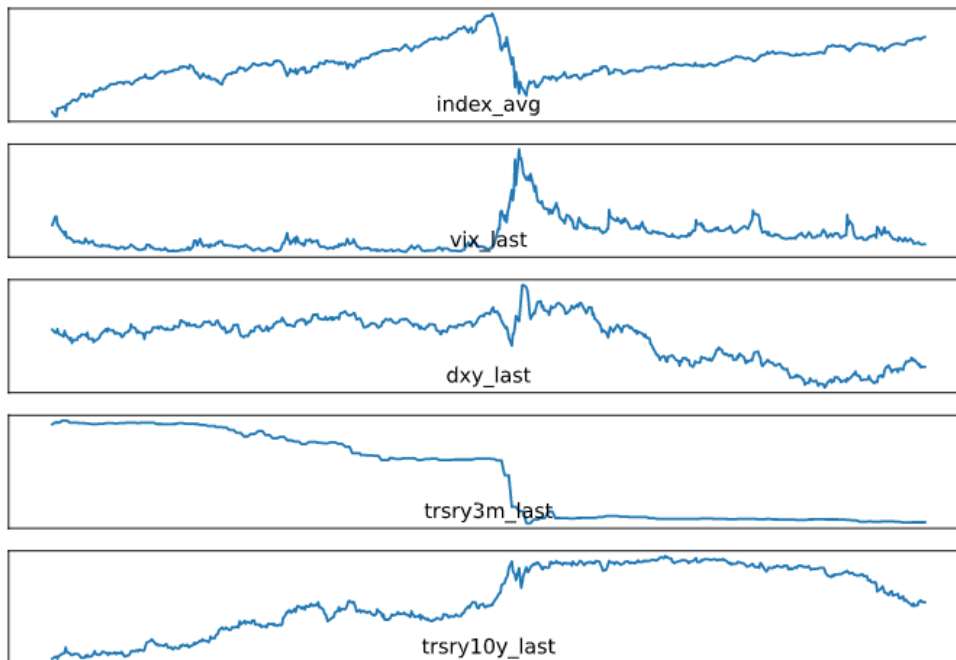
### Resultados Esperados

Se espera obtener una mirada clara a lo que será el mercado de futuros del índice de agua. También, concluir si la red neuronal LSTM puede ser una buena alternativa para la predicción de series de tiempo del mercado de valores entre otros métodos de aprendizaje automático. Por medio de las redes neuronales, esperamos encontrar el precio más acertado del agua en el mercado de futuros para que con esta estimación se logre hacer inferencias y predicciones del comportamiento del commodity en el mercado dadas las diferentes situaciones que se puedan presentar en cuánto a la disponibilidad del recurso.

### Resultados Obtenidos

Se realiza un análisis visual de las series en el cual se gráfica cada serie de tiempo estandarizada lo cual permite observar que todas las series presentan una tendencia a lo largo del tiempo por lo que se infiere que las series son potencialmente no estacionarias.

