

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Solución de conflictos por compartición de aguas
con Teoría de Juegos.

Autor: Rocío Limón Alonso-Morgado

Tutor: Manuel Ordóñez Sánchez

Dpto. Matemática Aplicada II
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Solución de conflictos por compartición de aguas con Teoría de Juegos.

Autor:

Rocío Limón Alonso-Morgado

Tutor:

Manuel Ordóñez Sánchez

Dpto. de Matemática Aplicada II
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

1 PROYECTO FIN DE CARRERA: SOLUCIÓN DE CONFLICTOS POR COMPARTICIÓN DE AGUAS CON TEORÍA DE JUEGOS.

Autor: Rocío Limón Alonso-Morgado

Tutor: Manuel Ordóñez Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mi familia y amigos, por haberme acompañado durante estos años de estudio

Resumen

En este trabajo estudiamos el uso de recursos naturales del río Yangtsé: la navegación, el agua como bien de consumo, la energía hidráulica y los sedimentos para su conversión a fertilizantes. Este estudio trata de asignar los costes de diversos agentes que usan estos recursos de manera proporcional.

Hemos tenido en cuenta el régimen político del país por el que discurre el río asumiendo que la reducción de costes se equipara con el control de la polución por parte sobre todo de las empresas.

Hemos usado técnicas de juegos no cooperativos para su resolución.

Abstract

In this project we have studied the natural resources uses of Yangtze river: sailing, water as household good, hydraulic energy and sediments for conversion to fertilizers. This study wants to assign proportionally some agent costs who uses those resources.

We have kept political regime of the country where the river flows in mind, assuming reduction of costs is equated with the control of the pollution on the part of the companies.

We have used non-cooperative game techniques for resolution.

Índice

1 Proyecto Fin de Carrera: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla	5
<i>Agradecimientos</i>	7
<i>Resumen</i>	8
<i>Abstract</i>	9
<i>Índice</i>	10
Índice de Figuras	12
1 Conflictos internacionales en aguas compartidas. Introducción	13
1.1 <i>Trasvase Tajo-Segura</i>	13
1.2 <i>Río Snowy (Australia)</i>	15
1.3 <i>Trasvase Norte-Sur (China)</i>	15
1.4 <i>Lesotho Highland Water Project (Lesoto y Sudáfrica)</i>	16
1.5 <i>Trasvase Tigris-Éufrates: Acueducto Nacional de Israel</i>	17
1.6 <i>Trasvase Rin-Meno-Danubio (Alemania)</i>	18
1.7 <i>Disputa en el río Kaveri (India)</i>	20
1.8 <i>Canal de Moscú</i>	21
1.9 <i>Acueducto de Tamagawa, Japón</i>	22
1.10 <i>Canal de Karakum (Turkmenistán)</i>	22
1.11 <i>Canal Irtish-Karagandá (Kazajistán)</i>	23
1.12 <i>Canal de Provenza (Francia)</i>	25
2 Teoría de Juegos cooperativos y no cooperativos	27
2.1 <i>Introducción</i>	27
2.2 <i>Juegos cooperativos</i>	28
2.2.1 <i>El conjunto de imputaciones</i>	29
2.2.2 <i>El conjunto de imputaciones</i>	30
2.2.3 <i>El valor de Shapley</i>	30
2.3 <i>Juegos no cooperativos.</i>	31
2.3.1 <i>Equilibrio de estrategias de maximin y minimax.</i>	31
2.3.2 <i>Equilibrio de estrategias dominantes.</i>	32
3 La situación en China. Análisis del país	33
3.1 <i>Aspectos geográficos</i>	33
3.1.1 <i>Geografía</i>	33
3.1.2 <i>Clima</i>	34
3.1.3 <i>Población</i>	35
3.2 <i>Aspectos económicos, agrícolas y alimentarios</i>	35
3.3 <i>Aspectos hídricos</i>	36
3.3.1 <i>Recursos de agua superficiales. Ríos</i>	36

3.3.2	Glaciares	37
3.3.3	Aguas subterráneas	37
3.3.4	Lagos y presas	37
3.3.5	Fuentes de agua no convencionales	38
3.3.6	Escasez de agua	39
3.3.7	Proyectos de transferencia de agua	40
3.3.8	Uso del agua	40
3.4	<i>Riego y desarrollo del drenaje</i>	41
3.4.1	Evolución y distribución de las zonas de riego	41
3.4.2	Papel del riego en la producción agrícola, la economía y la sociedad	42
3.5	<i>Gestión de agua, políticas y legislación relacionadas con el uso del agua en la agricultura</i>	42
3.6	<i>Medio ambiente y salud</i>	42
4	Problemática a abordar, modelo y resolución	44
4.1	<i>Problema</i>	44
4.2	<i>El problema en China</i>	45
4.3	<i>Modelo</i>	47
4.3.1	Coste de navegación	47
4.3.2	Coste del agua	49
4.3.3	Coste de la energía eléctrica	49
4.3.4	Coste de los fertilizantes/sedimentos	50
4.4	<i>Resolución</i>	50
4.4.1	Medidas para evitar la polución	53
	Conclusiones	56
	Bibliografía	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Recorrido del Trasvase Tajo-Segura	14
Figura 2. Pantano del Talave, Albacete.	14
Figura 3. Mapa de ríos de Australia.	15
Figura 4. Proyecto trasvase de agua norte-sur.	16
Figura 5. Lesotho Highland Water Project	16
Figura 6. Recorrido del Acueducto Nacional de Israel	17
Figura 7. Planta desalinizadora de Hadera, en Israel.	17
Figura 8. Valle del Jordán.	18
Figura 9. Mapa del canal RMD	19
Figura 10. Canal RMD	20
Figura 11. Mapa río Kaveri, India.	20
Figura 12. Acueducto de Tamagawa.	22
Figura 13. Canal de Karakum	23
Figura 14. Canal Irtysh-Karagandá	24
Figura 15. Canal de Provenza	25
Figura 16. Mapa político de la República Popular de China	33
Figura 17. Cultivos de arroz, China.	34
Figura 18. Participación de la agricultura China en el PIB	35
Figura 19. Capacidad de las cuencas fluviales de China.	36
Figura 20. Ríos que fluyen desde otros países hasta China.	37
Figura 21. Presa de las Tres Gargantas, China.	38
Figura 22. Inundaciones del río Amarillo durante el verano de 1931	39
Figura 23. Agua extraída por sector, año 2005.	40
Figura 24. Agua extraída por fuente, año 2005.	41
Figura 25. Río Amarillo (Huang) teñido de rojo debido a la contaminación por vertidos de una planta de calefacción.	42
Figura 26. Río Han por la ciudad de Wuhan	46
Figura 27. Cuenca del río Han, afluente del Yangtsé	46
Figura 28. Barcazas de carga en el Gran Canal en Suzhou, provincia de Jiangsu, China.	48

1 CONFLICTOS INTERNACIONALES EN AGUAS COMPARTIDAS. INTRODUCCIÓN

El agua es el componente más abundante sobre la corteza terrestre. Se concentra de diversas formas, ya sea en ríos, océanos, nubes, aguas subterráneas, etc. Es uno de los elementos fundamentales que sostienen la vida del planeta, pues gracias a ella se desarrollan todos los procesos biológicos que la hacen posible. Por tanto, podemos decir que el agua es un recurso esencial para todo ser humano, además de ser vital para la subsistencia de todo ser vivo de la Tierra.

En el año 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció como de derecho humano el acceso al agua y al saneamiento. Estableció que la cantidad suficiente, para su uso doméstico y personal, estaba entre los 50 y 100 litros al día por persona. Además, debía ser asequible para todos (siendo su coste adecuado menor de un 3% de los ingresos) y accesible físicamente, debiendo estar a menos de 1000 metros de cada hogar. El acceso a agua potable reduce considerablemente la transmisión de enfermedades y patógenos, y es crucial para mantener una buena salud. Sin embargo, son muchas las personas que tienen dificultades diariamente para obtenerla, concretamente 2.100 millones de personas en el mundo, según la OMS, una cifra realmente inquietante.

Asimismo, si añadimos a los diferentes intereses de uso del agua las fronteras que obligan a compartirla y gestionarla de manera conjunta, es común que se den conflictos entre las partes interesadas. La palabra *rival*, tiene su origen etimológico en la palabra latina *rivalis*, que significa *el que está o vive al otro lado del río*. En innumerables ocasiones a lo largo de nuestra Historia, los ríos han servido para delimitar fronteras de terrenos y propiedades, lo cual ocasionaba rivalidades entre los vecinos, ya fuera por cuestiones de uso del cauce del río o por arrojar desechos al agua. Este tipo de disputas ya se darían en la revolución neolítica, cuando el hombre pasó de ser nómada a sedentario para dedicarse a la agricultura y la ganadería; esto haría que los ribereños compitieran por el agua disponible en la zona donde estuvieran asentados. De esta manera, las cuestiones que desencadenan los conflictos por el agua tienen su origen en la búsqueda de una buena calidad de esta, de querer tenerla siempre de manera disponible y en las cantidades deseables.

Es frecuente, sin embargo, el uso de trasvases en una misma región para solucionar este tipo de problemas. Los trasvases son obras hidráulicas que tratan de aumentar la disponibilidad de agua en una zona adicionándola desde una cuenca cercana, ya sea por la necesidad de abastecimiento de agua potable debido a una población numerosa, para el riego de tierras de buena calidad que carecen de recursos hídricos o, simplemente, para la generación de energía hidroeléctrica. A pesar eso, este tipo de obras puede acarrear un impacto social significativo, por la gran superficie de terreno que ocupa.

1.1 Traslase Tajo-Segura

El traslase Tajo-Segura transporta el agua desde la cabecera del Tajo, que previamente es regulada en los embalses de Entrepeñas (Guadalajara) y Buendía (Cuenca), hasta el río Mundo, afluente del Segura, atravesando las cuencas del Guadiana y el Júcar, en la cual utiliza el embalse de Alarcón como elemento de tránsito. Una vez que llega a la cuenca del Segura, el agua trasvasada es mezclada con agua desalada, superficial y subterránea. Su longitud es de 292 km y tiene una capacidad de 33 m³/s.

Cuenta con cuatro tramos bien diferenciados. El primero ellos, incluye la elevación reversible de Altomira, en la que se eleva el agua desde la presa de Bolarque, a una cota de 636 m, hasta el embalse de Bujeda, situado en la Sierra de Altomira, realizado a través del bombeo realizado en la central reversible de Bolarque II. El segundo tramo enlaza con el embalse de Alarcón, en la cuenca del Júcar, donde se subsanan las posibles averías, siendo este un tramo intermedio del traslase. El siguiente tramo, conecta este último embalse con el túnel de Talave y,

finalmente, el último tramo, constituido principalmente por dicho túnel, se encarga de conducir el agua hasta el embalse de Talave.

Cuando el agua llega a la cuenca del Segura, el agua que ha sido trasvasada hasta allí, es mezclada con agua desalada, superficial y subterránea dentro de una red regional de conducciones, embalses y blasas.

Su principal objetivo es facilitar agua en la zona receptora, unos $0,5 \text{ km}^3/\text{año}$, garantizando así el suministro de agua a 147000 ha de regadío y 76 municipios. El volumen de agua del trasvase cada año es variable porque depende de la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del Tajo. En la última década se llegó a trasvasar $0,6 \text{ km}^3$, el máximo legal establecido.

Fue planteado en el Plan Nacional de Obras Hidráulicas en 1933, y posteriormente retomado en 1967, en el “Anteproyecto General del Aprovechamiento Conjunto de los recursos hidráulicos del Centro y Sureste de España. Complejo Tajo-Segura”. Se construyó años después y se inauguró en 1979. El Gobierno creó la Comisión Central del Acueducto Tajo-Segura en el año 1978, para gestionar el correcto funcionamiento del trasvase, aprobando las cantidades a trasvasar del Tajo al Segura, mediante la aplicación del Real Decreto 1982. Si las reservas de agua en la cabecera del Tajo son inferiores a 557 m^3 , las decisiones tomadas por la Comisión Central de Explotación precisan la ratificación del Gobierno en el Consejo de Ministros. Cuando las reservas de agua en el cauce superior Tajo no superan los 240 m^3 , la legislación impide la realización del trasvase de agua al río Segura. Por último, la Comisión Central de Explotación fija también la cantidad que debe pagar la Confederación Hidrográfica del Segura a la del Tajo, para poder compensar los gastos de explotación del trasvase en el tramo Bolarque-Talave, tal y como recoge el Real Decreto 2530/1985.



Figura 2. Pantano del Talave, Albacete.



Figura 1. Recorrido del Trasvase Tajo-Segura

Desde que se construyó el acueducto hasta nuestros días, se han conseguido trasvasar un total de 10.000 hm^3 .

1.2 Río Snowy (Australia)

La zona interior de Australia cuenta con tierras aptas para poder cultivarlas, sin embargo, la región carece de agua suficiente para ello. Dos terceras partes del país son desérticas o semidesérticas, y experimentan una alta evaporación, ya que solo el 10% de las precipitaciones abastece los ríos. Por eso, se han realizado numerosos trasvases, que atraviesan la Gran Cordillera Divisora, situada en la zona suroriental de Australia, para llevar el agua desde la costa hasta el interior del país. Esta cordillera divide las aguas de la mitad oriental de Australia.



Figura 3. Mapa de ríos de Australia.

De todos los ríos que nacen allí y fluyen hasta el oeste, tan solo el río Murray es permanente, teniendo un caudal mayor en su nacimiento, en la región del monte Kosciusko, debido a los deshielos y a sus dos grandes afluentes: el Darling y el Murrumbidgee.

Como consecuencia de lo anterior, se ideó el Snowy Mountains Scheme, plan hidroeléctrico y de regadío que abarca 16 grandes embalses, 7 centrales hidroeléctricas, más de 145 km de túneles y unos 80 km de acueductos, la mayoría en el Parque Nacional de Kosciuszko, que fueron

construidos en los años 1949 y 1974, con un coste de dos millones de dólares australianos. La obra se caracteriza por una capacidad de almacenamiento de 7 km³ y una generación de 3756 MN. Gracias a él, el agua del río Snowy junto con alguno de sus tributarios, que discurrían por las llanuras del este de Gippsland hasta el mar de Tasmania (Océano Pacífico), se captura altas cotas y se conduce hasta las cuencas de los ríos Murray y Murrumbidgee a través de dos redes de túneles que atraviesan las montañas de Snowy. Además, gracias a la caída de 800 metros de agua en las centrales, se genera potencia en los picos de carga del Territorio de la capital australiana, Nueva Gales del Sur y Victoria.

En 1938, las aguas del río Snowy se caracterizaban por el aprovechamiento hidroeléctrico de estas. Cuando una gran sequía causó grandes daños a los regadíos del Murrumbidgee, afluente del río Murray, el más grande de Australia, se decidió cambiar el uso del agua del río. Tras plantear un trasvase a dicho río, el estado de Victoria declaró la necesidad de obtener energía hidroeléctrica del río como lo hacía anteriormente, por lo que se puso fin al problema con la construcción de una presa. Además de la producción hidroeléctrica, también se derivan 1,1 km³/año a la cuenca del Murray-Darling, que se destinan a fines de regadío, como decíamos anteriormente.

Es por tanto que el plan ha producido considerables beneficios económicos, pues esto genera un valor añadido de 115-145 millones de dólares estadounidenses al año. También, mediante las carreteras de su infraestructura, se ha facilitado el acceso a zonas turísticas y recreativas, unos tres millones de visitantes al año, creando además oportunidades de empleo indirecto.

Es el proyecto más grande que aprovecha energías renovables en Australia, y tiene un papel muy importante en el mercado nacional de electricidad. Además, actúa también como medida de seguridad de los flujos de la cuenca de Murray-Darling, pues provee cerca de 2.100 gegalitros de agua a dicha cuenca que es de vital importancia para la agricultura del país.

1.3 Trasvase Norte-Sur (China)

China es un país con una gran densidad de población y una gran extensión de superficie regada, por lo que el

agua disponible no puede considerarse demasiado abundante. Además, debido a la irregularidad temporal y espacial de las lluvias en el país y a la contaminación de los recursos existentes, la situación se ve agravada. El agua es un recurso mal repartido. Mientras en el norte del país, donde se producen fuertes sequías por ser una región bastante árida, se requiere en grandes cantidades para la agricultura y el consumo humano, en el sur se producen con suma frecuencia grandes inundaciones. El 80% del agua de China está en el sur, para el 50% de la población. Ante esta situación, China responde con grandes trasvases y presas, para facilitar la distribución del agua. A medida que aumentan los ingresos, se incrementa la demanda de agua por habitante.

Aproximadamente el 40% de las tierras cultivadas y el 30% de la producción industrial bruta, dependen del 10% de los recursos hídricos. Por eso, se han realizado varios trasvases que atraviesan zonas con un gran número de explotaciones agrícolas e industriales y un elevado índice de población. Todo esto ha derivado en numerosos problemas ambientales, tales como la variación del nivel freático, la inclusión de agua marina o las alteraciones en la calidad del agua.



