

ALBA MARÍA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ

**SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS  
EN SÃO MIGUEL DO ANTA, MINAS GERAIS:  
UN ENFOQUE DE DINÁMICA DE SISTEMAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2006

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O66s  
2006

Orellana González, Alba Maria Guadalupe, 1962-  
Sostenibilidad de los recursos hídricos en São Miguel  
do Anta, Minas Gerais : un enfoque de dinámica de  
sistemas / Alba Maria Guadalupe Orellana González.  
– Viçosa : UFV, 2006.  
xxi, 106f. : il. ; 29cm.

Texto em espanhol.

Resumo : Espanhol, português e inglês.

Inclui anexo.

Orientador: Aziz Galvão da Silva Júnior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 85-92.

1. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Modelos  
matemáticos. 2. Desenvolvimento econômico - Aspectos  
ambientais. 3. Economia ambiental - Doce, Rio, Bacia  
(MG e ES). I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 333.91

ALBA MARÍA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ

**SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS  
EN SÃO MIGUEL DO ANTA, MINAS GERAIS:  
UN ENFOQUE DE DINÁMICA DE SISTEMAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

APROVADA: 23 de fevereiro de 2006.

---

José Euclides Alhadás Cavalcanti

---

Laércio Antônio Gonçalves Jacovine

---

Everardo Chartuni Mantovani

---

Elias Silva  
(Conselheiro)

---

Aziz Galvão da Silva Júnior  
(Orientador)

*A mis amados Rodrigo y Alejandro, quienes le dan sentido y luz a mi vida.*

## **AGRADECIMIENTO**

Al profesor Antônio Carvalho Campos, por incentivar-me a comenzar la maestría en Economía Aplicada en este departamento.

Al profesor Aziz Galvão da Silva Júnior, por la confianza, accesibilidad, entusiasmo, dedicación y los oportunos y acertados consejos que como orientador, me brindo a lo largo de todo este período de estudios. Al profesor Elias Silva, por todas las atenciones, recomendaciones y valiosas sugerencias, que proporciono, en cada etapa del trabajo. Al profesor José Luís Braga, por las inestimables aportaciones para la realización de este estudio.

Al Alcalde Municipal de São Miguel do Anta, Sr. José Eugênio Pacelli Lopes, por la importante ayuda e informaciones facilitadas, así como a sus colaboradores.

A mis compañeros de la Maestría y de Doctorado, por el cariño y la amistad otorgada, especialmente a Marivane, Adelson, y Jader.

A los funcionarios del DER, en particular a Cida, Graça, Luiza, Carminha y Tedinha, por toda la ayuda y colaboración que me brindaron.

Quiero agradecer particularmente a mi Esposo e Hijo, por su inquebrantable apoyo, paciencia y amor, ya que sin ellos, no hubiera sido posible llegar hasta el final de ésta etapa en mi vida académica. Y por supuesto a Dios todopoderoso, que siempre nos da fortaleza para conquistar nuestras metas.

## BIOGRAFÍA

ALBA MARÍA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ, hija de Oscar Pompilio Orellana Orellana y Alba Esperanza González Portillo, nació en La Libertad, El Salvador, el 4 de septiembre de 1962. Ingresó en el curso de Economía de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” de El Salvador en marzo de 1981, concluyéndolo en abril de 1987.

En marzo de 2004, inicio el curso de Maestría del Programa de Pos-Graduación *stricto sensu* en Economía Aplicada en el Departamento de Economía Rural de la Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, y en el día 23 de febrero de 2006, sometió su disertación para evaluación.

## ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABLAS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xi
RESUMEN .....	xiv
RESUMO .....	xvii
ABSTRACT .....	xx
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Consideraciones iniciales .....	1
1.2. El problema y su importancia .....	5
1.3. Objetivos .....	8
2. METODOLOGÍA .....	9
2.1. Referencial teórico .....	9
2.1.1. Desarrollo sostenible .....	9
2.1.2. Recursos hídricos: conceptos generales .....	11

	Página
2.1.3. Estudios sobre recursos hídricos .....	14
2.1.4. El pensamiento sistémico .....	16
2.2. Modelo analítico .....	20
2.2.1. Principios de la dinámica de sistemas .....	20
2.2.2. Etapas en el modelaje de dinámica de sistemas .....	23
2.2.3. Componentes de los modelos de dinámica de sistemas .....	24
2.2.4. Utilidad de la dinámica de sistemas .....	27
2.3. Caracterización del área de estudio .....	28
2.3.1. Delimitación espacial .....	28
2.4. Fuente de datos .....	33
2.5. Modelaje del sistema de recursos hídricos de São Miguel do Anta .	33
2.5.1. Etapa de conceptualización .....	34
2.5.2. Etapa de formalización .....	40
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	51
3.1. Validación del modelo de simulación dinámica .....	51
3.2. Etapa de simulación: aplicación del modelo de simulación dinámi- ca .....	55
3.2.1. Escenario 1: <i>Bussiness as Usual</i> (BaU) .....	59
3.2.2. Escenario 2: disminución de la oferta de agua en 10% debido a variaciones climáticas .....	67
3.2.3. Escenario 3: disminución de la oferta de agua en 20% debido a variaciones climáticas .....	69
3.2.4. Escenario 4: aumento de la cantidad de tierras incorporadas al riego en 50% .....	72

	Página
3.2.5. Escenario 5: combinación de los escenarios 3 y 4 .....	75
3.2.6. Análisis de sostenibilidad de los recursos hídricos .....	78
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85
ANEXOS .....	93
ANEXO A .....	94
ANEXO B .....	103
ANEXO C .....	105

## LISTA DE TABLAS

		Página
1	Escenarios propuestos y evaluados en la investigación .....	58
2	Parámetros principales del BaU escenario .....	61
3	Carga contaminante de origen humano y animal .....	66
4	Índice de sostenibilidad estimado en los diferentes escenarios .....	78
1A	Población animal por especie (cabezas) .....	94
2A	Requerimientos de agua por especie .....	95
3A	Requerimientos de agua por especie ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ) .....	96
4A	Requerimientos de agua por especie ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ) .....	97
5A	Lámina de riego necesaria en el municipio de São Miguel do Anta .....	98
6A	Producción (Tn) .....	99
7A	Área (ha) .....	100
8A	Consumo de agua ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ) .....	101

	Página
9A Tasa de crecimiento pecuaria 1994-2004 .....	102
1B São Miguel do Anta: aguas superficiales .....	103
2B Cálculo de las aguas subterráneas disponibles ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ) .....	104

## LISTA DE FIGURAS

		Página
1	Esencias, principios y prácticas del pensamiento sistémico .....	17
2	Ejemplo de un diagrama causal .....	19
3	Lazo de realimentación: (a) positiva y (b) negativa .....	22
4	Símbolos usados por el <i>software</i> STELLA 8.0 en la representación de un estoque; flujos con tasa de entrada y de salida conector de información inicial; conector; convertidor o variable auxiliar; variable gráfica y variable fantasma .....	25
5	Localización del municipio de São Miguel do Anta, MG .....	28
6	Mapa de calidad del agua, cuenca del Río Doce .....	31
7	Mapa de erosión, cuenca del Río Doce .....	31
8	Mapa de caudales específicos, cuenca del Río Doce .....	32

	Página
9	Flujograma que representa la estructura del modelo de recurso hídricos ..... 37
10	Diagrama causal del MASMA ..... 38
11	Diagrama de estoque y flujo del MASM ..... 40
12	Resultados simulados de las demandas sectoriales ( $m^3$ año $^{-1}$ ) en el período 1996-2004 ..... 54
13	Resultados simulados del crecimiento de la población animal (cabezas), en el período 1996-2004 ..... 56
14	Resultados simulados del crecimiento de la población humana, urbana y rural (habitantes), en el período 1996-2004 ..... 56
15	<i>Interfase</i> del MASMA ..... 58
16	Proyección de la demanda Sectorial de agua ( $m^3$ año $^{-1}$ ) ..... 62
17	Comparativo entre el crecimiento poblacional (hab.) y su demanda de agua ( $m^3$ año $^{-1}$ ) ..... 63
18	Proyección de la oferta y demanda de agua total ( $m^3$ año $^{-1}$ ) ..... 64
19	Índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035 ... 65
20	Niveles de DBO ( $kg\ d^{-1}$ ), proyectados para la población y la pecuaria ..... 66
21	Escenario 2: proyección de la oferta y demanda de agua total ( $m^3$ año $^{-1}$ ) ..... 68
22	Escenario 2: índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035 ..... 68
23	Escenario 2: niveles de DBO ( $mg\ L^{-1}\ d^{-1}$ ), vertidos al cuerpo de agua ..... 69
24	Escenario 3: proyección de la oferta y demanda de agua total ( $m^3$ año $^{-1}$ ) ..... 70