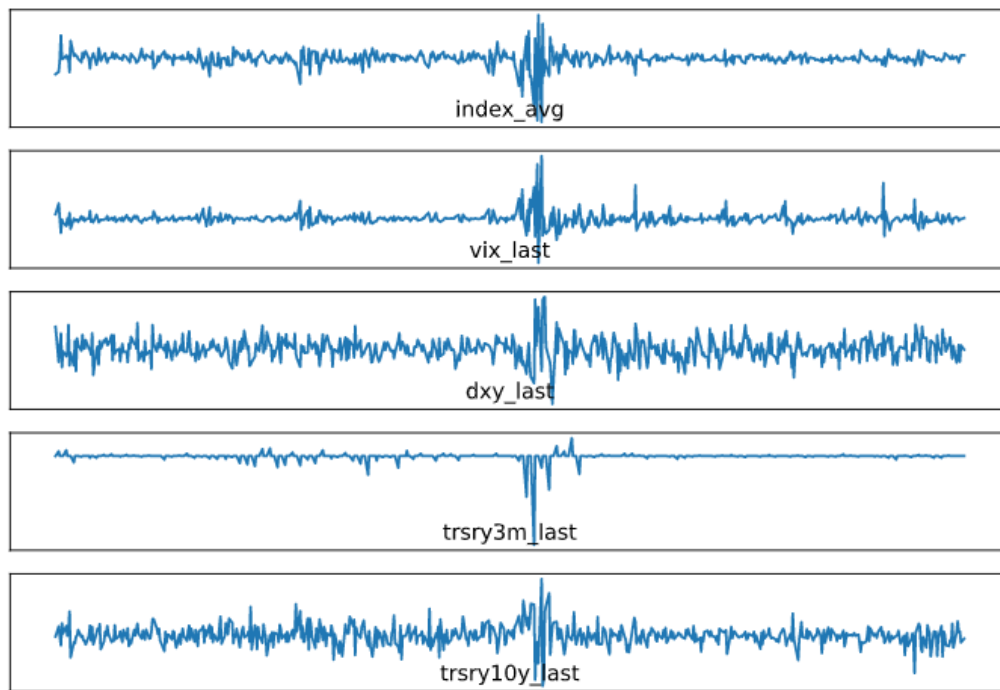
Grafica 1. Series no estacionarias



En orden de confirmar esta hipótesis se realiza una prueba de Dickey-Fuller a cada serie de tiempo. Con los resultados obtenidos en esta prueba, se rechaza la hipótesis nula de estacionariedad en todas las series por lo que se diferencia una vez cada serie y se realiza

nuevamente la prueba de Dickey-Fuller la cual arroja resultados que permiten asegurar que con las series diferenciadas una vez, las mismas son estacionarias. Adicionalmente, al graficar las series estacionarizadas se evidencia visualmente que el movimiento de las mismas oscila sobre una media constante al su distribución y sus parámetros no variar con el tiempo.

Grafica 2. Series estacionarias



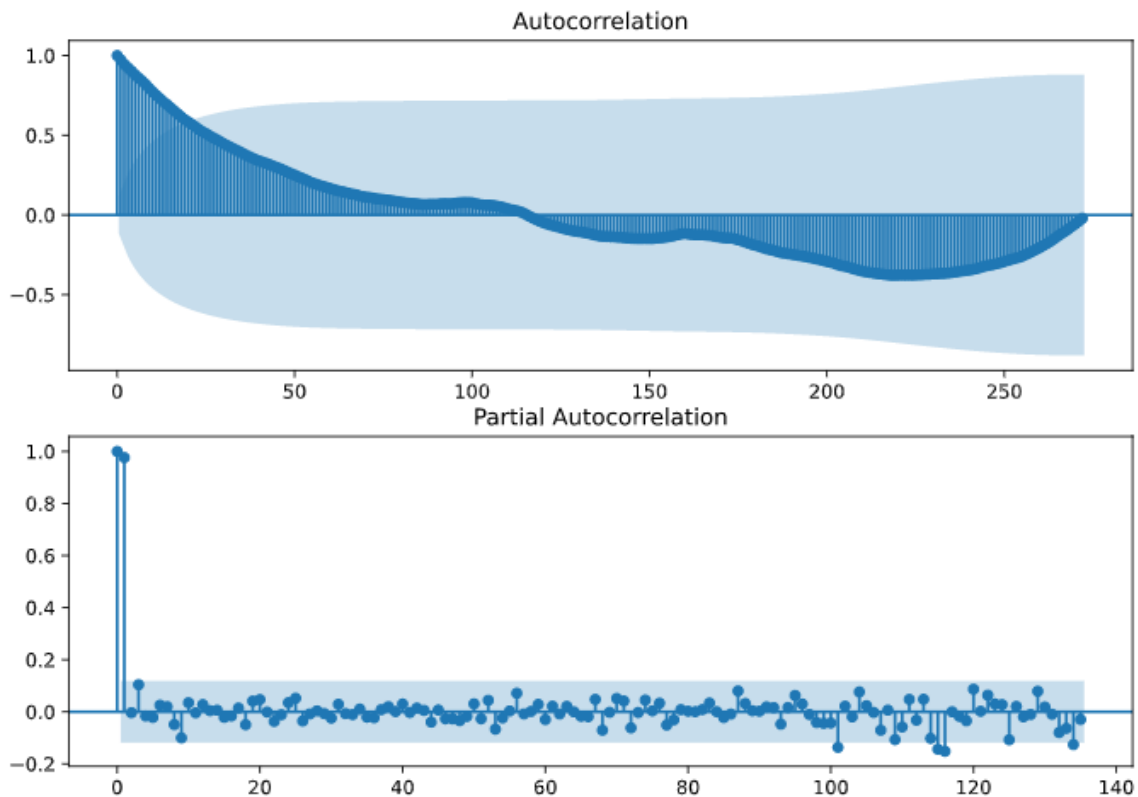
Una vez realizado el proceso de estandarización y estacionarización de las series, se observa en las gráficas que el promedio de los índices y los bonos del tesoro a 3 meses experimentan una caída fuerte, este suceso se observa a principios del año 2020 en donde el mercado sufre de una contracción causada por la pandemia del COVID-19 lo que se ve traducido en que las personas pierden confianza en el corto plazo buscando opciones de inversión a largo plazo lo cual también se ve evidenciado en la gráfica de los bonos del tesoro a 10 años la cual muestra un aumento en la tendencia desde principios del 2020 hasta el 2021. Todo esto se ve resumido en la gráfica del VIX, que muestra un aumento en la volatilidad del mercado en el mes de marzo del 2020, la cual vuelve a ser contante a finales del 2020 y principios del 2021.