Figura 4. Proyecto trasvase de agua norte-sur.

En la década de 1990, el río Amarillo, el segundo mayor de China, hubo ocasiones en las que llegaba seco al mar, ya que cruzaba un área muy industrializada. En una de ellas, en 1997, durante 226 días no llegó nada de agua. Es por ello que se diseñó el proyecto de Transferencia de Agua Sur-Norte que trata de desviar 44800 hectómetros cúbicos de agua por año desde el sur al norte del país, desde la cuenca del río Yangtsé hasta más de 1000 km, a las cuencas del río Amarillo y del río Hai, en el norte. El río Yangtsé nace en las montañas del Tíbet y cuenta con cientos de afluentes. Su longitud es de 6300 km y atraviesa China de oeste a este. Produce el 40% de la

riqueza del país, y su cuenca representa el 20% de la superficie total del país. Estos estudios se iniciaron en la década de 1950 y dieron como resultado tres proyectos de trasvase: el Proyecto de la Ruta del Oeste (PRO), el Proyecto de la Ruta Media (PRM) y el proyecto de la Ruta Este (PRE). La Administración para la Protección del Medio Ambiente de China ha elaborado los Estudios de Impacto Ambiental de las rutas Este y Central, aprobando la construcción de los proyectos. La ruta del Oeste se está evaluando actualmente.

Las vías Central y del Este del trasvase eran las más urgentes, ya que suministran agua a la capital del país, Pekín, a Tianjin y a la provincia de Shandong. Su puesta en servicio se inició en 2014, aprovechando parte del Gran Canal, el río artificial más largo del mundo, construido en el siglo XIII como gran vía acuática para el transporte del grano entre el sur y el norte de la China Imperial. La vía Oeste, que debía realizarse en el Tíbet, en la cabecera de los dos ríos más importantes de China, el río Amarillo y el Yangtsé, ha quedado aplazada.

1.4 Lesotho Highland Water Project (Lesoto y Sudáfrica)

Se trata de un proyecto de suministro de agua en curso, desarrollado gracias a la colaboración entre los gobiernos de Lesoto y Sudáfrica. El agua es uno de los recursos principales de Lesoto, país no costero, debido a los ríos que nacen en los montes de Drakensberg, situados en la parte oriental de Sudáfrica. De esta cordillera nacen los ríos Orange y Vaal. En 1986, Sudáfrica y Lesoto firmaron un acuerdo que establecía el Lesotho Highland Water Project (LHWP), cuyo objetivo es proporcionar a Lesoto una fuente de ingresos, gracias a la generación de energía hidroeléctrica, a cambio del suministro de agua a la provincia de Gauteng, la más industrializada de Sudáfrica. De esta forma, se trata de transferir agua desde el río Orange, o Senqu como es llamado en Lesoto, el cual fluye hasta el sur, hacia el río Vaal, situado en el norte; todo ello mediante la construcción de cinco presas, 200 km de túneles y dos estaciones de bombeo. El río Orange se une aproximadamente a la mitad de su longitud con el río Vaal y su agua tiene un bajo contenido de sedimentos y es de buena calidad. Así, para el año 2020, se programó que Gauteng recibiera ya 2,5 km³ de agua al año y que se generasen 90 MW de electricidad para Lesoto. El coste del proyecto se estima ocho millones de dólares.



Figura 5. Lesotho Highland Water Project

Es la mayor infraestructura en el sur de África, por ello, se está llevando a cabo en varias fases. La primera de ellas, la Fase 1ª, se completó en 2004, trasvasando 0,5 km³/año. La segunda fase finalizará en 2020.

1.5 Trasvase Tigris-Éufrates: Acueducto Nacional de Israel

Israel es un lugar en el que la escasez de agua ha estado muy presente a lo largo de la Historia. Algunos descubrimientos arqueológicos en Neguev y zonas de alrededor, demuestran que hace miles de años ya los habitantes se preocupaban por conservar el agua. Se han encontrado una gran variedad de sistemas destinados a almacenar el agua de la lluvia o a transportarla de un lugar a otro.

El Acueducto Nacional de Israel es el más grande que se ha llevado a cabo en este país. Se ocupa de trasvasar agua desde el Mar de Galilea o mar de Tiberíades, en la región norte de Israel, hasta el sur y centro del país, zona más árida y también más poblada, en torno al desierto de Neguev. La fuente de agua para el trasvase es principalmente el lago Tiberíades, además de unos pocos ríos pequeños. Los acueductos previamente independientes de han conectado al Acueducto Nacional de Israel formando una red integrada, que abarca desde Metula, en el norte, hasta Eliat, situada en el sur, y desde el río Jordán hasta el mar Mediterráneo. Así, la mayor parte de las fuentes de agua dulce del país se han unido y su eje principal es dicho acueducto. Es considerado como uno de los más desarrollados y versátiles de todo el mundo. El acueducto es capaz de proporcionar en tan solo una hora la misma cantidad de agua que se conseguía distribuir en todo 1937, y en un día la que se distribuía en 1948. Sus tuberías de 6.500 km llegan a todos los rincones del país y cubren todas las necesidades.



Figura 7. Planta desalinizadora de Hadera, en Israel.

En Israel se usan también como recursos hídricos las aguas de manantiales y de acuíferos subterráneos, controlando el aprovechamiento de estas para impedir su agotamiento y aumento de salinidad.

Además, dado que todas las fuentes de agua dulce ya son aprovechadas al máximo, se están desarrollando técnicas para aprovechar recursos hídricos marginales, como la reutilización de aguas residuales o la desalación del agua del mar. Tras muchos años de dependencia única de las precipitaciones, y pese a las recientes sequías acontecidas en el país, Israel se está convirtiendo en un país autosuficiente en agua. La desalinización mencionada antes cubre el 80% del agua de uso doméstico. Existen cuatro plantas desalinizadoras en funcionamiento, construidas en el año 2005, estando una más cerca de ser inaugurada.

La empresa nacional de agua, Mekorot, la cual es la encargada de administrar el Acueducto Nacional de Israel, afirma que se trata de “la columna vertebral que garantiza abastecimiento de agua a todo el país”, ya que se emplea como repartición del agua disponible, equilibrando el nivel de reservas en los lugares donde más escasea en una temporada determinada del año. La obra se compone de un conjunto de tuberías subterráneas, canales abiertos y túneles, que se encargan de transportar un total de 1700 millones de m³ de agua cada año. El 65% de esta cantidad se emplea en riegos de cultivos, mientras la cantidad restante se usa para propósitos urbanos e

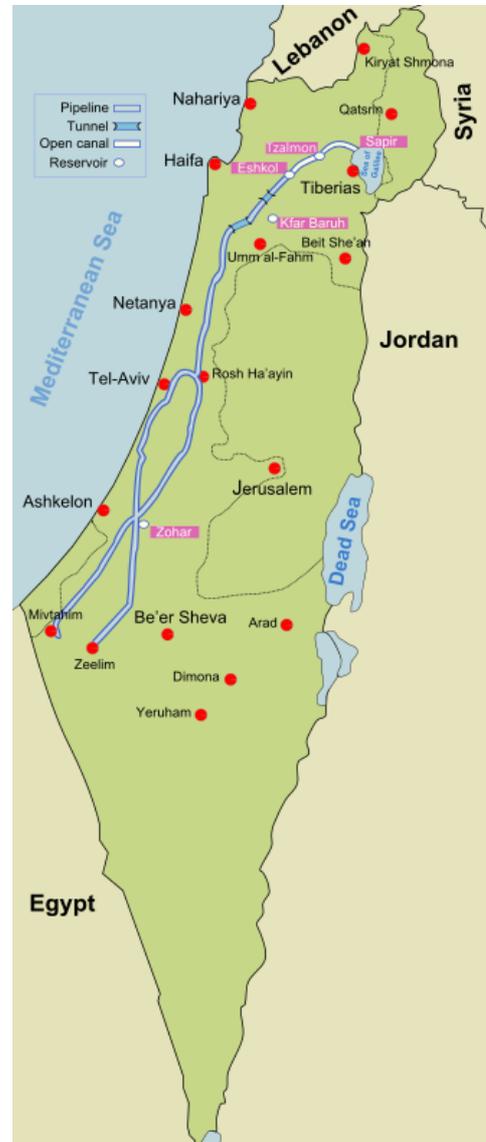


Figura 6. Recorrido del Acueducto Nacional de Israel

industriales.

Durante el mandato del primer ministro David Ben Gurión en 1953, comenzaron los trabajos sobre el terreno, los cuales finalizaron un año después, durante el mandato del primer ministro Levi Eshkol. El desvío de las aguas del río Jordán y del Mar de Galilea hacia el desierto de Neguev, fue visto por los países árabes vecinos como un signo de expansión del estado israelí, y provocó grandes tensiones entre ambos. Durante ese año, hubo conflictos con sus vecinos árabes, que obligaron a suspender en varias ocasiones las obras. En enero del año siguiente, se convoca la cumbre árabe en El Cairo, donde los dirigentes árabes se muestran en contra del desvío de las aguas del Jordán. Más tarde, los estados árabes ampliaron su red hídrica construyendo el Plan Diversión Agua Cabecera, el cual podía bloquear el flujo de agua en el mar de Galilea, desviando las aguas del Baniyas para que no entrasen en Israel, si no que fluyese a un muro de contención en Mukhaiba para Jordania y Siria. Este plan también desviaba el agua del río Hasbani, al río Litano (Líbano). Todo esto redujo en un 35% la capacidad de transporte de agua hacia Israel. A pesar de esto, solo el 36% del flujo total del río se originaba fuera de las fronteras de Jordania. En Israel, la disponibilidad de agua per cápita, es decir, la cantidad de agua disponible por persona al año, en 1990 era de 470 m³, mientras que en Jordania era de 260, un cuarto menos del requisito mínimo de agua para un país industrializado. Los principales ríos jordanos son el río Jordán, el Yarmuk y el Zarqa. Así, mientras la calidad del agua del Yarmuk y del Jordán es aceptable, el río Zarqa está muy contaminado, lo que impide el acceso al consumo de sus aguas. Este problema medioambiental, aumenta el interés de Jordania por el consumo de agua del río Jordán.

Todo esto derivó en un ataque hacia el proyecto en Siria por parte de las Fuerzas de Defensa de Israel, en 1965, el cual culminó en la Guerra de los Seis Días, un conflicto que enfrentó a los israelíes con la República Árabe Unida (denominación de Egipto en aquel momento), Jordania, Irak y Siria. Esto hizo que Israel incrementase el uso del agua del Jordán, ya que capturó los Altos del Golán y el nacimiento del Baniyas, lo que impidió la diversión del río por parte de Siria, consiguió el control de Cisjordania, el río Jordán y la ribera norte del Yarmuk. Por otro lado, Jordania perdió el acceso al agua del Jordán, pues gran parte de las fuentes de agua del río pasaron a manos de Israel, como el Valle del Jordán, que se extiende desde el mar de Galilea hasta el mar Muerto, en la desembocadura de dicho río.



Figura 8. Valle del Jordán.

En el Tratado de Paz entre el Estado de Israel y el Reino Hashemita de Jordania que fue firmado en 1994, Israel acordó proveer a Jordania 50 millones de metros cúbicos de agua cada año, consiguiendo mejorar de esta forma el nivel de vida de sus vecinos árabes. También se acordó la distribución del agua de los ríos Yarmuk y Jordán y de las aguas subterráneas del Valle de Aravá, poniendo fin al conflicto.

1.6 Trasvase Rin-Meno-Danubio (Alemania)

La construcción del canal artificial Rin-Main-Danubio siempre fue un proyecto pendiente para los alemanes, ya que daría continuidad a los grandes ríos que fluyen por su territorio: el Rin y el Danubio. Su construcción se inició en 1922, por la compañía RMD, pero fue abandonado en varias ocasiones. La última de ellas, después de la Segunda Guerra Mundial, pues el país no podía afrontar el enorme coste que suponía la obra: 7800 millones de marcos, un billón de pesetas.

Según cuentan los historiadores, el emperador Carlomagno ya manejaba la idea de conectar el Rin y el Danubio. Mercator relata que, en el 793, en las proximidades de la actual ciudad alemana de Treuchtlingen, se inició la obra, llevaba a cabo por siete mil hombres, que consiguieron avanzar poco más de un kilómetro, pues fueron vencidos por las dificultades que llevaba la obra, fuertes lluvias que conllevaban el hundimiento de las riberas,

el deslizamiento producido por el barro y las inundaciones. Por todo ello, la obra fracasó y fue abandonada. Sin embargo, existen otras fuentes que cuentan que la obra llegó a su fin, y que fue llamada *Fossa Carolina*, pero que abandonada debido al alto coste que suponía mantenerla operativa.



Figura 9. Mapa del canal RMD

Este canal, también llamado canal RMD, es una canal de navegación de 171 km de longitud que conecta el Meno, afluente del Rin, con el río Danubio, uniendo las ciudades alemanas de Bamberg y Kelheim. Por otro lado, el río Main, nace cerca de Bayreuth, al noreste de Baviera, recorriendo hasta 524 km pasando por Würzburg y Francfort hasta, finalmente, desembocar en el Rin. Fue inaugurado en septiembre de 1992, después de más de setenta años dedicados a su construcción.

La construcción propiamente dicha del primer tramo, el cual unía Bamberg, en el Meno, y Nuremberg, comenzó en 1960, entrando en servicio doce años más tarde. Sin embargo, el inicio del segundo tramo, que conecta Nuremberg y Regensburg, en el río Danubio, hizo despertar al movimiento ecologista, que consiguió frenar el proyecto con la recogida de 900000 firmas. Básicamente, las protestas se centraban en el tramo que atraviesa el valle de Altmühl, situado en el parque natural de Alemania pues, además de destrozos en el paisaje, el canal descendería el nivel acuífero, destruyendo zonas húmedas y pantanosas. Además, al poner en contacto dos cuencas que no estaban unidas de forma natural, se podía crear un vector de especies acuáticas invasoras como el mejillón cebrado y algunos invertebrados. A pesar de ello, en 1983, durante el Gobierno de Bonn, se retomó la construcción del proyecto, habiendo conseguido los ecologistas medidas mucho más radicales para la conservación del paisaje, pese no haber conseguido el descenso de las aguas subterráneas.

El canal alcanza hasta una altura de 406 m, en el macizo de Jura Francón, tiene 55 metros de ancho, cuatro de profundidad y cuenta con hasta 16 esclusas con



Figura 10. Canal RMD

alturas de elevación de hasta 25 metros, que facilitan la superación de desniveles. Gracias a ellos, el trasvase favorece el tránsito de grandes barcazas de hasta 350 toneladas. Los buques mercantes de 3300 toneladas llegan cruzar Europa desde el mar del Norte hasta el mar Negro en tan sólo tres semanas debido a la existencia de este canal. De esta manera, sumando las longitudes del Rin, el Danubio y el canal que los une, se obtienen 4.694 km navegables desde el puerto de Rotterdam, en Holanda, el que mayor volumen de tráfico tiene de Europa, hasta el puerto de Sulina, situado en el mar Negro.

Además de ser un éxito para el transporte, también es muy atractivo para el turismo, ya que permite recorrer Europa visitando ciudades como Colonia, Nuremberg, Passau, Viena, Bratislava o Budapest.

1.7 Disputa en el río Kaveri (India)

El río Kaveri, conocido localmente como Cauvery, se encuentra en el sureste de la India, y está considerado como uno de los siete ríos sagrados hindúes. Estos cuentan con lugares que son objeto de peregrinación para esta cultura, para la cual el agua es sagrada, además de ser considerada como un elemento de purificación del espíritu del hombre. Cuenta con una longitud de 800 km y fluye a través de los estados de Karnataka y Tamil Nadu, hasta desembocar en el océano Índico, concretamente en el golfo de Bengala. La agricultura de la región ha sido sostenida gracias a este río, fortaleciéndose así los campos y cultivos. A lo largo de su cauce se encuentran varias islas. En una de ellas, la isla de Sivasamudra, el río forma gradas caídas de agua de hasta 98 metros de altura, como las conocidas Gagan Chukki y Bara Chukki. En el año 1902, se escogió el lugar para construir la primera central hidroeléctrica de la India, la cual se encargó de suministrar energía eléctrica a Bangalore, la primera ciudad asiática que contó con luz eléctrica en sus calles.



Figura 11. Mapa río Kaveri, India.

La forma de distribuir las aguas del río, ha dado lugar a disputas entre los estados de Karnataka y Tamil Nadu desde mediados del siglo XIX, antes de la era británica. Fue ese el momento en el que la presidencia de Chennai, capital de Tamil Nadu, y de Mysore, segunda ciudad más grande de Karnataka, las cuales estaban regidas por el Imperio Británico, se vieron obligadas a realizar una división del río. El conflicto realmente comenzó en el momento en el que los estados comenzaron a construir sus represas, durante el año 1910, cuando los británicos debieron defender las porciones establecidas previamente, además de qué tierras cultivables debían sustentar las aguas. Se acordaron ciertas pautas en el año 1924, que harían posible continuar los próximos 50 años.