		Página
25	Escenario 3: índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035 .....	71
26	Escenario 3: niveles de DBO ( $\text{mg L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ), vertidos al cuerpo de agua .....	72
27	Escenario 4: proyección de la oferta y demanda de agua total ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ) .....	73
28	Escenario 4: índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035 .....	74
29	Escenario 4: niveles de DBO ( $\text{mg L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) vertidos al cuerpo de agua .....	75
30	Escenario 5: proyección de la oferta y demanda de agua total ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ) .....	76
31	Escenario 5: índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035 .....	77
32	Escenario 5: niveles de DBO ( $\text{mg L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ), vertidos al cuerpo de agua .....	78

## RESUMEN

ORELLANA GONZÁLEZ, Alba María Guadalupe, M.S., Universidade Federal de Viçosa, febrero de 2006. **Sostenibilidad de los recursos hídricos en São Miguel do Anta, Minas Gerais: un enfoque de dinámica de sistemas.** Orientador: Aziz Galvão da Silva Júnior. Consejeros: Elias Silva y José Luís Braga.

El desarrollo sostenible, ha recibido mucha atención a nivel mundial, a partir de la década de los 90. Mantener una oferta de recursos hídricos sustentable implica evitar el uso excesivo de las aguas superficiales; la extracción controlada de las aguas subterráneas, y el tratamiento y uso eficiente de las aguas residuales. Para lograr esto, es necesario que los planes de desarrollo de los países contemplen políticas relativas al uso y manejo de los recursos naturales, destacando en particular, la importancia de los recursos hídricos en el desarrollo socioeconómico de las regiones donde estos planes serán aplicados. En la presente investigación usamos un modelo de dinámica de sistemas para analizar la sostenibilidad de los recursos hídricos en el municipio de São Miguel do Anta, localizado en la microregión de Viçosa, Zona da Mata, Minas Gerais. La demanda de recursos hídricos, en el citado municipio, viene aumentando en los últimos años, debido por un lado, al crecimiento de las actividades económicas del municipio, por la

implementación del Programa Nacional de Fortalecimiento da Agricultura Familiar (PRONAF), y por otro, a las demandas de la creciente población. El llamado Modelo Agua de São Miguel do Anta (MASMA) se desarrolló para abordar una variedad de escenarios de oferta y demanda de agua para el área de estudio. El MASMA es un modelo, basado en principios de dinámica de sistemas. A través de un análisis sistémico de los recursos hídricos del municipio, se determinaron las principales variables y sus respectivas interrelaciones, conformándose así, la estructura del modelo de oferta y demanda hídrica. Esta estructura se representa en el diagrama causal, que sirve como base para la elaboración del diagrama de estoque y flujos, por medio del cual se establece el modelo matemático que permite efectuar la simulación numérica. Se aplicaron, además, testes de validación del modelo. Los resultados obtenidos permitieron constatar que el modelo esta estructurado y se comporta de forma coherente a los datos existentes en la realidad, lo que lo torna adecuado para la simulación. El modelo, ha sido desarrollado con el *software Stella 8.0*. Se escogió como horizonte de planeación, un período de 32 años. Se han examinado cinco escenarios, que comprenden futuros aumentos en la demanda de agua, y restricciones en la oferta de este recurso, a fin de evaluar la sustentabilidad de la oferta de agua disponible, en el municipio de São Miguel do Anta. Las tendencias actuales del sistema de recursos hídricos del municipio se incorporan en el primer escenario: el *Bussiness as Usual*. Se estimó para examinar la sostenibilidad un Índice. Este Índice refleja que el sistema, bajo los supuestos incorporados en el referido escenario, no se encuentra, durante el período de estudio, en una situación de sobreexplotación o *stress*. Se esta utilizando el 50% del agua disponible en el área de estudio, contándose aún con un 30% de excedente que puede ser utilizado sin perjudicar la sostenibilidad del sistema. En lo que respecta a la calidad del agua, la sostenibilidad del sistema se encuentra bastante afectada, principalmente por los residuos generados por la actividad pecuaria del municipio. El modelo desarrollado, permitió aumentar la comprensión, acerca de la forma de funcionamiento del sistema de recursos hídricos del municipio. Esto lo convierte en un valioso instrumento computacional