### Modelo ARIMA

Para la realización del modelo ARIMA se grafica la función de autocorrelación (ACF) la cual muestra la autocorrelación de una serie de tiempo por rezago y la función de autocorrelación parcial que muestra el resumen de la relación entre una observación en una serie de tiempo con observaciones en pasos de tiempo anteriores (PACF). Para calcular y graficar la autocorrelación, debemos convertir los datos en una serie de tiempo univariante

y estas gráficas se realizan con el fin de obtener una idea más clara de cuantos rezagos se deben usar para realizar la modelación en las series de tiempo clásicas.

Grafica 3



El gráfico ACF demuestra que hay un fuerte componente de autocorrelación entre las observaciones de las series de tiempo, mientras que el gráfico PACF sugiere que este componente es distinto para las primeras dos observaciones de retardo aproximadamente. Esta información indica que un buen modelo de partida sería un AR (2); que es un modelo de autorregresión con 2 observaciones de rezago utilizadas como entrada.

Se encontró con el modelo ARIMA que la estimación de los parámetros por máxima verosimilitud no convergió, pues es posible que no haya encontrado un valor mínimo global o que no haya sido parametrizado correctamente.

### Modelo Redes Neuronales LSTM

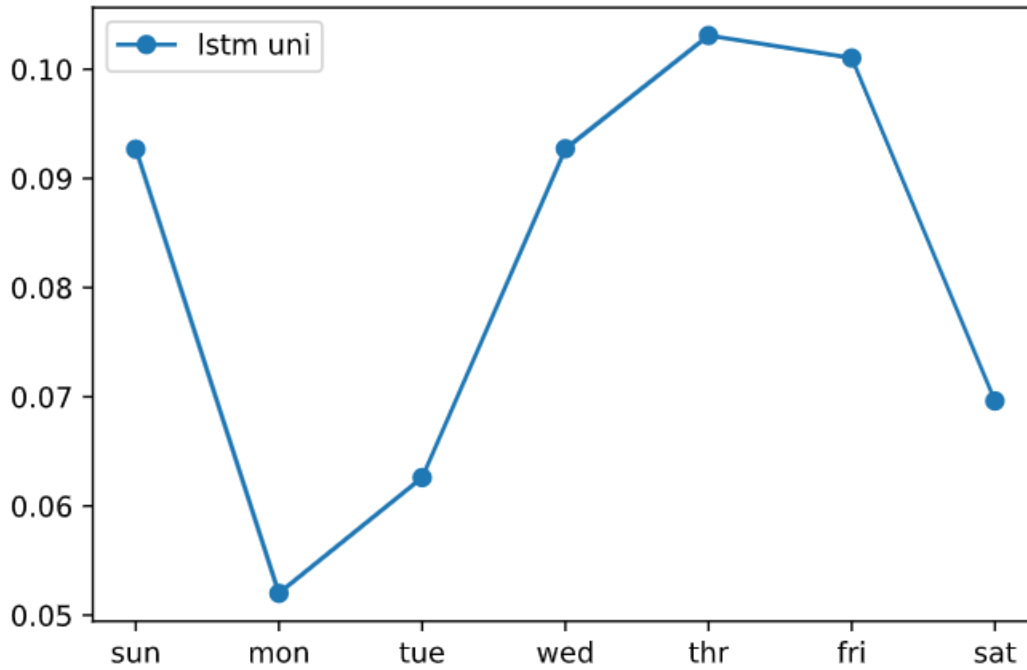
Este tipo de modelos ayuda a predecir el comportamiento de un activo, se hace uso del modelo univariado el cual solo toma un input, es decir, se transforman todas las series de manera que queden condensadas en un solo vector y que este sea el input del modelo y también se realiza un modelo multivariado el cual, si toma varios inputs, es decir, se puede alimentar con las series como vectores por separado.