En el portal indio *The Wire*, el Girish Nikam defiende el trato injust que Karnataka ha tenido desde el siglo X:

“Ciertamente parece una gran injusticia para Karnataka, sin duda. ¿Cómo ocurrió esto? La repuesta yace en la historia, que ya no podemos reescribir. Ocurrió que gobernantes como los chola, que gobernaron esa parte del país, que ahora es Tamil Nadu y donde fluye el río, tuvieron la previsión de construir reservorios y revisar represas en el siglo X y después, para utilizar el agua para irrigar. Del otro lado, los gobernantes de Mysore construyeron su primer gran reservorio, K.R. Sagar, recién en 1934.

[...] Con la mezcla de ventaja histórica combinada con previsión así como lo que se conoce como el derecho

de prescripción, Tamil Nadu disfruta naturalmente de una porción mayor. Nadie puede sostener que a quienes han estado disfrutando del agua todos estos años se les deba negar ahora. Pero sobre el acuerdo de 1924, la porción de Tamil Nadu, que era más del 80%, ahora se ha reducido al 57% y Karnataka, que estaba usando cerca de 16%, ahora recibe 37%.”

1.8 Canal de Moscú



Figura 12. Ilustración de los dos canales que hacen de Moscú el *Puerto de los cinco mares*

El Canal de Moscú, también conocido como Canal Moscú-Volga, es un canal ruso que fue construido para unir los ríos Volga y Moscova. Cuenta con una longitud de 128 kilómetros y es capaz de proveer a Moscú de 0,9 billones de metros cúbicos cada año. Transcurre por los territorios de óblast de Tver, así como del de Moscú. Por eso, pese a estar ubicada lejos de la costa, la capital del país pasó a llamarse el *Puerto de los Cinco Mares*, ya que gracias a la construcción del canal Moscú y la obra anteriormente desarrollada en el bajo Volga y Don, queda unida con el mar Blanco, el Báltico, el

de Azov, el Caspio y el Negro.

El Canal Moscú-Volga, comienza en el embalse de Ivánkovo, muy próximo a Dubná, a unos 125 km de Moscú,

donde se sitúa la central hidroeléctrica y la esclusa. El Moscova desemboca en el barrio de Túshino, en Moscú. En los primeros setenta kilómetros de canal, atraviesa el norte de la cordillera Klin-Dmítrov, gracias a las esclusas instaladas en el canal que hacen subir el agua hasta 38 metros de altura. Además, atraviesa una serie de numerosos embalses. La parte por la que es posible navegar del canal termina en el puerto del Norte de Moscú. Tras dicho puerto,



Figura 13. Exclusa del Canal de Moscú

el agua discurre por el cauce del Moscova durante 3 km, pasando por un puente sobre la Avenida de Volokolamsk. En total, cuenta con nueve plantas hidroeléctricas once esclusas y diez presas.

Esta obra fue construida en los años treinta del siglo pasado, entre 1932 y 1937. La unión de los ríos Volga y Moscova, ya se planteaba en el siglo XVIII, en tiempos de Pedro I, también conocido como Pedro el Grande, aunque la idea no se concretó hasta 1825. Años más tarde, el 15 de junio de 1931, durante el régimen estalinista, el Comité Central del Partido Comunista, decidió construir un canal para suministrar agua a Moscú, a la vez que canalizaría el Moscova. Para llevar a cabo la construcción de la obra, se estableció el complejo de campos

Dmítlang, con la ciudad de Dmítrov situada en el centro. Este fue el mayor complejo que dirigió GULAG, la rama del KNVD que dirigía el sistema penal de campos de trabajos forzados durante la Unión Soviética. En el momento de más actividad, en Dmítlang había 192.034 prisioneros. Los asentamientos que se encontraban a su paso fueron derribados e inundados, teniendo los habitantes de aquellos lugares que abandonar sus hogares. El 15 de julio de 1937, finalizó el trabajo.

La arquitectura del canal es uno de los prototipos de la época, concretamente el diseño de algunas de las esclusas y del edificio del puerto fluviales del Norte de Moscú.



Figura 14. Puerto fluvial de Moscú.

1.9 Acueducto de Tamagawa, Japón

El acueducto de Tamagawa es un trasvase entre las cuencas de los ríos Tama y Ara, cuya finalidad es el abastecimiento hídrico de Tokio, para usos domésticos y riegos. Tiene una longitud de 43 km y su capacidad de diseño es de 12,5 m³/s, aunque el estiaje del caudal del río son unos 10 m³/s. El canal se extiende desde Hamura, al oeste de Tokio, hasta Yotsuya, un barrio de la capital.



Figura 12. Acueducto de Tamagawa.

La construcción de acueducto comenzó en abril de 1653, y fue llevada a cabo por el shogunato Tokugawa, uno de los clanes más poderosos de Japón, con la finalidad de llevar agua potable y de riego, además de para la extinción de incendios desde el río Tama a Edo. Antes de la construcción de la obra, el agua llegaba a la ciudad de forma insuficiente a través del Acueducto Kanda. Por eso, los habitantes de Kojimachi y Shibaguchi, pidieron permiso para construir este otro canal, para poder también hacer uso de las aguas del río Tama. Fue terminado en tan sólo dieciocho meses, de la mano de los hermanos Seiemon, unos campesinos que fueron recompensados con el apellido Tamagawa y el nombramiento como administradores del acueducto, por la buena ejecución del proyecto.

1.10 Canal de Karakum (Turkmenistán)

Turkmenistán es uno de los países asiáticos más asociados a inmensos y áridos desiertos. Es por eso que cuenta

con el Canal de Karakum, uno de los acueductos de irrigación o riego y suministro de agua más importantes que existen. Se utiliza para llevar grandes volúmenes de agua provenientes del río Amu Daria a unas 850.000 hectáreas en medio del desierto de Karakum. Transporta unos 13 km³ de agua cada año a lo largo de su longitud de 1.375 km. Dicho desierto, que cubre el 80% del territorio del país, es uno de los más secos del mundo. Algunas de sus zonas tienen una precipitación media anual de tan sólo 0,47 pulgadas, siendo la 7,5 de media en todo el país, lo cual es también muy insuficiente. Además, contribuyendo a la aridez nacional, se estima que la escorrentía de los ríos es tan sólo 0,23 millas cúbicos anuales. Los ríos que fluyen por Turkmenistán llegan desde países vecinos; el cauce de agua más destacado es por tanto el Canal de Karakum, que se encarga de transportar agua a Ashgabat, la capital, y a algunos oasis del sur del país.



Figura 13. Canal de Karakum

Fue construido entre los años 1975 y 1988, durante el gobierno soviético. Gracias a esta obra, fue posible el desarrollo de la agricultura en grandes extensiones de tierra, siendo muy destacado el monocultivo del algodón. Pese a su gran magnitud, por deficiencias en el método que fue empleado para su construcción, el canal sufre pérdidas de hasta casi el 50% del agua transportada debido a las fisuras que originan lagos y lagunas lo largo del paso del canal.

Además, esta infiltración de las aguas ha provocado el anegamiento y salinización de la tierra circundante. El canal de Karakum soporta 13.500 millas cuadradas de tierras de pastoreo, así como 3.800 de tierras de cultivo, por lo que este último problema es de gran gravedad.

El canal de Karakum no fue el primer intento de transportar el agua desde Amu Daria al Karakum. A principios de la década de los cincuenta, comenzó la construcción del Canal Principal de Turkmen, que nacería más al norte, cerca de la ciudad de Nukus y que fluiría hacia el suroeste hasta la Krasnovodsk, ciudad y puerto del país. Dicho canal conseguiría transportar hasta un cuarto del agua del río Amu Daria. Sin embargo, tras la muerte de Stalin, se abandonó la obra y se optó por construir el actual canal.

1.11 Canal Irtish-Karagandá (Kazajistán)

El canal Irtish-Karagandá es una de las infraestructuras hídricas desarrolladas durante la Unión Soviética más importantes, junto al canal de Karakum. Lleva agua desde el río Irtish, afluente principal del Obi que fluye por China, Kazajistán y Rusia, hasta la ciudad de Karagandá, en la zona central de Kazajistán.



Figura 14. Canal Irtish-Karagandá

El Irtish es un río en el que se ha desarrollado en varias ocasiones un gran tráfico fluvial, lo que ha supuesto la construcción de numerosas instalaciones hidroeléctricas. El canal de Irtish-Karagandá fue construido entre 1962 y 1964, con el fin de abastecer agua al área industrial y a las granjas de Kazajistán Central, que tenían un déficit hídrico de casi 2.500 millones de m³, así como para facilitar el transporte de los recursos mineros de la región. Estos limitados recursos de frente al poder de desarrollo de la región no eran suficientes para garantizar las necesidades hídricas para industria y la agricultura. La principal dificultad a la hora

de diseñar el canal fue que el agua debía ser trasvasada desde el Irtish hasta la divisora de Shiderty y del río Nura, lo cual podría afectar a numerosas presas, canales o aliviaderos. Tiene una longitud de 458 km, incluidos 272 km dentro de la región Pavlodar, y los 186 restantes que pertenecen a la región de Karaganda. Cuenta con una capacidad de abastecimiento de 76 m³/s, gracias a sus veintidós estaciones de bombeo (con una elevación máxima de agua de hasta veintidós metros) y cuatro estaciones de retorno dentro del canal, junto a catorce pequeños embalses.

El canal puede dividirse en cuatro zonas bien diferenciadas. Los primeros 105 km, el sector Irtish, están contruidos a base de diques y túneles, hechos con materiales tales como arenas, gravas o arcillas. Desde el kilómetro 105 hasta el 175, entre las cuencas de los ríos Irtish y Shiderty, el canal atraviesa una zona de rocas fluviales y de materiales del Paleozóico. Después las aguas pasan a la llanura de Shiderty, hasta el kilómetro 380, se encuentran trazas de pequeños segmentos afloramientos rocosos combinados con segmentos de depósitos aluviales de diferente composición y de arcillas. El último tramo, abarca la cuenca entre los ríos Shiderty, Nura y Koklekty; la ingeniería geológica de esta región es similar a la de la llanura de Shiderty.

En el año 2002, se conectó con el río Ishim y con el sistema de abastecimiento de agua de Astaná, la capital kazaja. Además, se ha sugerido la posibilidad de ampliar la obra con varios proyectos a desarrollar en zonas adyacentes a Kazajistán y a China.

1.12 Canal de Provenza (Francia)

El canal francés de Provenza, suministra agua a una extensa región situada entre el río Verdón, su fuente de agua, Marsella y el golfo de Saint-Tropez. El conjunto de obras hidráulicas que componen el canal lleva agua a la población de más de dos millones de habitantes que vive en los 110 municipios de Bouches-du-Rhône y Var, Aix-en-Provence, Marsella y Toulon. Gracias a él se consigue el riego de 70.000 hectáreas de tierras y alimenta a más de 8.000 industrias de la región. Su capacidad en la cabecera es de 40 m³/s. La *Société du Canal de Provence*, permite derivar 760 hm³ del río Verdón cada año, lo cual supone un 70% de la aportación media total.



Figura 15. Canal de Provenza

El acueducto cuenta con una longitud de 270 km, 140 de los cuales son subterráneos. Para su construcción se usó como base un esquema, poco modificado, que fue diseñado en torno al año 1960. Gracias a él, se consiguieron evitar los efectos que pudo haber causado las sequías en la región, además de contribuir al desarrollo económico.

Ya desde el siglo XVI, el ingeniero renacentista francés Adam Craponne, propuso sin ningún éxito, la creación de un canal que sirviera para llevar agua a Aix y Marsella. Después de otros proyectos que tampoco fueron llevados a cabo, en 1849 se construyó el Canal de Marsella, que se encargaba de llevar agua desde el río Duranza. Además, entre los años 1857 y 1875 se construye el Canal de Verdón, que lleva agua desde el río Verdón hasta Aix. Sin embargo, resultaban insuficientes.

Más tarde, una vez pasada la Segunda Guerra Mundial, bajo el mando del *Ministère de l'Agriculture*

2 TEORÍA DE JUEGOS COOPERATIVOS Y NO COOPERATIVOS

2.1 Introducción

Un juego es una situación con ciertas reglas que envuelve a un grupo de agentes en la cual dichos agentes pueden obtener ciertos beneficios. En un juego cada agente intenta conseguir el mayor resultado posible, teniendo en cuenta que el resultado del juego depende tanto de sus acciones como de las acciones de otros agentes. Es ésta la característica de los juegos: tomar las decisiones que más convienen para ganar, teniendo que cumplir las reglas del juego, y sabiendo que los demás agentes también influyen en los resultados con sus decisiones.

En economía se estudian a menudo situaciones de decisión individual, en las que el agente intenta maximizar su utilidad, sin importar lo que hagan los otros. Por ejemplo:

- Elección de cantidades de cada bien a comprar por parte de un consumidor. Se suponen datos los precios de los bienes, así como la renta del consumidor.
- Elección de cantidades de un bien a producir por parte de una empresa. Se suponen dados los precios del bien y de los factores de producción y conocida la función de producción.
- Elección del precio de un bien por monopolista. Se suponen dados los precios de los factores de producción y la curva de demanda de dicho bien y conocida la función de producción.

Sin embargo, hay muchas otras situaciones en que la utilidad del resultado final no depende solo de la acción del agente, sino también de los otros agentes:

- Elección por la empresa A de la cantidad a producir de un bien o del precio de dicho bien, si también produce la empresa B y ninguna más (duopolio). Los resultados finales para la empresa A dependen de sus propias decisiones y de las de B.
- Elección por una empresa de automóviles de un nivel de gasto en publicidad. Las consecuencias finales de dicho gasto dependen del gasto realizado en publicidad por las empresas competidoras.
- Elección por un coleccionista de su puja (cantidad de dinero que ofrece) en la subasta de un cuadro. Los resultados (consigue o no que se adjudiquen el cuadro subastado) dependen también de la puja de otros participantes.

El planteamiento según el cual no importa lo que hagan otros agentes es más bien una simplificación de la realidad. La teoría de juegos se ocupa, por tanto, del análisis riguroso y sistemático de esas situaciones, donde interfieren las acciones de los agentes. Así pues, la teoría de juegos podría llamarse teoría de la decisión interactiva, que es diferente de la teoría de la decisión individual. Fue introducida por Von Neumann y Morgenstern [10] en 1944 y numerosos premios nobeles de economía han trabajado sobre ello, Aumann, Sentel, Shapley.

Algunos aspectos básicos en un juego son los siguientes. Se denominan jugadores a los agentes del juego que toman las decisiones con el fin de maximizar su utilidad. Son dos o más. Las acciones de cada jugador son las decisiones que puede tomar cada jugador en cada momento que le toque jugar. El conjunto de acciones de un jugador en cada momento del juego puede ser finito o infinito. Una estrategia de un jugador es un plan completo de acciones con las que éste podría proponerse participar en dicho juego. Un perfil de estrategias es un conjunto de estrategias, una por cada jugador. Los jugadores pueden formar grupos que realicen acciones y estrategias conjuntas. A estos grupos se les llama coaliciones. Los resultados del juego son los distintos modos en los que puede concluir un juego. Cada resultado lleva aparejado unas consecuencias para cada agente. Cada jugador recibe un pago al acabar el juego, que depende de cuál haya sido el resultado del juego. El significado de dicho pago es la utilidad que cada jugador atribuye a dicho resultado; es decir, la valoración que para el jugador tienen las consecuencias de alcanzar un determinado resultado en el juego.

Hay dos tipos de juegos básicos o, dicho de otro modo, dos enfoques diferentes en el análisis de un juego: cooperativos y no cooperativos.

En el enfoque cooperativo se analizan las posibilidades de que algunos o todos los jugadores lleguen a un acuerdo sobre qué decisiones tomaría cada jugador en ausencia de acuerdo previo. Dos aspectos son vitales en dicho análisis: qué coaliciones se formarán y cómo se repartirán los beneficios obtenidos.

Entre los juegos no cooperativos caben dos distinciones básicas: los juegos estáticos o dinámicos, y juegos con o sin información completa. En los juegos estáticos los jugadores toman sus decisiones simultáneamente (cada jugador decide sin saber que han decidido los demás), mientras que en los dinámicos puede darse el caso de que un jugador conozca ya las decisiones de otro antes de decidir. En los juegos con información completa, todos los jugadores conocen las consecuencias, para sí mismos y para los demás, del conjunto de decisiones tomadas, mientras que, en los juegos con información incompleta, algún jugador desconoce algunas de las consecuencias.