de auxilio a los formuladores de políticas para el planeamiento de los recursos hídricos en el local del estudio.

## RESUMO

ORELLANA GONZÁLEZ, Alba María Guadalupe, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2006. **Sustentabilidade dos recursos hídricos em São Miguel do Anta, Minas Gerais: um enfoque de dinâmica de sistemas.** Orientador: Aziz Galvão da Silva Jr. Conselheiros: Elias Silva e José Luís Braga.

O desenvolvimento sustentável tem recebido muita atenção, a nível mundial, a partir da década de 90. Manter uma oferta sustentável de recursos hídricos implica evitar o uso excessivo das águas superficiais; extrair de forma controlada as águas subterrâneas; e, tratar e usar eficientemente as águas residuais. Para que essas ações sejam atendidas, é preciso que nos planos de desenvolvimento dos países, se contemplem políticas relativas ao uso e manejo dos recursos naturais, evidenciando em particular, a importância dos recursos hídricos no desenvolvimento socioeconômico das regiões onde esses planos sejam aplicados. No presente trabalho, adota-se um modelo de dinâmica de sistemas para analisar a sustentabilidade dos recursos hídricos no município de São Miguel do Anta, localizado na microrregião de Viçosa, localizada na Zona da Mata, do estado de Minas Gerais. A demanda de recursos hídricos, no município, tem aumentado

nos últimos anos, devido, por um lado, ao crescimento das atividades econômicas do referido município, através da implementação do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF) e, por outro, às demandas crescentes da população que tem aumentado. O denominado Modelo de Água de São Miguel do Anta (MASMA) foi desenvolvido para abordar uma variedade de cenários de oferta e demanda de água na área de estudo. O MASMA é um modelo, embasado em princípios de dinâmica de sistemas. Por meio de uma análise sistêmica dos recursos hídricos do município, foram determinadas as variáveis principais e suas respectivas inter-relações, de acordo com a estrutura do modelo de oferta e demanda hídrica. Essa estrutura foi representada no diagrama de influência, que serve de base à elaboração do diagrama de estoque e fluxo, por meio do qual se estabeleceu o modelo matemático, que permitiu efetuar a simulação numérica. Foram aplicados testes para a validação do modelo. Os resultados obtidos permitiram verificar que o modelo está conformado e se comporta de forma coerente aos dados existentes na realidade, o que o torna adequado para simulação. O modelo foi desenvolvido com o uso do *software Stella 8.0*. Como horizonte de planejamento para o presente estudo, foi escolhido, um período de 32 anos. Foram examinados cinco cenários, que compreendem futuros aumentos na demanda de água e restrições na oferta de esse recurso, com o objetivo de avaliar a sustentabilidade da oferta de água disponível no município de São Miguel do Anta. As tendências atuais do sistema de recursos hídricos do município se enquadram no primeiro cenário: definido como *Business as Usual*. Para avaliar a sustentabilidade foi construído um Índice. Esse Índice revela que o sistema, sob as suposições incorporadas no referido cenário, não se encontra, no decorrer do período em estudo, numa situação de *stresse*. Um outro resultado obtido no estudo revela que, atualmente, se utiliza 50% da água disponível no local, contando ainda com 30% de excedente que pode ser usado sem atingir a sustentabilidade do sistema. No que se refere à qualidade da água, a sustentabilidade do sistema está bastante prejudicada, em particular pelos resíduos gerados pela atividade pecuária desenvolvida no município. O modelo desenvolvido permite aumentar a compreensão, em relação à forma de

funcionamento do sistema de recursos hídricos de São Miguel do Anta, MG. O que o converte num valioso instrumento computacional de auxílio aos formuladores de políticas para o planejamento dos recursos hídricos no local de estudo.