Los resultados de los modelos muestran el desempeño del modelo para los 7 días de la semana. Se muestra el error cuadrático para cada día de la semana y este se puede

interpretar como la diferencia entre los datos observados y los datos predichos. Dicho esto, los días de la semana en donde se aprecia que el error cuadrático medio es menor significa que estos son los días en los que las predicciones son mejores y por ende, estos son los días en los que un inversionista puede tomar una decisión más acertada sobre cuando comprar o vender en el mercado financiero.

### Modelo Univariado Redes Neuronales

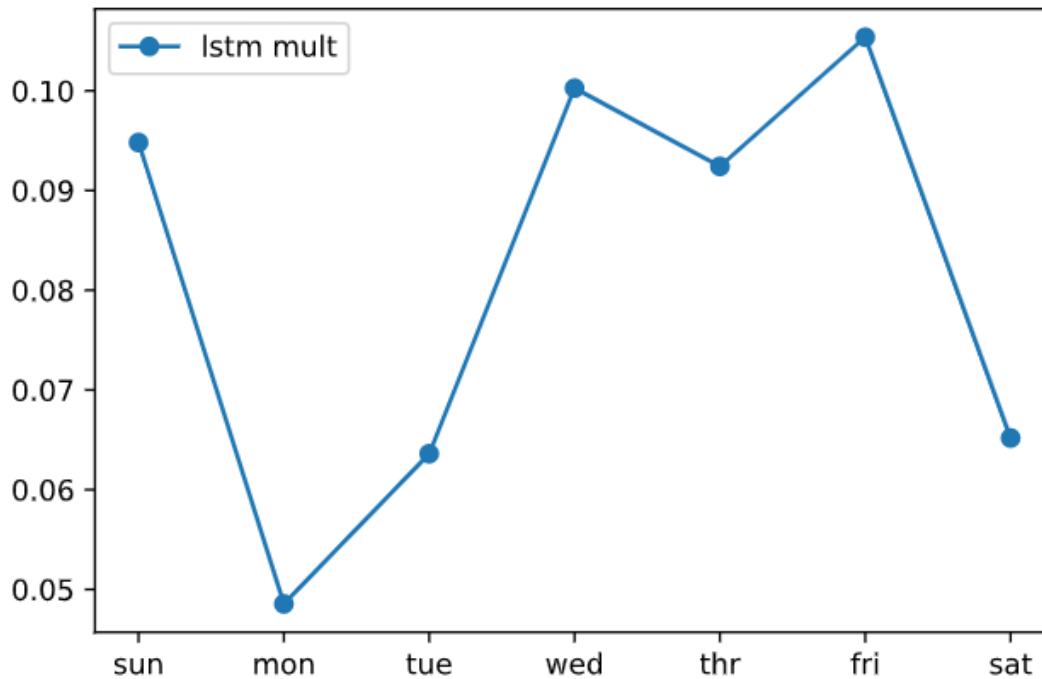
Grafica 4



### Modelo Multivariado Redes Neuronales



Grafica 5



Teniendo en cuenta el análisis anterior, en las dos gráficas se ve evidenciado que los días más seguros o acertados para predecir son el lunes, el martes y el sábado dado que la raíz del error cuadrático medio es muy baja en estos días. Sin embargo, para los otros días, este error no es alto, ni siquiera para el día en que la raíz del error es más alta ya que es aproximadamente 0.1 lo cual es un resultado muy bueno a pesar de ser el valor más alto del error. Por lo tanto, los resultados de ambos modelos son muy prometedores y generan una gran confianza en cuanto a las predicciones del precio de los contratos futuros del agua que realiza el modelo.

### Conclusiones

Los modelos de LSTM demuestran ser modelos poderosos para la predicción del comportamiento del precio de los contratos del agua en el mercado financiero dado que principalmente cuentan con una memoria a largo plazo y al ser modelos de series temporales pueden predecir una gran cantidad de pasos en el futuro. En conclusión, los resultados de estos modelos comprueban que las redes neuronales son una herramienta excelente para la predicción de precios y en base a los resultados que arrojan se pueden hacer inferencias y suposiciones sobre el futuro comportamiento del activo en el mercado.

Por otro lado, a pesar de que predecir el movimiento de los precios de las acciones o commodities es una tarea compleja es de gran utilidad, ya que, desde el punto de vista de los inversionistas, estos modelos muestran ser una herramienta que puede ayudar a disminuir el riesgo asumido a la hora de tomar una decisión de la inversión y así, aumentar los retornos.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que la predicción haciendo uso de los modelos mencionados poseen cierto margen de error, por lo que se debe acompañar de otras