2.2 Juegos cooperativos

Como se comentó antes existe la posibilidad de que algunos jugadores puedan llegar a acuerdos vinculantes (a los que estarían obligados de manera eludible), que denominamos coaliciones. Si en el juego las únicas acciones posibles de los jugadores son la realización de cooperaciones con otros el juego se reduce a estudiar los resultados que puede obtener cada una de las coaliciones de jugadores que se puedan formar. Se trata de analizar cómo puede actuar un grupo de jugadores, interesándonos en los comportamientos colectivos y sin que haya falta de detenerse en las acciones individuales de cada uno de los miembros de la coalición. Dos preguntas han de responderse ante una situación como ésta: qué coaliciones se formarán y cómo se repartirán los beneficios obtenidos. En esta sección veremos cómo la teoría de juegos cooperativos responde a la segunda pregunta.

Sea $J = \{1, 2, \dots, N\}$ un conjunto finito de jugadores. Sea el conjunto de las partes de J , $P(J)$, que está formado por cada una de las posibles coaliciones que se pueden formar dentro de (incluyendo la coalición sin jugadores que es \emptyset).

Haremos dos suposiciones más con la idea de reducir el problema.

Consideramos que cada coalición puede determinar la mejor consecuencia que sus componentes pueden asegurarse teniendo en cuenta sus acciones y la de los jugadores exteriores. Supongamos además que las utilidades de los jugadores son transferibles, lo cual quiere decir que las ganancias o pérdidas que se obtienen al actuar como coalición pueden repartirse entre los jugadores que la componen; en ocasiones este reparto no es posible por lo que no existe una forma de transferir la unidad, problemas que no serán objeto del estudio. En un juego cooperativo de unidad transferible, se llama función característica a una función que asigna a cada coalición un número real, asignando al conjunto vacío el valor cero, es decir,

$$v: P(J) \rightarrow R, v(\emptyset) = 0.$$

Esta última suposición es una condición técnica.

Para una coalición $S \in P(J)$, al número $v(S)$, se le llama valor de la coalición y se interpreta como el valor mínimo que puede obtener la coalición si todos sus miembros se asocian y juegan en equipo. Se trata por tanto del valor que una coalición toma sus decisiones de forma adecuada. En este caso, utilizaremos la interpretación de $v(S)$ como beneficio, aunque podría interpretarse como costo.

Definición: Un juego cooperativo de unidad transferible consiste, por tanto, en un par $G = (J, v)$, dado por:

- Un conjunto finito de jugadores $J = \{1, 2, \dots, n\}$
- Una función característica, v , que asocia a cada subconjunto de J (o coalición) un número real (valor de la coalición).

Definición: Se dice que un juego es monótono si para todo par de coaliciones $S \subseteq T$ se verifica que: $v(S) \leq v(T)$.

Hablamos de un juego cooperativo monótono cuando al crecer el número de jugadores que forman una coalición el beneficio o pago de esta coalición no disminuye.

Definición: Se dice que un juego es superaditivo si para todo par de coaliciones $S, T \in P(J)$, con $S \cap T = \emptyset$ se verifica que:

$$v(S) + v(T) \leq v(T \cup S)$$

Es decir, si dos coaliciones disjuntas deciden unirse para formar una coalición mayor, el beneficio de la nueva coalición será igual o superior que la suma de los beneficios de las coaliciones originales. Nos interesan, por lo tanto, los juegos superaditivos. Si extendemos la condición de superaditivo a coaliciones no disjuntas obtenemos un tipo de juegos con grandes propiedades.

Uno de los problemas a resolver en este tipo de juegos es qué coaliciones se formarán. Para simplificar el problema consideramos que la coalición que se formará será J . Sin embargo, la monotonía de no garantiza el interés de los jugadores en que se forme J ya que pondrían de mutuo acuerdo grupos más pequeños cuya suma de pagos sea superior.

Definición: Se dice que un juego es convexo si para todo par de coaliciones $S, T \in P(J)$, se verifica que:

$$v(S) + v(T) - v(S \cap T) \leq v(T \cup S)$$

Es decir, si dos coaliciones no disjuntas deciden unirse para formar una coalición mayor, el beneficio de la nueva coalición será igual o superior que la suma de los beneficios de las coaliciones originales menos el valor de intersección entre dichas coaliciones.

Ambos conceptos son aplicables también a juegos de costos sin más que cambiar las desigualdades.

El juego se dice subaditivo si para todo par de coaliciones $S, T \in P(J)$, con $S \cap T = \emptyset$ se verifica que:

$$v(S) + v(T) \geq v(T \cup S)$$

2.2.1 El conjunto de imputaciones

Sea $G = (J, v)$ un juego cooperativo de utilidad transferible superaditivo, en cual J es el conjunto de jugadores y v es la función característica. Si como hemos supuesto en el juego los jugadores deciden trabajar conjuntamente, es decir, cooperar, el único problema que se presenta consiste en cómo repartir el valor $v(J)$ entre los jugadores.

Sea $x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n$ un vector de distribución de pagos, en donde x_i representa el pago que recibe el jugador i . Para cualquier $S \subset J$ se utilizará la siguiente notación:

$$x(S) = \sum_{i \in S} x_i$$

Si deseamos hacer un reparto del valor de entonces debemos exigir el “principio de eficiencia”, esto es que:

$$x(J) = v(J)$$

Por otro lado, ningún jugador admitiría que su situación individual fuese mejor que su pago en la coalición, esto es para todo se verifica el “principio de racionalidad individual.”

$$x_i \geq v(\{i\}).$$

Definición 1.4: El conjunto de imputaciones de un juego cooperativo en su forma coalicional es:

$$I(J, v) = \{ x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n : x(J) = v(J), x_i \geq v(\{i\}) \forall i \in J \}$$

2.2.2 El conjunto de imputaciones

Siguiendo con el principio de racionalidad individual, podemos pensar exigir la “racionalidad condicional”, esto es, para todo $S \subset J$, ocurre que $x(S) \geq v(S)$.

Definición 1.4: El core de un juego cooperativo de beneficio en su forma coalicional es:

$$C(J, v) = \{ x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n : x(J) = v(J), x(S) \geq v(S) \forall S \subset J \}$$

El Core conjunto es cerrado, acotado y convexo. Sin embargo, su principal problema es que puede ser o muy grande o bien incluso vacío. Si el core es vacío tendremos que olvidar la búsqueda de soluciones racionales para todas las coaliciones. Si es grande, la cuestión es cuál de sus vectores de pagos escoger.

Veamos una condición equivalente a que el core sea no vacío. Una familia $\{S_1, \dots, S_p\}$ de subconjuntos de J , disjuntos y no vacíos, es *equilibrada* sobre J si existen números positivos, $\{a_1, \dots, a_p\}$ denominados pesos, tales que para todo $i \in J$

$$\sum_{\{j, i \in S_j\}} a_j = 1$$

Se dice que un juego es equilibrado si para toda familia equilibrada $\{S_1, \dots, S_m\}$ partición de J se tiene que

$$\sum_j a_j v(S_j) \leq v(J)$$

Esto es, ninguna partición ponderada de obtiene mejores beneficios.

Teorema: Un juego es equilibrado si y sólo si el core es no vacío.

2.2.3 El valor de Shapley

Se trata de hacer una distribución de pagos entre los jugadores de manera que se cumplan determinados criterios, llamados axiomas, previamente establecidos.

Sea $G(J, v)$ un juego en forma coalicional, en donde $J = \{1, \dots, n\}$. Se considera la siguiente asignación de pagos para los n jugadores:

$$\phi(J, v) = (\phi_1(J, v), \dots, \phi_n(J, v))$$

La función de asignación de pagos debe cumplir los siguientes axiomas:

1. **Eficiencia.** La función de asignación debe distribuir el pago total del juego. Es decir, debe ser:

$$\sum_i \phi_i(J, v) = v(J).$$

2. **Simetría.** Para cualquier par de jugadores que realicen aportaciones equivalentes para cada coalición, es decir, tales que cumplan que:

$$v(S \cup \{i\}) = v(S \cup \{j\}), \forall S \subset J, \text{ con } i, j \notin S \text{ se tiene que } \phi_i(J, v) = \phi_j(J, v)$$

3. **Tratamiento del jugador pasivo.** Si un jugador no aporta ningún beneficio adicional al resto de los jugadores no debe recibir ningún pago coalicional. Es decir, para cada jugador, para el cual se verifica que:

$$v(S \cup \{i\}) = v(S), \forall S \subset J, \text{ se tiene que } \phi_i(J, v) = v(\{i\})$$

4. **Aditividad.** La función de asignación debe ser invariante a cualquier descomposición arbitraria del juego. Formalmente, dados dos juegos cualesquiera v y w , se tiene que

$$\phi_i(J, v + w) = \phi_i(J, v) + \phi_i(J, w), \forall i \in J$$

Teorema: La única asignación que verifica los 4 axiomas anteriores es el valor de Shapley es cual tiene la

siguiente expresión:

$$\phi_i(J, v) = \sum_{\{S \subset N: i \in S\}} q(s)[v(S) - v(S \setminus i)], \forall i \in J$$

donde $q(s) = \frac{(n-s)!(s-1)!}{n!}$, siendo s el número de jugadores que hay en la coalición S .

El valor de Shapley puede interpretarse como la contribución marginal esperada de cada jugador al entrar en una coalición al azar. En efecto, el valor $v(S) - v(S \setminus i)$ es la contribución marginal efectiva de i al incorporarse a S , mientras que el factor $q(s)$ es la probabilidad de que a i le toque incorporarse precisamente a S .

Teorema: Si es un juego convexo entonces el valor de Shapley pertenece al Core de v .

2.3 Juegos no cooperativos.

Este tipo de juegos resulta de más interesante, por ser más frecuente en la problemática de los fenómenos económicos y sociales.

En este caso, cuando se trata de un juego de suma no constante, puede convenir al jugador informar sus planes en contraste a las ventajas de lo secreto en el caso del juego de suma cero. La revelación puede ser de utilidad como una amenaza o como una forma de transmitir beneficio económico, lo cual permite un grado de solución tácita.

2.3.1 Equilibrio de estrategias de maximin y minimax.

Suponer dos firmas A y B que conocen toda la información contenida en la matriz de pagos que contiene las alternativas estratégicas. Utilizando esa información, cada jugador debe decidir sobre la mejor estrategia sin conocer el movimiento contrario que hará su oponente.

		ESTRATEGIA B			
		1	2	3	4
ESTRATEGIA A	1	50	90	18	25
	2	27	5	9	95
	3	64	30	12	20

El enfoque de este problema es suponer lo peor y actuar de acuerdo. En términos de la matriz, si la firma A emplea la estrategia 1, la gestión debe suponer, con este enfoque, que la firma B empleará la estrategia 3, reduciendo por tanto el pago de A con la estrategia 1 a su mínimo o valor seguro 18, marcado con un asterisco. Similarmente, el punto de vista pesimista de la estrategia 2 de A es que B empleará su estrategia 2 de suerte que A obtenga un pago de 5 del mercado, la cifra más baja de la segunda fila de la matriz.

Finalmente, el correspondiente nivel de pago seguro de la estrategia 3 de A es 12. Con este punto de vista pesimista, A puede lograr lo mejor de la situación buscando el pago más alto entre estos mínimos. Es decir, la gestión escogerá la estrategia con la cifra con asterisco más alta. Buscará el máximo entre estos pagos mínimos, esta decisión se la denomina la estrategia maximin.

La firma B, puede emplear una estrategia similar, sólo que al suponer lo peor, significa que A recibirá grandes pagos de modo que a B le queda residualmente muy poco. Por tanto, si B juega su estrategia 1, el posible nivel de pago más bajo (seguro) es 64 que, se lo denota con una comilla. De igual forma se marcan los peores pagos de las otras estrategias de B.

El mejor de estos pagos (pesimistas) de B es, la cifra más baja entre ellas, el 18 de la columna 3. Por tanto, la mejor de estas alternativas, la cual se llama la estrategia minimax de B es la estrategia 3. En este caso, los pagos de la estrategia maximin son coincidentes con los de la estrategia minimax, generando un punto de equilibrio conocido como punto silla. Cuando esta coincidencia no ocurre, se dice que el juego no tiene un punto de equilibrio.

El mejor de estos pagos (pesimistas) de B es, la cifra más baja entre ellas, el 18 de la columna 3. Por tanto, la mejor de estas alternativas, la cual se llama la estrategia minimax de B es la estrategia 3. En este caso, los pagos de la estrategia maximin son coincidentes con los de la estrategia minimax, generando un punto de equilibrio conocido como punto silla. Cuando esta coincidencia no ocurre, se dice que el juego no tiene un punto de equilibrio.

2.3.2 Equilibrio de estrategias dominantes.

Una estrategia es dominante si con esa estrategia el jugador está estrictamente mejor que con cualquier otra estrategia, sin importar lo que los otros jugadores hagan. Por eliminación sucesiva de estrategias dominadas se llega al equilibrio del juego.

Notación: Sea el conjunto de jugadores $i = 1, 2, \dots, I$, y $S = S_1, \dots, S_I$ el espacio de estrategias, donde el perfil de estrategias será: $s = \{s_1, s_2, \dots, s_I\}$, además, $S_i =$ al conjunto de estrategias disponibles para el jugador i , teniendo en cuenta que $s_i \in S_i$, siendo esta la estrategia para el jugador i .

- i) Una estrategia $\bar{s}_i \in S_i$ domina débilmente a una estrategia $\hat{s}_i \in S_i$ cualquiera para el jugador i , si las utilidades del agente i presentan la siguiente relación:

$$U_i(\bar{s}_i, s_{-i}) \geq U_i(\hat{s}_i, s_{-i}) \text{ para todo } s_{-i} \in S_{-i}$$

- ii) La estrategia $\bar{s}_i \in S_i$ domina a la estrategia $\hat{s}_i \in S_i$ para el jugador i , si:

$$U_i(\bar{s}_i, s_{-i}) \geq U_i(\hat{s}_i, s_{-i}) \text{ para todo } s_{-i} \in S_{-i}$$

y

$$U_i(\bar{s}_i, \tilde{s}_{-i}) > U_i(\hat{s}_i, \tilde{s}_{-i}) \text{ para todo } \tilde{s}_{-i} \in S_{-i}$$

- iii) La estrategia $\bar{s}_i \in S_i$ domina estrictamente a la estrategia $\hat{s}_i \in S_i$ para el jugador i , si

$$U_i(\bar{s}_i, s_{-i}) > U_i(\hat{s}_i, s_{-i}) \text{ para algún } s_{-i} \in S_{-i}$$

Definición: Una estrategia s_i^* es una estrategia dominante para el jugador i , s_i para cualquier $s_i \in S_i$, s_i^* domina débilmente a la estrategia s_i .

Definición: Un perfil de estrategias $s^* = (s_1^*, \dots, s_I^*)$ es un equilibrio de estrategias dominantes para un juego cualquiera G en forma estratégica, si y solo si s_i^* es una estrategia dominante para i , $i \in I$. El conjunto de equilibrios de estrategias dominantes se denota $DE(G)$.

3 LA SITUACIÓN EN CHINA. ANÁLISIS DEL PAÍS

Antes de llevar a cabo la resolución del problema de teoría de juegos, se expondrá el problema real a resolver, comenzando, en este capítulo, por la descripción del país en el que se centrará. Se desarrollarán diferentes aspectos que describan la situación en la República Popular China.

3.1 Aspectos geográficos

3.1.1 Geografía

La República Popular China se sitúa en sureste del continente euroasiática. Fronteriza con Mongolia y Rusia por el norte, con la República Democrática Popular de Corea y con el océano Pacífico por el este, con Vietnam, la República Popular Democrática de Lao, Myanmar, Bután y la India por el sur, y Pakistán, Afganistán, Tayikistán, Kirguistán y Kazajistán por el oeste. La altitud media en el país va desde de más de 4.000 metros en el oeste a menos de 100 en el este. El área total del territorio del país son unos 9.6 millones de km², siendo el 33% montañas, 26% mesetas, 19% valles, 12% llanuras y el 10% colinas. China está dividida en 23 provincias, 3 municipios y 5 regiones autónomas, además de las regiones administrativas especiales de Hong Kong y Macao.



Figura 16. Mapa político de la República Popular de China

En el año 2009, la tierra cultivable se estimaba unos 110 millones de ha, además de 14,3 millones que ya contaban con cultivos, lo que resulta un área de 124,3 millones de ha. El 86% de estas cosechas es comida. De ese porcentaje, el 78% son cereales, arroz, maíz, trigo cebada y sorgo, el 10% legumbres, el 8% patatas y el resto otro tipo de bienes cultivables.

3.1.2 Clima

Grandes áreas del este de China tienen el clima monzónico del Este de Asia. Las montañas y mesetas protegen de este clima a la parte noroeste del continente, lo que conlleva pocas precipitaciones en la zona. Durante el invierno, la gran parte del país se cubre con un clima frío, procedente de Siberia.

La media de precipitaciones anuales es de 645 mm. En algunas regiones del suroeste y de las zonas costeras del sureste las precipitaciones alcanzan una media de más de 2.000 mm. Además, se superan los 1.000 mm en las zonas del sur, en el curso medio y bajo del río Yangtsé, que fluye hacia el mar por el norte de Shangai. En la cuenca del río Huai se estiman entre los 400 y 900 mm de agua, en las llanuras del norte y en el centro de China. Sin embargo, menos de 400 mm en muchas partes del noreste del país, y menos de 25 mm en la cuenca del río Taim y en la del río Qaidam, un tercio de la cual es desierto. Las precipitaciones son mayores en los meses de verano.