## ABSTRACT

ORELLANA GONZÁLEZ, Alba María Guadalupe, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2006. **Water resources sustainability in São Miguel do Anta, Minas Gerais: a systems dynamics approach.** Adviser: Aziz Galvão da Silva Júnior. Committee Members: Elias Silva and José Luís Braga.

Sustainable development has received attention around the world since the 90's. To maintain a sustainable water resources offer implies not over exploiting surface water; controlling groundwater extraction, and also, but not least, the treatment and efficient use of wastewater. One of humanity's biggest challenges, today, is to reach a sustainable water resources offer. Pursuing a sustainable use of available water resources is an important and complex task. To achieve this, it is necessary that national development programs take under consideration policies regarding the use and management of the water resources available. These policies must highlight, the importance of water resources in the socioeconomic development of the regions where these plans will be applied. Using a dynamic systems model developed for this research, it was analyzed the water resources sustainability in the São Miguel do Anta municipality, located in the microregião of Viçosa, Zona da Mata, Minas Gerais. Water demand has increased along the years in São Miguel do Anta, due on one hand, on the economic growth caused by

the implementation of the Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF); and on the other hand, due to the growing population's demands. The dynamic system model developed has been called Modelo Agua de São Miguel do Anta (MASMA). It was developed to analyze, by means of scenarios, the interactions of a variety of offer and demands of water in the study area. MASMA is based on dynamics systems modeling principles. Through a systemic analysis of the municipality's water resources, the main variables and their corresponding interrelations were determined, structuring a water resources offer and demand model. This structure is represented as a Causal Diagram that serves as a base for the elaboration of the Stocks and Flows Diagram. Having this latest diagram, the Mathematical Model is constructed which allows the numeric simulation to be made. This model was validated applying standard validation tests. The results obtained verify that the structure and the behavior of MASMA are coherent with real data, which makes it adequate for simulation. The model has been developed using the software *Stella 8.0*. To estimate future demands and offers of water, users can simulate how several current suppositions can affect the behavior of the hydraulic system during a 32 year time frame. Five scenarios have been examined considering future increases in demand of water and restrictions in the offer of this resource, in order to evaluate the sustainability of the water resources, in São Miguel do Anta municipality. Current tendencies of water resources use in the municipality are incorporate in the first scenario, *Business as Usual*. This scenario indicates, using the sustainability index, that the system is not on a over exploited situation or stress. It is being used 50% of the available water in the region; still having a 30% surplus, which can be used without harming the region's water resources sustainability. Regarding water quality, the system sustainability is affected, mainly because of the wastewater generated by cattle rising activity. The model developed helps to understand the behavior of water resources use in the municipality, which makes it a valuable simulation tool that can help policy makers to plan the use of water resources in the near future in the area of the study.

## 1. INTRODUCCIÓN

“El sistema no es una palabra clave para la totalidad; es una palabra raíz para la complejidad”. (E. Morín)

### 1.1. Consideraciones iniciales

Desde la década de los 90, el desarrollo sostenible ha recibido mucha atención a nivel mundial. Mantener una oferta de recursos hídricos sustentable implica evitar el uso excesivo de las aguas superficiales; la extracción controlada de aguas subterráneas a fin de no causar disminución en el nivel de éstas, y el tratamiento y uso eficiente de las aguas residuales (DOWNS et al., 2000; SHIKLOMANOV, 2000; VÖRÖSMARTY et al., 2000).

Alcanzar el objetivo de mantener una oferta sostenible de los recursos hídricos, debe de ser uno de los grandes desafíos actuales de la humanidad.