herramientas que nos permitan tener una mayor certeza sobre cuánto se debe invertir ya que estos modelos simplemente nos dan una idea acerca de la decisión de inversión que se debe tomar.

### **Bibliografía**

Agudelo, D., Agudelo, D. A., & Peláez, J. (2018). Determinantes y pronóstico de la actividad bursátil del mercado accionario colombiano. *Journal of Economics, Finance & Administrative Science*, 23(44), 4–28. <https://doi-org.ezproxy.eafit.edu.co/10.1108/JEFAS-06-2017-0068>

Batista-Medina, J. A. (2014, December). Regreso a Dublín: ¿gestionan las comunidades tradicionales el agua como recurso económico? Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222015000200007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222015000200007&script=sci_arttext)

Brown, F. L. (2009, January 22). Water Markets and Traditional Water Values: Merging Commodity and Community Perspectives. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02508069708686655>

Chartres, C. J., & Varma, S. (2010, January 01). Out of water: From abundance to scarcity and how to solve the world's water problems. Retrieved from <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/36553>

Chipman, K., 2021. California Water Futures Begin Trading Amid Fear of Scarcity. [online] Bloomberg.com. Available at: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-06/water-futures-to-start-trading-amid-growing-fears-of-scarcity>> [Accessed 22 March 2021].

Chong, H., & Sunding, D. (2006, November). Water Markets and Trading. Retrieved from <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.31.020105.100323>

Dumaine, B. (2014). What Is Water Worth? *Fortune*, 169(7), 94–100.

Ke Tang, & Haoxiang Zhu. (2016). Commodities as Collateral. *Review of Financial Studies*, 29(8), 2110–2160. <https://doi-org.ezproxy.eafit.edu.co/10.1093/rfs/hhw029>

Nasdaq Veles Water Index. (2020, October 12). Retrieved from <https://www.nasdaq.com/solutions/nasdaq-veles-water-index>

Ramos, A. W. (2021, March 22). Papa Francisco: La "hermana agua" no es una mercancía. Retrieved from <https://es.aleteia.org/2021/03/22/papa-francisco-la-hermana-agua-no-es-una-mercancia/>

Thompson, B. H., Jr. (2012). Water as a public commodity.

Turrall, H., Etchells, T., Malano, H., Wijedasa, H., Taylor, P., McMahon, T. and Austin, N., 2005. Water trading at the margin: The evolution of water markets in the Murray-Darling Basin. *Water Resources Research*, 41(7).