China está convencionalmente dividida en cuatro zonas caracterizadas por sus climas:

- **Zona árida:** localizada mayoritariamente en el oeste y noroeste. Es una zona adecuada para algodón, granos, verduras y frutas. La ganadería es la actividad que predomina en estas zonas.
- **Zona semiárida:** localizada en gran parte de la cuenca superior del río Huang (río Amarillo), uno de los más importantes del país. Generalmente se cultivan en esta zona trigo, maíz y algodón.
- **Zona semihúmeda:** se trata de una zona sujeta a inundaciones y sequías. En la zona del noreste, la subzona Noreste (NE), del país, se encuentra la cuenca del río Songhua-Liao. Es una zona potencialmente fértil, sin embargo, la temporada de crecimiento de los cultivos es corta. Las llanuras de la zona oeste de esta subzona sufren anegamientos y suelos alcalinos. Los principales cultivos son tríos, maíz, soja y arroz, que es cultivado en condiciones de riego.



Figura 17. Cultivos de arroz, China.

- **Zona húmeda:** se encuentra en el sur y el suroeste. El arroz es lo que más se cultiva en esta zona. Las temporadas de inundaciones duran desde Julio hasta Septiembre, pero las sequías, tempranas o tardías pueden limitar la temporada de cultivos. La zona medio-baja de la cuenca del río Yangtsé tiene un clima subtropical que permite que se cosechen el doble de alimentos. Además, la zona de Zhu-Min, que comprende toda la cuenca del río Zhu, consta también de un clima tropical que permite cosechas durante

todo el año.

3.1.3 Población

Es bien sabido que China es uno de los países más poblados del planeta. Consta de 1.396 millones de habitantes con un porcentaje muy bajo de inmigración. Se estiman 146 habitantes por cada kilómetro cuadrado. El 54% de las personas vive en zonas rurales. Durante el período desde 1989 hasta 1999, la tasa de crecimiento demográfico se estimó en 1,1%, mientras que, diez años después disminuyó al 0,6%.

En 2008, el 89% de la población tenía acceso a fuentes de agua potable, mientras que el 58% y el 52% de las poblaciones urbanas y rurales respectivamente, tenían acceso a la sanidad.

3.2 Aspectos económicos, agrícolas y alimentarios

El producto interior bruto (PIB) del que consta China actualmente es de 12,24 millones de dólares estadounidenses. En el año 2009, el PIB del país eran 44.985.461 millones, de los cuales un 10% representaba la agricultura. Este porcentaje ha ido disminuyendo hasta nuestros días, como muestra la *Figura 18*, siendo el

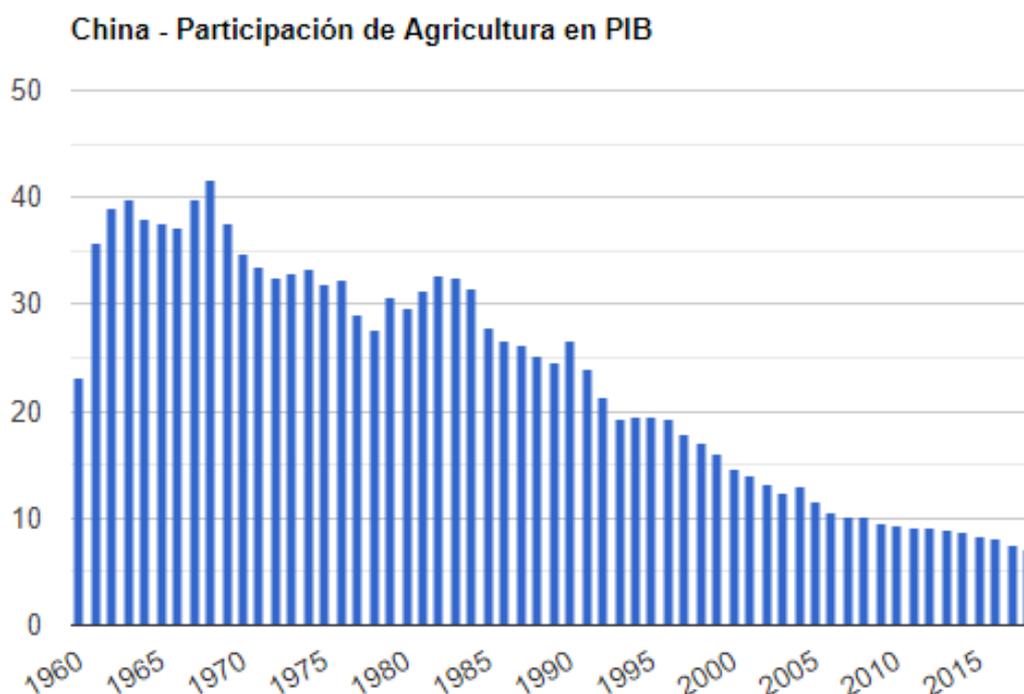


Figura 18. Participación de la agricultura China en el PIB

dato más bajo el del último año registrado en la gráfica, 7,19% del total. La población económicamente activa es de 818 millones de personas, según datos registrados en el año 2009, de los cuales el 54% eran varones y el 46% mujeres. El sector agrícola en ese año contaba con el 61% de la población económicamente activa, es decir, 530 millones de habitantes se dedicaban a este sector, cifra que va en descenso pues, años atrás, en 1988, tal porcentaje se situaba en el 72%.

China cuenta con alrededor del 21% de la población mundial, así como el 9% de las tierras cultivables y el 6% del agua dulce disponible. En 2009, la disponibilidad de agua dulce per cápita fue de 2079 m³, siendo el promedio mundial de 6225 m³. De esta forma, para alimentar el aumento de la población china, el país debería aumentar en casi un 30% la producción de productos agrícolas para el año 2030. Para ello debe considerarse la importancia del agua disponible para el riego de las cosechas, que contribuye a la seguridad alimentaria de China, ya que produce el 75% de los cereales y más del 90% del algodón, frutas y otros productos agrícolas tan sólo en la mitad de las tierras cultivables de China. Gracias al desarrollo del riego, la producción de bienes alimentarios ha

conseguido seguir el crecimiento de la población en los últimos años, debiendo ser así para que no decaiga la economía del país.

El norte de China, aun teniendo solamente el 20% de los recursos hídricos del país, goza el 65% de la tierra cultivada, produciendo casi todo el trigo y maíz y hasta la mitad del grano de todo el país. Esta región representa casi el 50% del PIB nacional. Sin embargo, la sequía es uno de los problemas que más dañan la agricultura china, ya que afecta a 15,3 millones de hectáreas de tierras de cultivo cada año, un 13% del total.

3.3 Aspectos hídricos

La escorrentía anualmente generada en China es de unos casi 2.812,40 km³, de los cuales el 98% proviene de precipitaciones y el 2% restante de la fusión de glaciares.

3.3.1 Recursos de agua superficiales. Ríos

China puede ser dividida según las cuencas de los nueve ríos más destacados del país que, a su vez, se dividen según su posición geográfica: norte y sur. El promedio anual total de aguas superficiales en los ríos del norte, como el río Amarillo, es de unos 535,5 km³, casi el 20% del total nacional. Sin embargo, los ríos del sur, entre los que se encuentran el Yangtsé o el Zhu, cuentan con una cantidad anual de 2176,2 km³, más del 80% del total, siendo muy superior a la cantidad con la que cuentan las regiones del norte del país.

River basins in China (Compiled from: FAO, 1999, and World Bank, 2006)

Major river basin	Internal renewable surface water resources (km ³ /year)	As % of total	Percentage of national		Surface water resources (m ³ /year)	
			Population	Arable land	per capita (2006)	per hectare arable land
North						
Song-Liao ^a	192.2	7.1	9.6	20.2	1 510	8 600
Huai	96.1	3.5	16.2	15.2	450	5 700
Huang (Yellow)	74.4	2.7	8.5	12.9	660	5 200
Hai-Luan	42.2	1.6	10.0	11.3	320	3 400
Interior basins ^b	130.4	4.8	2.1	5.7	4 670	20 800
Sub-total North	535.3	19.7	46.4	65.3	870	7 400
South						
Chang (Yangtze) ^c	999.9	36.9	34.3	23.7	2 190	38 300
Zhu (Pearl)	333.8	12.3	12.1	6.7	2 080	45 300
Southwest ^d	583.3	21.5	1.6	1.8	27 440	294 600
Southeast ^e	259.2	9.6	5.6	2.5	3 480	94 200
Sub-total South	2176.2	80.3	53.6	34.7	3 060	57 000
Total China	2711.5	100.0	100.0	100.0	2 040	24 600

Notes (figures between brackets are surface water resources expressed in km³/year):

a Includes Heilong (Amur), Songhua, and Liao, Wusuli, Suifen, Tumen, Yalu (draining into the Yellow Sea)

b Includes Erxix (10.0), Aksu, Emin, Ili

c Includes Min (58.6)

d Includes Yarlung Zangbo (165.4)

e Includes Nu (68.7), Lancang (73.6), Yuan (44.1)

Figura 19. Capacidad de las cuencas fluviales de China.

China cuenta con más de 50.000 ríos con un área de superficie superior a 100 km², 1.500 de ellos superan los 1.000 km². Además, los ríos chinos se pueden clasificar en interiores, si desembocan en el interior del territorio, o en exteriores, aquellos que desembocan en el mar, los cuales ocupan el 65% de las cuencas fluviales. La mayoría de estos ríos desembocan en el Océano Pacífico y en algunas zonas del Índico y del Ártico. El 35% restante corresponde al territorio ocupado por los ríos del interior.

El volumen de agua que fluye desde China a otros países vecinos, Bután India, Kazajstán, Kirguistán, la República Democrática Popular de Lao, Mongolia, Nepal, Pakistán y Vietnam, se estima unos 719 km³/año. Por

otro lado, cabe a destacar doce ríos que fluyen desde otros países a China, los cuales aportan 17.169 km³ de agua cada año.

Rivers entering China from neighbouring countries

Region	River	Coming from	Average runoff flowing out of the country (km ³ /year)
Heilong	Herlen	Mongolia	0.578
	Wursun	Mongolia	0.145
Sub-total			0.723
Southeast (Pearl)	Upper reaches of the Zhu (Pearl)	Viet Nam	7.250
		Sub-total	
Southwest	Ruxu Zangbo	India	0.117
		Sub-total	
Inland rivers	Kara Ertix	Mongolia	0.450
	Haba	Kazakhstan	1.370
	Bulgan	Mongolia	0.228
	Tekes	Kazakhstan	0.957
	Kunmalike	Kyrgyzstan	3.580
	Guokeshar	Kyrgyzstan	1.220
	Kizi	Kyrgyzstan	0.556
	Keleqing	Pakistan	0.718
Sub-total			9.079
Total			17.169

Figura 20. Ríos que fluyen desde otros países hasta China.

Por último, cabe a destacar también algunos ríos fronterizos entre otros países y China, como los ríos Heilong o Songhua, que fluyen a lo largo de la frontera entre China y la Federación Rusa.

3.3.2 Glaciares

Las provincias del noroeste y suroeste de China, Gansu, Qingha, Xinjiang, Tíbet, Sichuan y Yunnan, poseen hasta 58.651 km² de territorio cubierto de glaciares, los cuales poseen un volumen de agua total almacenado de 5.100 km³, de los cuales se derriten 56 km³ de media anualmente.

3.3.3 Aguas subterráneas

El total de aguas subterráneas en China es de unos 828,8 km³ en todo el país, contando el sur con el 70% de esta cantidad. En esta zona, donde existen numerosas aldeas en las zonas montañosas, es común aprovechar los recursos de agua subterráneas, lo cual no es fácil en el norte debido a la escasez de estas, especialmente en las zonas costeras y cerca de la cuenca del río Hai.

3.3.4 Lagos y presas

En China hay 2.300 lagos naturales (sin contar los temporales), que almacenan un total de 108,8 km³ de agua, siendo el 31,9% agua dulce. Al final del año 2005, país contaba con un total de 85.108 embalses con una capacidad total de 562 km³.

El país cuenta con el mayor proyecto hidrológico del mundo, la Presa de las Tres Gargantas, situada en el río Yangtsé, en el municipio de Sandouping, cerca de la ciudad de Yichang, en la provincia de Hubei. Además de la generación de energía eléctrica, el objetivo principal de la presa es el control de las inundaciones y la mejora de la navegación a lo largo del río. Cuenta con hasta 200 metros de altura. Consigue mantener el nivel de agua en los meses secos de inviernos a 175 m por encima del nivel del mar, y por debajo de los 145 durante el verano, temporada de inundaciones. Cuenta con aproximadamente 600 metros de longitud y con una capacidad de

almacenamiento de 39,3 km³.



Figura 21. Presa de las Tres Gargantas, China.

Sin embargo, hasta que se puso en marcha el proyecto de las Tres Gargantas, el proyecto hidroeléctrico más ambicioso era la presa de Gezhouba, ya que fue el primero capaz de bloquear el flujo de río Yangtsé. Se encuentra a casi 40 kilómetros aguas debajo de las Tres Gargantas, a las afueras de Yichang. La presa, construida en 1988, tiene 54 metros de altura y una capacidad de almacenamiento de 1,58 km³ de agua en total.

La presa de Geheyan, obra completada en el año 1994, la primera presa de del río Qing, afluente del Yangtsé, también en Hubei. Al comienzo de su uso, hubo numerosos problemas con la elevación de embarcaciones y, recientemente, ha tenido varias disputas por permisos.

Otra presa de gran importancia es la presa de Liujiaxia, la presa con mayor capacidad de agua en Gansu, unos 5,7 km³ de agua. Está situada en la zona superior del cauce del río Amarillo, en la ciudad de Liujiaxia, en la provincia de Gansu. El objetivo principal de la presa es generar energía eléctrica, el control de inundaciones y prevención de acumulaciones de hielo que puedan reducir significativamente el flujo del río. En 1974 comenzó a funcionar y, hasta el final de 1980, fue la presa más potente del país.

Por último, cabe a destacar presas importantes como son la presa de Ertan (5,8 km³ de capacidad) en el río Yalong, la presa Shuibuya (4,6 km³) en el río Qing, la presa Longtan (27,3 km³) en el río Hongshui, la presa de Longyangxia (24,7 km³) en el río Amarillo, el Laxiwa presa (1,08 km³) en el río Amarillo y la presa Xiaolangdi (12,8 km³) también en el río Amarillo.

En el año 2006, se registró una capacidad instalada de energía hidroeléctrica en el país de 52,93 GW, siendo la generación de energía anual unos 163,6 billones de kW cada hora.

3.3.5 Fuentes de agua no convencionales

En el año 2006, el total de aguas residuales era 53,7 km³. Poco más de la mitad de esta cantidad era tratada para su reutilización. Esta tasa refleja la capacidad instalada de tratamiento de aguas residuales más que el tratamiento efectivo en sí, por lo que es probable que las cifras reales sean menores, debido a la falta de redes de alcantarillado y fondos para su funcionamiento y mantenimiento en muchas ciudades chinas.

Desde 1958, China ha estado desarrollando la ingeniería de desalinización de agua de mar con el fin de tener otra fuente más de agua potable. Desde entonces, se han realizado más de veinte proyectos destinados a este fin, entre los que se pueden destacar las plantas de Shandong Huangdao o Hebei Huanghua. En 2008, la capacidad acumulada de todos los proyectos de este tipo se estimaba alrededor de los 30.000 m³/día.

3.3.6 Escasez de agua

Después de Brasil, Rusia, Canadá e Indonesia, China es el país que cuenta con la mayor cantidad de recursos hídricos del mundo. A pesar de esto, el país se enfrenta a crisis por escasez de agua en ciertas regiones. Mientras que el promedio mundial de recursos de agua per cápita se sitúa en los 6.225 m³/año, en el año 2009, China registró tan sólo 2.079 m³ cada año, dato muy lejano al estándar.

Además de esto, hay mucha variación dentro del país, desde menos de 500 m³ anuales en Huai y en las cuencas de los ríos Hai-Luan, en el norte, hasta más de 25.000 m³/año por habitantes en cuencas fluviales situadas al suroeste del país. La distribución de las precipitaciones intensifica aún más la desigualdad en este aspecto. El clima monzónico que posee el país conlleva precipitaciones muy variables que ocasionan con frecuencia sequías e inundaciones.

La escasez de agua se concentra fundamentalmente en el norte, región más seca, que cuenta tan sólo con la quinta parte de los recursos de agua de China, y con dos tercios de las tierras de cultivo, lo que crea unas altas demandas de riego. También el desarrollo económico y la urbanización fomentan el consumo adicional de agua, pero la gestión de esta es realmente ineficiente debido a su escasez. Por otro lado, el sur goza de grandes cantidades hídricas, unas cuatro veces más que el norte, por lo que está bien abastecido. Sin embargo, esto acarrea otros problemas, como las devastadoras inundaciones en el río Chang (Yangtsé) que se producen en los meses de verano. Mientras que el sur se enfrenta cada año a estos desastres, el norte, donde existen la mayoría de las actividades agrícolas y donde se concentra más la población, se enfrenta a graves faltas de agua. Casi la mitad de las ciudades chinas se enfrentan a escasez de agua, muchas de ellas de manera grave y alarmante.