Procurar la sustentabilidad en el empleo de los recursos hídricos es una tarea importante y compleja. De acuerdo con la *World Comission on Environment and Development* (WCED, 1987), el desarrollo sostenible es un proceso en el cual

la economía, el medio ambiente y los ecosistemas de una región cambian en armonía y de una forma que mejora con el tiempo. Para lograr esto, es necesario que los planes de desarrollo de los países contemplen políticas relativas al uso y manejo de los recursos naturales, destacando la importancia de los recursos hídricos en el desarrollo socioeconómico de las regiones donde estos planes serán aplicados (ASCE, 1985; WORLD BANK, 1993; ENVIRONMENT CANADA, 1993).

Muchos países en el mundo se enfrentan al desafío que implica la creciente demanda de agua limpia por un lado y por otro la contaminación en ascenso que están sufriendo las fuentes de agua. Actualmente 1.1 billones de personas en los países en desarrollo no tienen acceso a agua potable. Además 2.4 billones carecen de servicios sanitarios adecuados (WHO, 2000). Cada año mueren 4 millones de niños afectados por enfermedades relacionadas al consumo de agua de pésima calidad higiénica (FALKENMARK, 1989; HINRICHSEN et al., 1997; VAKKILAINEN; VARIS, 1999; AL-RASHED; SHERIF, 2000; COSGROVE; RIJSBERMAN, 2000).

En ocasión del día mundial del agua en el año 2000, el Secretario General de la Organización Meteorológica Mundial señalaba que "...el agua en el siglo XXI será escasa, estará amenazada por la contaminación creciente, habrá severos períodos de inundaciones y sequías crecientes; por lo que el agua debe de ser un motivo de creciente preocupación para todos" (SIMONOVIC, 2002).

Brasil tiene una de las mayores reservas de agua dulce del mundo, cerca de un 8% de todo el monto disponible, un monto de esa agua es usado para el consumo humano y animal, para la generación de energía y el riego. Sin embargo, gran parte de los manantiales que posee el país, aproximadamente un 80%, están localizados en la región amazónica, donde habita solamente un 5% de la población (FREIRE, 2001). Los problemas relacionados a la distribución espacial del agua representan, por lo tanto, grandes desafíos para cierto sector de la población brasileña.

En la última década, los problemas de escasez y contaminación del agua han demandado del gobierno federal, estatal y municipal, así como de la sociedad

civil, una mayor atención con respecto a éste asunto. En la década de los años 80, comenzaron a evidenciarse problemas localizados de escasez de agua limpia. Las poblaciones del área rural percibían que el recurso estaba escaseando por la disminución en el número y en el volumen de las nacientes y de las aguas de los ríos. Esto llevo a conflictos acerca del uso del agua para el consumo, el riego y la generación de energía. Algunas ciudades sufrieron falta de abastecimiento temporal de agua, tornando su disponibilidad un problema serio hacia finales de la década de los años 90 (ORTEGA; TROMBIN, 2000; RIBEIRO et al., 2000).

Derivado de los acuerdos tomados en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, conocida como Rio-92, Brasil viene implementando mecanismos innovadores para el uso y la gestión de los recursos hídricos. En 1997, el Congreso Brasileño reglamentó el consumo y la conservación de los recursos hídricos, a través del Código del Agua no. 9,433. Esta ley considera el recurso hídrico como un *itém* vulnerable, finito, escaso en cantidad y calidad, y que debido a su escasez, se transforma en un bien económico por el cual debe de pagarse (FREIRE, 2001; PETRELLA, 2001; GESUALDI, 2001).

En el año 2000, se creó la Agencia Nacional del Agua (ANA), con el objetivo de implementar la Política Nacional de Recursos Hídricos. Bajo la misma perspectiva, se vienen instaurando los Comités y los Planos Directores de Cuencas Hidrográficas.

Es importante destacar que la problemática del agua, de acuerdo con Ribeiro et al. (2000), tiene diferentes dimensiones:

- La dificultad del acceso al agua es un problema sentido y manifestado principalmente por las poblaciones rurales que, en su gran mayoría, son consumidores directos, contrariamente a lo que sucede con las poblaciones de las áreas urbanas, que consumen ese recurso a través de empresas distribuidoras. Los campesinos también perciben de forma más directa lo que sucede con las nacientes, con los ríos y con los recursos naturales. Asimismo son quienes sufren directamente los impactos. Por eso, aumenta su preocupación con respecto a la disponibilidad del recurso en el futuro;

- La problemática del agua es visualizada de forma diferenciada de acuerdo al nivel de renta de las personas. Los de mayor poder adquisitivo tienen como diversificar su acceso al agua, de forma privada. Sin embargo los más pobres, en la mayoría de las veces, están sujetos a la escasez tanto en la cantidad como en la cualidad del recurso, así como a acatar lo que indican las políticas públicas;
- La escasez de agua es percibida de forma diferente, de acuerdo con la escala de consumo. Los grandes consumidores la entienden como un negocio; mientras que los pequeños consumidores, la ven como una dádiva de la naturaleza, un bien común y un derecho natural;
- Los problemas del agua son evidenciados de diferentes formas en una misma región o localidad, tanto desde el punto de vista cualitativo así como cuantitativo;
- Es posible afirmar que el agua es un elemento esencial para la vida en la tierra; de ahí deriva su importancia y la preocupación creciente de la sociedad, en general, por su conservación y uso adecuado.

Teniendo en consideración lo anteriormente expuesto, se puede concluir que el problema del agua es extremadamente complejo. Son muchas las perspectivas, intereses, percepciones y alternativas de uso de los recursos hídricos, debido a la diversidad de agentes, posiciones, rentas, prioridades y localizaciones.

Por lo que se hace necesario crear estructuras de manejo de dichos recursos, que garanticen la sostenibilidad del uso del agua. El objetivo es establecer un sistema de derechos de uso del recurso, con el fin de evidenciar su valor económico y, así, estimular su uso racional y promover la responsabilidad de los usuarios.

En este sentido, la investigación en esta área, se vuelve necesaria con el propósito de dar subsidios a los formuladores de estrategias y políticas, a los tomadores de decisión y a los demandantes del recurso, para tornar eficiente el uso del agua y asegurar su sostenibilidad.

## **1.2. El problema y su importancia**

En la presente investigación usamos un modelo de dinámica de sistemas para analizar la sostenibilidad de los recursos hídricos en el municipio de São Miguel do Anta, localizado en la microregión de Viçosa, Zona da Mata, Minas Gerais.

La demanda de recursos hídricos, en el citado municipio, viene aumentando en los últimos años, debido por un lado al crecimiento de la agricultura y la agroindustria, por la implementación del Programa Nacional de Fortalecimiento da Agricultura Familiar (PRONAF), que ha beneficiado con financiamientos a los productores del lugar. Por otro lado, al crecimiento de la población.

Este Programa surge en Brasil en el año de 1996, se creó gracias a una iniciativa del Gobierno Federal, a través del Decreto Presidencial no. 1,946 del 28 de febrero del referido año. Tiene como propósito principal, crear condiciones que posibiliten el incremento de la capacidad productiva, la generación de empleos y de rentas a fin de mejorar la calidad de vida de los agricultores familiares (PRONAF, 2005).

Esto se logra vía el financiamiento de costos de operaciones, y de inversiones de los agricultores familiares, extractivistas, acuicultores y pescadores artesanales. Se contemplan además obras de infraestructura municipales, capacitación y especialización de técnicos y agricultores familiares, investigación agropecuaria, programas de extensión rural y apoyo a las comunidades indígenas.

Además de financiar actividades agropecuarias tradicionales, como las de costos de operaciones e inversiones, el PRONAF ofrece las líneas especiales “Agregar” y “Coletivo” que tienen mayor participación en el fortalecimiento de programas agroindustriales, artesanías y turismo rural. Coletivo es un tipo de financiamiento destinado a asociaciones, cooperativas, u otras personas jurídicas compuestas solo por beneficiarios del PRONAF. El valor máximo del financiamiento es de R\$ 200,000 con hasta un máximo de 35% para capital de giro.

En la línea Agregar, el financiamiento se destina a proyectos individuales o colectivos, de personas físicas o jurídicas, para inversiones que pueden incluir infraestructura, que procuren el beneficio, procesamiento, y comercialización de la producción agropecuaria o de productos artesanales y la explotación del turismo rural. Teniendo como límite R\$15,000 para préstamos individuales y de R\$600,000 para préstamos colectivos.