Figura 22. Inundaciones del río Yangtsé.

Existen varios ejemplos que reflejan el gran estrés hídrico al que se enfrentan algunas zonas cuando la demanda de agua es más alta que la cantidad de la que se dispone de esta. Ya en 1972, por ejemplo, el río Huang (Amarillo), por primera vez en la historia de China, se secó antes de que sus aguas llegasen al mar. Desde 1975, el río se ha secado en alguno de sus tramos todos los años. Durante 1997, no llegó agua al mar durante 228 días, lo que causó la reducción de la mitad de agua disponible para riego de la última provincia antes de llegar a la costa, Shandong, la cual produce un quinto del maíz chino y una séptima parte del trigo. Desde el año 2000, después de redirigir la cuenca del río, el Huang no se ha vuelto a secar.

3.3.7 Proyectos de transferencia de agua

La distribución desigual del agua en China que conlleva la escasez de esta en el norte y la abundancia en el sur, obligó al Gobierno chino a buscar soluciones al problema, para garantizar así la disponibilidad suficiente de agua para las personas que viven en el norte del país. Una de estas medidas, es el gran proyecto del Trasvase Sur-Norte que, cuando finalice en 2050, conseguirá canalizar 44,8 km³ de agua desde el río Yangtsé a la ciudad de Pekín, abasteciendo a muchas otras ciudades a lo largo de su curso. El proyecto se puso en marcha en el año 2000, y las primeras ciudades que se beneficiaron de él fueron Shandong y Pekín, en los años 2007 y 2010 respectivamente. Se estimó que el proyecto costaría unos 60.000 millones de dólares estadounidenses, gastos que, sin embargo, han ido en aumento.

El proyecto se enfrenta a una serie de desafíos logísticos que complican su construcción, como es la necesidad de limpiar el agua en las intersecciones a través de las cuales pasarán otros canales. Así, por ejemplo, la ruta oriental del proyecto, que cuenta con una longitud de 154 km, sigue en gran medida la ruta del Gran Canal, desde el río Yangtsé a través de Jiangsu y Shandong, donde se desvían 14,8 km³ cada año, y debe cruzar 53 secciones de otros ríos en la zona más contaminada de China. Las operaciones de limpieza, por tanto, representarán un porcentaje elevado de la inversión total, en concreto un 37%. Si se consigue terminar, será una de las operaciones integrales de limpieza más completas y destacadas del planeta. La implementación efectiva de las plantas de tratamiento de aguas residuales deberá estar en equilibrio entre provincias y el acuerdo inicial sobre los componentes del proyecto.

El gran coste que conlleva este trasvase, podrá reflejarse en la subida del precio del agua, lo que puede ser un problema para muchas personas, pudiendo llegar a ser entre 3,2 y 4,8 yuanes/m³ en muchas ciudades, y hasta 7 yuanes en Pekín. La ruta central, que desviará 13 km³ cada año, sumergirá 370 km² de tierra, lo cual requerirá la reubicación de 330.000 personas en las provincias de Henan y Hubei. Por otro lado, la ruta occidental desviará 17 km³/año desde el tramo superior del río Yangtsé hasta el río Amarillo

El proyecto de desviación del río Amarillo Wanjiashai Shanxi es otros de los proyectos destinados a aliviar la escasez de agua, concretamente en las áreas industriales de China: Taiyuan, Pingsuo y Datong. El proyecto comenzó en 1997 y fue inaugurado en noviembre de 2001. Su coste fue de 1.500 millones de dólares estadounidenses.

Por último, cabe destacar mayor proyecto de conservación y suministro de agua de la ciudad de Qingdao desde la fundación de la República Popular China, que lleva agua desde el río Amarillo hasta dicha ciudad, situada en la provincia de Shandong. Comenzó en 1989, y consiguió garantizar el suministro de agua a la ciudad de Qingdao, que sufre la escasez de agua más grave del norte de China. Ha recibido 1,1 km³ de agua, sin embargo, debido al aumento tanto de la economía como de la población, las carencias han aumentado. Una segunda parte de proyecto promete aumentar el volumen de agua desviada a 250 millones de m³ cada año a la ciudad, fase que aún no tiene fecha prevista.

3.3.8 Uso del agua

En 2005 el total de agua extraída fueron 554,1 km³, siendo destinado el 65% de esa cantidad a riego, el 12% a

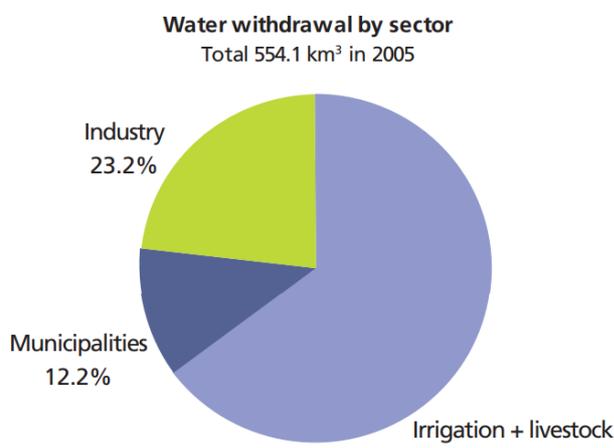


Figura 23. Agua extraída por sector, año 2005.

usos municipales y el 23% restante a la industria. La agricultura es el sector que más agua precisa, aunque sólo el 45% de la que se consume se usa realmente, debido a la baja eficiencia de los sistemas de riego. Sin embargo, esta cifra es alta contrastándola con la estructura de cultivo. La relativa productividad baja del agua, 3,6 dólares estadounidenses por cada metro cúbico, es menor que la media en países de ingresos medios y mucho más baja que los 35,8 dólares por metro cúbico en países de ingresos altos. Según predicen las Naciones Unidas China aumentará su población a 1.500 millones de personas antes del año 2030, por lo que se espera que la población se urbanice para poder hacer frente a esa nueva demanda de agua. También el sector industrial es codicioso con el agua,

puesto que la tasa de reciclaje de esta es solamente del 40%, porcentaje muy bajo comparándolo con el 75-85% en países desarrollados.

En el año 2005, la extracción primaria de agua superficial representó el 80% de la extracción total. En 1995, el volumen de aguas residuales tratadas reutilizadas fue de 13,4 km³. En 2008 el agua desalinizada representó un total de 10,95 millones de m³. Además de la extracción de agua por los principales sectores (agricultura, municipios, industria), China reservó 9,28 km³ de agua superficial en 2005 para ecosistemas. La principal fuente de agua en el sur de China es el agua superficial, que representa más del 90% de la extracción de agua. Por otro lado, el norte de China es la región que usa el agua subterránea como fuente de agua primaria, ya que en las cinco provincias del norte, Pekín, Tianjin, Hebei y Mongolia Interior, el 65% del agua usa procede de aguas subterráneas, según se registró en el año 2005. Este uso constante de los recursos de agua subterráneo causó una disminución de las capas freáticas y, por consiguiente, el rápido agotamiento de los depósitos hídricos que encuentran bajo el terreno.

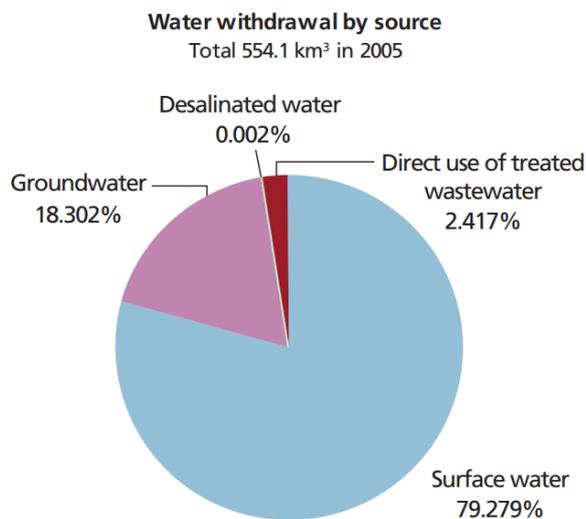


Figura 24. Agua extraída por fuente, año 2005.

3.4 Riego y desarrollo del drenaje

3.4.1 Evolución y distribución de las zonas de riego

China es un país con una larga historia en el desarrollo de riegos y drenajes. Los primeros canales usados para desviar agua y los primeros pozos para almacenarla fueron construidos hace ya 4.000 años. Sin embargo, desde la fundación de la República Popular China en 1949, el riego ha experimentado una fase de gran desarrollo. Desde 1958 a 1985, se gastaron alrededor de 64.368 millones de yuanes en proyectos destinados al riego y al drenaje. Gracias a ello, el área reservada para el riego aumentó desde los 16 millones de hectáreas registradas en 1949 a casi 63 millones en 2006.

Pasado 1949, el riego con aguas subterráneas se desarrolló de forma muy rápida para promover la producción de la agricultura. En el norte de China, los recursos hídricos superficiales han sido insuficientes desde 1950, año desde el cual el Gobierno ha precisado la dependencia de aguas subterráneas para el desarrollo de proyectos de riego. En 1985 un área de 11,1 millones de hectáreas fue irrigada usando pozos entubados, dato que ha ido en aumento, significando alrededor de 4,8 millones de pozos entubados que se encargaban del abastecimiento de 19 millones de hectáreas, más del 30% del total de hectáreas destinadas al riego, según se registró en 2006. El 57% restante, unos 36 millones de hectáreas, utilizan riego eléctrico, usando agua superficial.

China puede ser dividida en tres zonas de riego:

- **Zona de riego perenne:** en esta zona la precipitación anual es menor a 400 mm por lo que el riego es imprescindible para la agricultura. Cubre principalmente las regiones del noroeste y parte del curso medio del río Amarillo.
- **Zona de precipitación desigual:** es la región en la que las precipitaciones anuales varían entre 400 y 1.000 mm, muy influenciadas por las estaciones y los cambios en el clima que producen el viento monzón, que sopla unos meses en una dirección y otros en la opuesta, lo que conlleva una distribución poco estable de las precipitaciones. Es por tanto muy necesario el riego para poder asegurar la producción. En esta zona se incluyen la llanura Hangh Huai Hai y el noreste del país.
- **Zona de riego suplementario:** esta zona, que cubre los tramos medio e inferior de los ríos Yangtsé, Zhu y Min, además de la parte suroeste de China, cuenta con precipitaciones anuales superiores a los 1.000 mm. A pesar de ello, es riego sigue siendo fundamental para la mejora de la intensidad del cultivo de arroz, así como para el riego suplementario de cultivos en zonas más altas.

Actualmente, el potencial de riego es aproximadamente 70 millones de hectáreas, de los cuales 63 se destinan a cultivos alimenticios.

3.4.2 Papel del riego en la producción agrícola, la economía y la sociedad

China distingue entre las áreas regadas destinadas a cultivos alimenticios y los destinados a otro tipo de cultivos, entre los que están los bosques de regadío, los huertos y los pasos. En 2006, el 91,2% del área equipada para el riego estaba cubierto por cultivos alimenticios.

En 2006, el área total de cosechas cultivadas de regadío eran 93,4 millones de hectáreas. La cosecha más importante de este carácter para el país es el arroz, seguido del trigo y el maíz. Además, está aumentando la demandada de riego en muchas verduras. En 2005, casi tres cuartos de la producción de cereales provenían de una producción de riego. Según una encuesta realizada a nivel nacional a principios de la década de los años ochenta del siglo pasado, el rendimiento medio del arroz con cáscara en tierras de cultivos fue 7,3 toneladas/ha, mientras que el arroz con cáscara en cultivos no regada fue sólo de 2,1 toneladas/ha. En el año 1995, la *Comisión Internacional de Arroz Paddy* (arroz con cáscara) estableció como valor medio de este rendimiento 6 toneladas/ha para el arroz con cáscara, por lo que actualmente la producción del país se encuentra superior a la media. Otros cultivos que precisan regado a destacar son la caña de azúcar, verduras, batata, trigo, maíz, sorgo, tabaco, colza, melones, cítricos, plátanos, piña, cacahuets o té.

3.5 Gestión de agua, políticas y legislación relacionadas con el uso del agua en la agricultura

3.6 Medio ambiente y salud

China es un país en el que la contaminación del agua es un problema grave, y que todos los sistemas fluviales están contaminados y ningún río está limpio. También sufren este problema los recursos de agua subterráneas, más de la mitad de ellos han sido severamente contaminados. Según la FAO, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, el 80% de los 50.000 km que recorren los ríos más importantes de China están tan degradados que ya no pueden habitar peces en sus aguas. Prácticamente todos los ríos que fluyen a través de zonas urbanas o por sus alrededores están gravemente contaminados, especialmente en el norte, donde se concentra la industria más pesada. Algunos de los ríos más pesados son los ríos Hai, Huang y Huai.



Figura 25. Río Amarillo (Huang) teñido de rojo debido a la contaminación por vertidos de una planta de calefacción.

En 2004, el 28% de las secciones de ríos analizadas no eran seguras para ningún tipo de uso, y sólo el 32% e podían utilizar para fines industriales y de riego. De los 27 lagos que se analizaron, el 48% no se podían utilizar debido a la contaminación del agua, el 23% se podían usar para fines industriales y de riego y tan sólo el 29% eran seguros para el consumo humano después de un tratamiento.

El alto nivel de contaminación aumenta la dificultad de acceder al agua, aumentando así la escasez de esta. Aproximadamente 25 km³ del agua contaminada proviene del consumo, lo que contribuye a la demanda insatisfecha y al agotamiento del agua subterránea. Además, hasta el 47% del agua que no cumple los estándares de calidad se suministran a los hogares, a la industria y a la agricultura.

Existen una serie de complejas razones que dan lugar a la crisis de contaminación china. La más influyente es el crecimiento económico, uno de los principales objetivos del país. Además, ha habido un largo período de negligencia e ignorancia al respecto, se ha tardado en tomar medidas eficaces para abordar estos problemas. Gran parte de la contaminación es causada por los servicios municipales y las aguas residuales que provienen de la industria.

Las descargas de aguas residuales han aumentado a 53.700 millones de toneladas en 2006, y sólo el 56% de ellas tenía alguna forma de tratamiento. Desde el año 2000 las descargas de aguas residuales domésticas han superado a las descargas industriales y se han convertido en la fuente más importante de contaminación. No fue hasta 2007 cuando la tendencia al alza de la contaminación comenzó a mostrar un signo de reversa, ya que las emisiones totales de la DQO, demanda química de oxígeno, disminuyeron en 3,14% sobre el nivel de 2006. Sin embargo, la situación de contaminación del agua sigue siendo muy grave. Tan sólo el 56% de las aguas residuales municipales recibe alguna forma de tratamiento. También las aguas rurales han sufrido un aumento en la contaminación causada por el uso inapropiado de pesticidas y fertilizantes químicos. Un ejemplo de ello son las aguas subterráneas en algunos lugares del norte de China, donde los niveles de nitrato excedieron los límites permitidos para el agua potable. Los agricultores usan tradicionalmente aguas residuales para regar cultivos, sin embargo, ahora también utilizan aguas residuales industriales, mezclándola con todo tipo de productos químicos tóxicos y persistentes.

El Banco Mundial estima que esta crisis de contaminación de agua le está costando a China alrededor del 2,3% de su PIB, del cual el 1,3% es atribuible a la escasez de agua y el 1% restante a impactos directos de la contaminación hídrica. Estas estimaciones no incluyen el coste de los impactos para los cuales las estimaciones no están disponibles, como los impactos ecológicos asociados a la eutrofización y el secado de lagos y ríos. Por lo tanto, los costes totales son sin duda más altos.

Algunas enfermedades relacionadas con el desarrollo, como un retraso mental o un retraso en el crecimiento, han sido relacionadas con la contaminación de las aguas del Huang, que presentan naturalmente arsénico y plomo. En la provincia de Shanxi, alrededor de este río, se encontraron niveles altos de plomo y cromo en el arroz cultivados y de cadmio en las coles.

4 PROBLEMÁTICA A ABORDAR, MODELO Y RESOLUCIÓN

4.1 Problema

Se tratará de analizar y resolver un problema relacionado con la repartición de agua en el Trasvase Norte-Sur de China, utilizando teoría de juegos aplicada a un modelo. El juego comprenderá dos niveles, el principal, que incluirá cinco jugadores, y cuatro subjuegos con tres subjugadores cada uno. Emplearemos métodos estadísticos y de regresión econométrica para formular las funciones de pago o penalización de los jugadores, métodos de valoración económica (EVMs) para transformar los valores no monetarios en valores económicos, análisis de coste-beneficio (CBA) para comparar los resultados del juego y un análisis de escenario para investigar las incertidumbres futuras. La validez del juego será evaluada comparando las predicciones que se hicieron previamente con las observaciones. Se ha demostrado que la cooperación de los jugadores mejorará el resultado final, aunque algún jugador obtenga pérdidas. A pesar de esto, los jugadores no siempre estarán dispuestos a colaborar, como muestra el *dilema del prisionero*. El resultado mostró además que los jugadores en el área de la escasez de agua o compartición de esta, no podían resolver su problema de déficit hídrico sin las cooperación con otros, incluso en un escenario optimista. La inseguridad hacia la cooperación deriva en problema de contaminación. Por tanto, todo esto sugiere la necesidad de diseñar un mecanismo para reducir el riesgo a perder de cada jugador y de tener que hacer un pago adicional por ello, proporcionándoles incentivos económicos para cooperar.

Desde una perspectiva económica, los recursos hídricos son bienes que proporcionan una gran variedad de actividades productivas e industriales. Sin embargo, la falta de la calidad del agua es una de las grandes causas de las que deriva la escasez y la poca disponibilidad de esta. La administración de agua suele involucrar a las partes interesadas, a los objetivos y a la estrategia. Las descargas de aguas contaminadas son un complejo problema a resolver con respecto a la administración de aguas, no solo por procesos bioquímicos, sino también por las distintas fuentes de contaminación y objetivos dispares de los agentes contaminantes. Los conflictos por calidad y cantidad de agua, suelen estar causados por una distribución desigual de las precipitaciones, por haber muchos solicitantes, por arrojar residuos al agua o mezclado de aguas procedentes de diferentes cuenca, lo cual puede ser causante de una pérdida de estabilidad de esta.

Para resolver este tipo de problemas se han propuesto múltiples soluciones ingenieriles, tales como la reducción de pérdidas de agua, el incremento del uso eficiente de esta, el reciclado del agua ya utilizada, la conservación y la transferencia de esta. Sin embargo, estos métodos no son siempre son válidos o suficientes en regiones que deben enfrentarse a una escasez extrema del agua. La desviación de agua a una cuenca diferente implica un problema multidisciplinar, que producen importantes problemas socioeconómicos, ambiental-económicos, administrativos y legislativos. Además, se han usado instrumentos económicos y políticos para resolver estos problemas, como son los mercados de agua, los cuales proporcionan incentivos para asignar el agua a los demandantes y reducir la contaminación de esta de forma eficiente. Los mercados de agua deben defender los derechos originales de agua de cada uno, por mecanismo legales e infraestructuras que permitan el comercio con esta, antes de que el organismo funciona correctamente. La descarga de residuos en ríos es un mal general público, además de influir en el uso de este por otro. Por tanto, sin un mercado y unos derechos de propiedad de carácter hídricos, serían inevitables los conflictos entre las diferentes partes interesadas. Y, realmente, hay pocos mercados de este tipo.

Los métodos económicos y políticos para resolver un conflicto por agua son fundamentalmente dos: la regulación directa y los instrumentos económicos. El primero de los incluye cuotas de limitación, normas, leyes, etc. Los instrumentos económicos usan precios, derechos hídricos, subsidios, compensaciones, permisos de negociación, impuestos, etc. Sin embargo, estas herramientas no consiguen poner fin por completo al problema, ya que nace de actividades de actividades que generar riqueza. Desde un punto de vista técnico, los problemas

de optimización multiobjetivo han sido usados recientemente para maximizar el beneficio general y así resolver el conflicto relativo a la distribución del agua de las cuencas fluviales. También se han usado algoritmos evolutivos con el mismo fin. A pesar de esto, no han conseguido reflejar los intereses reales de las partes interesadas, aunque consigan el óptimo del problema multiobjetivo, llamado el óptimo de Pareto.

La teoría de juegos es capaz de acercarse a modelar y resolver estos conflictos de los que venimos hablando. Fue desarrollada por el matemático John von Neumann y Oskar Morgenstern en 1944. Los conceptos de modelado y razonamiento de la teoría de juegos han sido aplicados en economía, publicidad, política, biología y otros campos a los que ayuda a analizar el comportamiento de los participantes. Sin embargo, las aplicaciones de teoría de juegos a la resolución de conflictos por agua son, en comparación con su aplicación a otros campos, muy pocas. Ha sido utilizada en este ámbito para la distribución de costes de un proyecto de explotación conjunta de aguas, instalaciones de tratamiento de aguas o eliminación de residuos.

4.2 El problema en China

China posee un total de 2812,4 billones de m³, el sexto país del mundo en este sentido. Sin embargo, debido especialmente a la distribución de las precipitaciones, la escasez de agua se extiende por el norte del país. Para disminuir esta crisis hídrica, los ingenieros chinos propusieron el trasvase de agua desde el sur al norte, *the South-to-North Water Transfer (SNWT) Projects*, que incluía modelos de teoría de juegos para analizar la asignación de aguas y los problemas de contaminación. Los objetivos principales de este estudio son los siguientes:

- Pronosticar el abastecimiento de agua, la demanda y el déficit en diferentes sectores en el norte de China.
- Estimar las posibles fuentes de contaminación, la descarga de residuos y la reducción de estos en la cuenca superior del río Han, afluente del río Yangtsé.
- Evaluación de los beneficios económicos y las pérdidas de agua debidos a la desviación del agua y la reducción de contaminación en las ciudades estudiadas.
- Analizar la incertidumbre posible de la teoría de juegos en escenarios que puedan darse en un futuro.

El trasvase de agua sur-norte (SNWT) de China comprende la ruta del oeste (*Western Route Project WRP*), la ruta central (*Middle Route Project, MRP*) y la ruta del este (*Eastern Route Project, ERP*). Nos centraremos en la MRP, en la que se encuentra Pekín y las seis ciudades de las provincias de Shaanxi, He'nan y Hubei, situadas en la cuenca superior del río Han, afluente del Yangtsé. La MRP, desvía desde el embalse de agua de Danjiangkou situado en la cuenca del río Han a 20 grandes ciudades y a 100 municipios en Pekín y Tianjin, y a las provincias de Hubei y He'nan. Cubre un área total de unos 155.000 km² y cruza unos 200 ríos y canales, con una distancia total de 1.246 km. Estos proyectos de trasvase de agua entre cuencas no son una novedad en China. Sin embargo, la ruta del oeste, *WRP*, cubre dos municipios y cuatro provincias. Este proyecto conseguirá mejorar las pérdidas de agua y los niveles de agua en los ríos. La transferencia de agua dentro de una región puede ser gestionada de forma eficiente a través del gobierno local y de la administración regional del río, siendo éste gestión difícil de llevar a cabo cuando la transferencia de agua se produce entre regiones grandes.



Figura 26. Río Han por la ciudad de Wuhan



Figura 27. Cuenca del río Han, afluente del Yangtsé

4.3 Modelo

Se tratará de modelar la situación actual del río Yangtsé para hacer posible la compartición justa de los recursos que se pueden obtener de él, ya sea por parte de una empresa, un agricultor o cualquier parte que precise de ello. Cada uno pagará una cantidad determinada en función de sus posibilidades y de lo que necesite del río. Para ello, se consideran cuatro datos:

- Coste de navegación.
- Coste del agua.
- Coste de la energía eléctrica.
- Coste los fertilizantes/sedimentos.

4.3.1 Coste de navegación

Desde la antigüedad, el transporte por aguas continentales ha desempeñado un papel importante en el traslado de bienes y productos básicos desde las fuentes de producción hasta los destinos de consumo. Los ferrocarriles y las carreteras, aunque cada vez más importantes para la red de transporte moderna de China, no pueden suplantar por completo las vías fluviales. El alto costo de la construcción evita que los ferrocarriles se construyan ampliamente, y las condiciones de transporte ferroviario a menudo están congestionadas. El volumen de carga transportado por las carreteras es limitado, y las carreteras no son adecuadas para mover mercancías a granel. El potencial de transporte de agua en China es grande, pero aún está lejos de estar completamente desarrollado. No obstante, China tiene más de 75,000 millas (unos 125,000 km) de vías navegables interiores, el sistema más extenso de cualquier país del mundo. La distribución de las vías fluviales se realiza principalmente en el centro y sur de China, a excepción de algunas corrientes navegables en el noreste.

Uno de los primeros objetivos del gobierno comunista después de tomar el poder en 1949 fue establecer una red nacional de vías fluviales. También inició un programa para construir y renovar las instalaciones portuarias y dragar los canales del río. En 1961, unas 15 vías fluviales principales se habían abierto a la navegación, centradas en los ríos Yangtsé, Pearl (Zhu), Huai y Han, Huang He (Río Amarillo) y el Gran Canal. Posteriormente, el desarrollo del transporte por agua ha recibido un énfasis considerable. El dragado y otras mejoras en las vías navegables interiores han sido importantes para la reconstrucción económica, mientras que los costos de capital y mantenimiento para el transporte por agua han sido mucho más bajos que los del transporte por ferrocarril.

El Yangtsé, la arteria más importante en la red de vías fluviales de China, es también uno de los ríos económicamente más importantes del mundo. Junto con sus afluentes, representa casi la mitad del kilometraje de la vía fluvial del país, mientras que el volumen de la carga que transporta representa aproximadamente un tercio del volumen total transportado por el transporte fluvial. El trabajo realizado a mediados de la década de 1950 para mejorar el curso medio del Yangtsé le permitió ser navegable durante todo el año desde su desembocadura hasta Yibin en Sichuan. Cuando el Yangtsé es alto en verano, es navegable desde su desembocadura hasta Chongqing para barcos de hasta 5.000 toneladas. Se habían establecido muchas estaciones de transporte de cable en rápidos en el curso superior del Yangtsé y de sus principales afluentes, como el río Wu. Los barcos que navegan contra la corriente se arrastran por los rápidos con fuertes cables de acero unidos a cabrestantes fijos, lo que aumenta su capacidad de carga, aumenta la velocidad y ahorra tiempo. Dichas mejoras han permitido que se operen servicios regulares de pasajeros y carga en el Yangtsé.

El río Xi es el segundo en importancia solo por el Yangtsé, siendo la principal arteria de transporte de agua del sur de China. Barcos de 1,000 toneladas pueden navegar por el Xi hasta Wuzhou, mientras que embarcaciones más pequeñas pueden navegar por sus cursos medio y superior, así como por los ríos Bei y Dong y los afluentes de todas estas corrientes. El Yangtsé y el Xi no están congelados en invierno. El río Sungari (Songhua), que fluye a través de la llanura de Manchuria, navegable durante la mitad de su curso; Está helado desde noviembre hasta marzo y está lleno de tráfico los otros meses del año. Los ríos Amur (Heilong), Sungari y Ussuri (Wusuli) con sus afluentes forman una red de vías fluviales que suman unas 12,500 millas (20,100 km) de longitud. En el pasado, el Huang He era poco navegado, especialmente en sus cursos medio e inferior, pero los juncos mecanizados ahora operan a lo largo del curso medio en Henan.

El Gran Canal, la única vía fluvial china importante que corre de norte a sur, atraviesa las cuencas de los ríos Hai, Huang, Huai, Yangtsé y Qiantang en su curso de 1.100 millas (1.800 km) desde Beijing a Hangzhou. Uno

de los mayores proyectos de ingeniería en China, igual en fama a la Gran Muralla, es el canal artificial más largo del mundo; Algunas de sus secciones siguen el curso natural de un río, mientras que otras partes están excavadas a mano. El trabajo en el canal comenzó ya en el siglo IV a. C. y se completó a fines del siglo XIII. Forma un enlace de comunicaciones y transporte norte-sur entre las áreas más densamente pobladas de China. Sin embargo, a partir de la última parte del siglo XIX, debido a la corrupción política, la mala gestión y las inundaciones del Huang He, el canal gradualmente se colmó y la sección más alta de Shandong quedó bloqueada. Desde 1958, se han hecho esfuerzos para reabrir el Gran Canal a la navegación, esta vez también por embarcaciones modernas más grandes. El canal es importante en el transporte norte-sur de cargas a granel, lo que facilita la distribución a nivel nacional de carbón y alimentos.

Actualmente las tasas de navegación para transportar personas, animales o mercancías oscilan entre los 20 y los 120 euros (923 yuanes) al año por embarcación. Se estima que el número de embarcaciones para todo tipo de uso está en el millón anual. Es decir, el conjunto de los pagos es 923.000.000 de yuanes.



Figura 28. Barcazas de carga en el Gran Canal en Suzhou, provincia de Jiangsu, China.

4.3.2 Coste del agua

En China, el precio medio de una botella de un litro y medio de agua es de unos 2,13 yuanes. Se usará esta estimación para determinar el precio del caudal de agua que se saca del río para necesidades urbanas que precisan de una purificación previa a su uso. El precio de un litro de agua será de 1,42 yuanes.

Por otro lado, el caudal medio del río es de 30.170 m³/s, unos 30.170.000 l/s. El 5% de esta cantidad se potabilizará para ser embotellada, unos 150.850 litros cada segundo. Suponiendo que se tarda una semana en envasar el agua suficiente para un año y que será consumida por 130.000.000 millones de familias, las cuales cuentan con 5 miembros de media, resulta un coste de agua por familia de 1.660,92 yuanes anuales.

$$\left[\frac{\left[3017000 \frac{l}{s} \times 0,05 \times 3600 \frac{s}{h} \times 8 \frac{h}{turno} \times 7 \frac{turnos}{semana} \right] familias}{130000000} \right] \times 5 \frac{miembros}{familia} = 1660,9281 \text{ ¥ anuales}$$

4.3.3 Coste de la energía eléctrica

El río Yangtsé es el río más caudaloso en todo el mundo, después del Amazonas y el Congo. A esto se añade una serie de caídas de agua muy significativas, lo cual hace que el potencial hidroeléctrico del río sea muy grande, uno de los mayores del mundo, de unos 270 GW. La primera vez que se consideró el aprovechamiento energético del río Yangtsé en curso superior del río, tramo conocido como las Tres Gargantas, se remonta hace el año 1920. El presidente de la República China de aquel momento, Su Yat-sen, propuso la idea del aprovechamiento hidroeléctrico del río como medio de desarrollo de la nación. Tras 70 años de controversias por ser aquel uno de los temas más polémicos de China tanto técnicamente, socialmente, económicamente como políticamente, y después de una serie estudios y proyectos sobre la construcción de una presa en aquella región, el 3 de abril de 1992, la sesión 5ª de VII Congreso Nacional del Pueblo dio su aprobación al proyecto y comenzó su puesta en marcha.

La presa de las Tres Gargantas está situada en la Garganta Xilling, a unos 40 km de la ciudad de Yichang, en la provincia de Hubei, en el centro del territorio chino. El tramo de las Tres Gargantas, con unos 200 km de longitud, comienza en Fengjie y termina en las proximidades de Yichang. Es sin duda uno de los lugares más espectaculares del país. El río corta atraviesa unas impresionantes formaciones calizas y graníticas dando lugar a las tres gargantas, la Qutnag, la Wuxia y la Xiling. Entre 1993 y 2009 se desarrolló la construcción de la presa, al cual cuenta con un aliviadero central de veintidós compuertas de superficie, dos centrales hidroeléctricas y dos estructuras de navegación, las esclusas, para barcos de hasta 10.000 t, y un ascensor vertical, para barcos de hasta 3.000 t.

Desde tiempos inmemorables, en el período que abarca desde la dinastía de Han en 185 a.C. hasta el fin de la China imperial en el año 1911, se registran un total de 214 de catastróficas inundaciones, una media de una cada diez años. Una de las zonas más afectadas por las riadas se encuentra en el inicio del curso medio del Yangtsé, aguas debajo de Yichang hasta llegar a Wuhan. el siglo XX murieron 300.000 personas en el país por culpa de este fenómeno. Por eso, la presa también esté diseñada para mejorar el control del cauce del río, con el fin de evitar estos sucesos y proteger a los más de 15 millones de habitantes que viven en la proximidad de sus orillas. Así, el embalse baja el nivel de agua desde finales de mayo a principios de junio a una cota de 145 m, hasta finales de septiembre (época de monzones), de forma que en épocas de crecidas se disponga de un volumen adicional para su control de 22.150 hm³, el 56,3% del embalse. La protección, por ejemplo, del tramo del río que abarca desde aguas debajo de la presa hasta la ciudad de Wuhan, permite que en lugar de darse una inundación con una periodicidad de una cada diez años, se de cada cien. También, se podrían alcanzar protecciones de alrededor de 1.000 años de período de retorno con el control por inundaciones en el lago Dongting, el cual se nutre de las aguas que desborda el río Yangtsé entre los meses de julio y septiembre. En 2010, se produjo la peor crecida del río en la última década. Esto puso a prueba a la presa en su función de control de laminación de avenidas. En julio de aquel año, la punta de avenida a la entrada del embalse fue de 70.000 m³/seg. La presa redujo dicho pico en un 43%, es decir que consiguió desaguar un máximo de 40.000 m³/seg.

Además, la presa garantiza la seguridad en la navegación entre Chongqing y Shanghái, reduciendo en los accidentes fluviales un 60%, lo cual ha potenciado el transporte fluvial, llegando a 100 millones de toneladas

transportadas al año.

La producción de energía eléctrica es el principal objetivo de la presa. Tiene una capacidad de 22.500 MW, la segunda mayor del mundo. La producción media es de **un millón de kW/h cada hora**. Al ser una fuente de energía renovable, se ha conseguido reducir unos 100 millones de toneladas de dióxido de carbono, lo cual ha ayudado a mejorar la reducción de emisiones en China. Es capaz de abastecer energía a **130 millones de familias**, el 10% de la demanda eléctrica de China. Si consideramos un precio medio de la luz de **6,3 yuanes/kW**, el beneficio obtenido por el suministro de energía eléctrica es de 2268000000 yuanes cada mes, lo que supone un coste de 17,45 yuanes al mes por cada familia, un total de **209,35 yuanes al año por familia**.

En las siguientes tablas se resume lo argumentado anteriormente:

Suministro	1000000	kW/h
Abastecimiento	130000000	familias
Precio de la luz	6,3	yuan/kW

$$\text{Beneficio mensual} = 1000000 \frac{\text{kW}}{\text{h}} \times 6,3 \frac{\text{yuanes}}{\text{kW}} \times 12 \frac{\text{h}}{\text{día}} \times 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 2268000000 \frac{\text{yuanes}}{\text{mes}}$$

$$\text{Pago de la luz al mes por familia} = \frac{2268000000}{130000000} = 17,446 \frac{\text{yuanes}}{\text{mes} \times \text{familia}}$$

$$\begin{aligned} \text{Pago de la luz al año por familia} &= 17,446 \frac{\text{yuanes}}{\text{mes} \times \text{familia}} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} \\ &= 209,3538 \frac{\text{yuanes}}{\text{año} \times \text{familia}} \end{aligned}$$

Beneficio mensual	2268000000	¥/mes
Pago luz al mes por familia	17,4461538	¥/mes*familia
Pago luz al año por familia	209,353846	¥/año*familia

4.3.4 Coste de los fertilizantes/sedimentos

Por último, se considerará el precio de los fertilizantes o abonos utilizados en los cultivos próximos al río, los cuales mantienen e incrementan el contenido de estos en el terreno, mejoran la calidad del sustrato nutricionalmente y estimulan el crecimiento de las plantas. Algunos de los más utilizados en China son el nitrato de calcio (N_{Ca}), el nitrato de potasio (N_{KS}) o el nitrato de magnesio (Mg(NO₃)₂). Su precio oscila entre los 200\$ y los 500\$, es decir, entre 1408 y 3520 yuanes al mes. Tomamos un valor intermedio, 250\$, por ser el precio más corriente de los fertilizantes. Para tener coherencia con los datos anteriores, se expresa lo expresamos en la moneda china, unos **1785,72¥** en total cada año.

4.4 Resolución

Se consideran tres variables que nos ayudarán a calcular el precio a pagar por cada usuario que quiera utilizar el río, ya sea para navegar, obtener agua, conseguir energía eléctrica o cultivar en las proximidades de sus orillas lo que precise cada uno de ellos. Se escribiría $i=1,2,3,4$ para hacer referencia a uno de estos cuatro productos hídricos de los que se puede hacer uso en el río Yangtsé.

- **Coste separable de i:** es la resta de la suma del coste de todos los productos que se pueden obtener del río menos ese mismo coste excluyendo el que corresponda al valor de i. Este coste hace referencia al valor de los *impuestos a pagar* por el uso del producto i.

$$s_i = C(N) - C(N|i); \forall i = 1,2,3,4$$

- **Coste eludido de i:** es una ratio, que se calcula como la resta de la suma del coste de todos los productos que se pueden obtener del río menos el coste separable de i. Es lo que se llama el *pago pendiente o extra*, es decir, el pago real por obtener el producto i.

$$r_i = C(i) - s_i; \forall i = 1,2,3,4$$

- **Pago final de cada actor i:** es el valor del coste de lo que paga el usuario por el producto i. Cada jugador paga su coste separable, s_i , y el coste no separable $\frac{r_i}{r(N)} [C(N) - s(N)]$

$$x_i = s_i + \frac{r_i}{r(N)} [C(N) - s(N)]; \forall i = 1,2,3,4$$

$C(i = 1) = 923\text{¥}/\text{embarcación}$ (media con 1 millón de embarcaciones al año) 923.000.000 en total

$C(i = 2) = 1661\text{¥}/\text{familia}$

$C(i = 3) = 209\text{¥}/\text{familia}$

$C(i = 4) = 250\$ = 1785,72\text{¥}$

Se supondrá que las familias, normalmente agrícolas, usan los 4 productos. Además, cuando se compran o usan todos los productos, el usuario obtiene una rebaja del 10%. Así mismo, cuando se usan todo menos uno, se tiene una rebaja del 5%, y del 2% si sólo se compran dos. De esta forma, cuanto menos hago uso del río, más porcentaje del total debo pagar.

$$C(N) = 0,90 \times (923 + 1661 + 209 + 1786) = 4121.1$$

$$C(N|i = 1) = 0,95 \times (1661 + 209 + 1786) = 3473.2$$

$$C(N|i = 2) = 0,95 \times (923 + 209 + 1786) = 2772.1$$

$$C(N|i = 3) = 0,95 \times (923 + 1661 + 1786) = 4151.5$$

$$C(N|i = 4) = 0,95 \times (923 + 1661 + 209) = 2653.3$$

$$C(N|i = 1,2) = 0,98 \times (923 + 1661) = 2532.3$$

$$C(N|i = 1,3) = 0,98 \times (923 + 209) = 1109.4$$

$$C(N|i = 1,4) = 0,98 \times (923 + 1786) = 2654.8$$

$$C(N|i = 2,3) = 0,98 \times (1661 + 209) = 1832.6$$

$$C(N|i = 2,4) = 0,98 \times (1661 + 1786) = 3378.1$$

$$C(N|i = 3,4) = 0,98 \times (209 + 1786) = 1955.1$$

$$\begin{aligned} s_N = s(N) &= 4 \times C(N) - C(N|1) - C(N|2) - C(N|3) - C(N|4) \\ &= 4 \times 4121.1 - 3473.2 - 2772.1 - 4151.5 - 2653.3 = 3434.3 \end{aligned}$$

$$s_1 = s(i = 1) = C(N) - C(N|1) = 4121.1 - 3473.2 = 647.9$$

$$s_2 = s(i = 2) = C(N) - C(N|2) = 4121.1 - 2772.1 = 1349$$

$$s_3 = s(i = 3) = C(N) - C(N|3) = 4121.1 - 4151.5 = -30.5$$

$$s_4 = s(i = 4) = C(N) - C(N|4) = 4121.1 - 2653.3 = 1467.8$$

El valor negativo del coste separable de la energía eléctrica, s_3 , indica que dicho bien es muy caro.

$$r_1 = r(i = 1) = C(1) - s_1 = 923 - 647.9 = 275.1$$

$$r_2 = r(i = 2) = C(2) - s_2 = 1661 - 1349 = 312$$

$$r_3 = r(i = 3) = C(3) - s_3 = 209 - (-30.5) = 239.5$$

$$r_4 = r(i = 4) = C(4) - s_4 = 1786 - 1467.8 = 318.2$$

$$r(N) = C(N) - s_N = (923 + 1661 + 209 + 1786) - (647.9 + 1349 - 30.5 + 1467.8) = 1144.8$$

$$x_1 = s_1 + \frac{r_1}{r_N} [C(N) - s_N] = 647.9 + \left(\frac{275.1}{1144.8} \right) \times (4121.1 - 3434.2) = 812.9 \text{ yuanes anuales}$$

$$x_2 = s_2 + \frac{r_2}{r_N} [C(N) - s_N] = 1349 + \left(\frac{312}{1144.8} \right) \times (4121.1 - 3434.2) = 1536.2 \text{ yuanes anuales}$$

$$x_3 = s_3 + \frac{r_3}{r_N} [C(N) - s_N] = -30.5 + \left(\frac{239.5}{1144.8} \right) \times (4121.1 - 3434.2) = 113.2 \text{ yuanes anuales}$$

$$x_4 = s_4 + \frac{r_4}{r_N} [C(N) - s_N] = 1467.8 + \left(\frac{318.2}{1144.8} \right) \times (4121.1 - 3434.2) = 1658.7 \text{ yuanes anuales}$$

Estos valores son unitarios en el sentido de que se calculan para una entidad. Es decir, si, por ejemplo, un campesino usa todos los recursos deberá pagar al gobierno un total de 4221 yuanes al año. Sin embargo, las empresas no son unidades iguales a los campesinos, no son comparables, debido a que necesitan muchos más recursos y su infraestructura es más cara y complicada. En este sentido, las empresas deben negociar con el gobierno un pago único anual relacionado con todos los recursos que emplea.

En nuestro caso el gobierno consiente en rebajar el coste de explotación suficientemente para que la empresa tenga beneficios aceptables si esta plantea una reducción en la polución del río debido a sus actividades. Para ello le impone unas restricciones de emisión de gases y producción de desechos relacionadas con la explotación de los diversos productos. Llamaremos $P(S)$ a la máxima polución permitida si pensamos en que la empresa explota los recursos contenidos en S . El gobierno, en un primer momento, permite el cálculo del core de este juego permitiendo así cierta flexibilidad en las actuaciones de la empresa. Sin embargo, ante su desconfianza, sobre todo debido a la gran extensión de territorio que debe abarcar el comité, considera que, en primera instancia, durante un tiempo prudencial, exigirá que las empresas se mantengan en los límites del nucleolo del juego.

Nuestro caso:

Los procesos industriales generan una gran variedad de aguas residuales, que pueden tener orígenes muy distintos, en función de los usos más frecuentes a los que se destine:

- Producción de energía por vaporización, en centrales clásicas o nucleares.
- Transporte de calorías para condensación de vapor, refrigeración de fluidos de aparatos.
- Transporte de materias primas o de desechos como en la industria conservera, carbón en los lavaderos, fibras en papeleras, etc.
- Fabricación de productos en papeleras, industrias textiles y alimentarias.
- Transporte de iones en galvanoplastia.
- Aclarado de piezas o lavado de productos en tratamientos de superficies, semiconductores, industrias agrícolas, etc.
- Lavado de gases utilizado en la industria metalúrgica y en las industrias químicas.
- Preparación de baños en electroforesis, aceites solubles, etc.

Por lo tanto, los tipos de aguas residuales obtenidas serán las utilizadas como medio de transporte de sustancias y calor en lavado y enjuague, en las transformaciones químicas, como disolvente y subproducto de procesos físicos de filtración o destilación, etc.

Con independencia del posible contenido de sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden aparecer elementos propios de cada actividad industrial, entre los que cabe citar: tóxicos, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, etc.

Los residuos orgánicos de algunas industrias, por ejemplo, las de pasta de papel, pueden ser iguales o más importantes que los de una comunidad media de habitantes.

Los contaminantes pueden encontrarse en forma disuelta o en suspensión, y ser orgánicos e inorgánicos por su naturaleza química.

4.4.1 Medidas para evitar la polución

Lo más eficaz para luchar contra este tipo de contaminación es disminuir la cantidad de fosfatos y nitratos en los vertidos, usando detergentes con baja proporción de fosfatos, empleando menor cantidad de detergentes, no abonando en exceso los campos, usando los desechos agrícolas y ganaderos como fertilizantes, en vez de verterlos, etc.

En concreto:

- Tratar las aguas residuales en estaciones depuradoras de aguas residuales que incluyan tratamientos biológicos y químicos que eliminan el fósforo y el nitrógeno.
- Almacenar adecuadamente el estiércol que se usa en agricultura.
- Usar los fertilizantes más eficientemente.
- Cambiar las prácticas de cultivo a otras menos contaminantes. Así, por ejemplo, retrasar el arado y la preparación de los campos para el cultivo hasta la primavera y plantar los cultivos de cereal en otoño asegura tener cubiertas las tierras con vegetación durante el invierno con lo que se reduce la erosión.
- Reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno y amoníaco.

VARIABLE, I	P _I
Oxígeno disuelto, materia en suspensión, pH, conductividad, DBO ₅ , coliformes totales	1
DQO, ortofosfatos, NO ₃ ⁻	3
Detergentes, CN ⁻ , Fenoles, Cd, Cr hexavalente, Hg	1
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cu, Pb, Zn	2
Ca ²⁺	3
Mg ²⁺ , Na ⁺	4

Supondremos que buscamos un índice de polución máximo de 13 mg/m³ donde el juego asociado P es:

$$N = \{1,2,3,4\}$$

$$P(N) \rightarrow R \text{ con } P(\emptyset) = 0; P(\{1\}) = 0; P(\{2\}) = 0; P(\{3\}) = 0; P(\{4\}) = 0; P(\{1,2\}) = 0; P(\{3,4\}) = 0; P(\{1,3\}) = 6,5; P(\{1,4\}) = 6,5; P(\{2,3\}) = 0; P(\{2,4\}) = 6,5; P(\{1,2,3\}) = 10; P(\{1,2,4\}) = 10; P(\{1,3,4\}) = 10; P(\{2,3,4\}) = 10; P(\{1,2,3,4\}) = 13$$

El nucleolo, es decir, los valores límites que el gobierno pide a las empresas, de este juego es:

$$N = (3.25, 3.25, 3.25, 3.25)$$

Es decir, el gobierno restringirá a las empresas que estén alrededor de este valor en cuanto al nivel de contaminación de cada actividad.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos estudiado el coste de los productos de un río chino, el río Yangtsé, que pueden ser susceptibles de ser empleados por los distintos agentes que usan el río.

Hemos calculado el coste anual que supone a los agentes el uso de cada producto vía un juego de coste separable el cual ha sido usado en muchas ocasiones para problemas de este tipo.

Sin embargo, hemos detectado que hay agentes cuya toma de recursos no es comparable. Por un lado, las familias que dependen de los productos del río y las empresas situadas en él.

Después de los cálculos realizados podemos concluir que, siendo x_i el valor del pago final que debe realizar el usuario por el bien i , es decir, la suma de los impuestos a pagar por obtener dicho bien (coste separable de i , s_i) y el precio del bien en sí (coste eludido de i , r_i), el más barato, y con gran diferencia, es el tercero, el coste de la energía eléctrica. Le siguen el coste de navegación y el del agua respectivamente, siendo el más caro el coste de los fertilizantes.

Respecto a las empresas no pueden sujetarse a los costes anuales de una familia debido a la cantidad de recursos que necesita lo cual supondría un gasto inasumible. Así que negocian con el gobierno una reducción de costos para poder producir.

El gobierno, a su vez, le plantea esta reducción de costos si cumple unas normativas sobre la polución que puede ocasionar al río y a su entorno. Para ello se genera un juego de polución y se calcula el nucléolo de este juego.

El gobierno exigirá a las empresas que su nivel de polución por tipo de producto esté siempre cercano al valor que indica el nucléolo calculado.

BIBLIOGRAFÍA

- <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/Trasvase-Tajo-Segura/>
- <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/Trasvase-Tajo-Segura/>
- https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,373,m,1915&r=ReP-27536-DETALLE_REPORTAJESPADRE
- https://www.voyagesphotosmanu.com/rios_australia.html
- <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/Trasvases%20Asia/australia.html>
- http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/Trasvases%20Asia/china_3.html#sur
- https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/12/17/companias/1545063184_504455.html
- https://en.wikipedia.org/wiki/Lesotho_Highlands_Water_Project
- <https://www.water-technology.net/projects/lesotho-highlands/>
- <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/Trasvases%20Asia/israel.html>
- <https://embassies.gov.il/san-salvador/AboutIsrael/Land/Pages/TIERRA-Agua.aspx>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Acueducto_Nacional_de_Israel
- <https://actualidad.rt.com/actualidad/view/95768-israel-rio-jordan-mar-galilea>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Canal_Rin-Meno-Danubio
- <https://www.mecalux.es/articulos-de-logistica/transporte-fluvial-mercancias-union-europea>
- https://elpais.com/diario/1992/09/26/internacional/717458415_850215.html
- <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
- <https://www.who.int/es/news-room/detail/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitatio>
- <https://thewire.in/politics/who-should-karnataka-blame-in-the-cauvery-dispute-history-has-some-answers>
- <http://www.icarito.cl/2009/12/368-7430-9-2-india.shtml>
- https://ideaguide.ru/es/cruceros-rusia/itinerario/canal_de_moscu
- https://es.wikipedia.org/wiki/Canal_de_Mosc%C3%BA
- <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/Trasvases%20Asia/japon.html>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Acueducto_de_Tamagawa
- <https://www.arkiplus.com/canal-de-karakum/>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Canal_de_Karakum
- <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/Trasvases%20Asia/Kazajstan.html>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Canal_Irtish-Karagand%C3%A1
- <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/Trasvases%20Africa/francia.html>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Canal_de_Provence
- https://www.fundacionaquae.org/aquaexplore/tresgargantas_html/index.html