El período de pago en ambos casos es de ocho años, con cinco de gracia. La tasa de interés es del 4% anual, y existe un bono de puntualidad del 25% sobre la tasa de interés de la cuota, que sea pagada de forma integral al vencimiento.

El PRONAF se ha convertido, en el instrumento principal de la política pública, para el apoyo de los agricultores familiares. La importancia que tiene para mejorar las condiciones de vida de este sector de la sociedad, es incuestionable. Ha venido beneficiando a los productores del lugar, a través del otorgamiento de las líneas de crédito antes señaladas, y que están siendo destinados al incremento de la producción agrícola y pecuaria, así como, al fomento de la agroindustria de la zona.

De acuerdo con datos del Pronaf (2005), en el año 2002, fueron destinados cerca de R\$187,000 que beneficiaron a 74 productores agrícolas. En 2003, esta cifra fue de aproximadamente R\$736,000 y 281 beneficiarios. En el año 2004 se otorgaron recursos por un monto de R\$862,000 y 300 fueron los favorecidos. Para 2005, se estima el otorgamiento de más de R\$1, 000,000 destinados a aproximadamente 350 productores, para continuar el fortalecimiento de la agricultura familiar en el municipio.

El apoyo financiero antes mencionado, ha estimulado principalmente, actividades productivas de carácter agrícola en la región, entre las que destacan la producción de café, la avicultura, la suinocultura y la producción de hortalizas. Esto ha ocasionado incrementos en la producción y, en consecuencia, una mayor demanda de insumos, entre ellos el agua. Por otro lado, el aumento en las rentas de las familias posibilita un incremento en la calidad de vida de las personas, lo que también incide en el aumento de la demanda de agua.

Aunado a lo anterior, y tomando en consideración el crecimiento natural de la población, se espera por tanto, un incremento substancial en la demanda de este recurso, por lo que podría generarse algún grado de escasez del mismo en el futuro. Los programas de desarrollo económico, como es el caso del PRONAF, son formulados para mejorar en términos generales las condiciones sociales y económicas de vida de las poblaciones donde éstos se aplican, por lo que se vuelve importante determinar el impacto sobre los recursos naturales que su implementación conllevará.

Las sociedades van teniendo conciencia de la importancia del manejo sostenible de los recursos naturales, a medida que los problemas en ésta área aumentan. A fin de garantizar su existencia para las generaciones venideras, por lo tanto, se hace indispensable hacer previsiones sobre los impactos que el desarrollo económico causa al medio ambiente a fin de diseñar e instrumentalizar políticas de apoyo, para minimizar los impactos negativos y potencializar los positivos. Estas previsiones también brindan informaciones que, nos ayudan a escoger la alternativa de desarrollo que lleve de forma más eficiente al manejo sostenible de los recursos naturales.

El llamado Modelo Agua de São Miguel do Anta (MASMA) se desarrolló para abordar una variedad de escenarios de oferta y demanda de agua para el área de estudio. El MASMA es un modelo de carácter interactivo, basado en una herramienta computacional. Se ha desarrollado usando el *software* Stella 8.0 y puede ser empleado para identificar las soluciones más adecuadas a los requerimientos hídricos, relativos al desarrollo local sostenible, a los aspectos ambientales y a las necesidades ecológicas en el municipio de referencia.

A fin de estimar futuras demandas y ofertas de recursos hídricos, los usuarios pueden entender como varias suposiciones actuales afectan el desempeño del sistema hídrico durante un período de 32 años, escogido como horizonte de planeación, y que esta enmarcado dentro del período de tiempo de 25 a 30 años, que es normalmente empleado, para la implementación de la mayoría de planes de desarrollo socio-económico (SIMONOVIC; FAHMY, 2000).

Las preguntas centrales que dirigen éste trabajo son: ¿Qué cantidad de agua necesitará el municipio de São Miguel do Anta en el futuro? y ¿Cuál es la oferta de agua que permite mantener la sostenibilidad del recurso hídrico en el municipio? El modelo ha sido formulado a fin de poder determinar como responder estas preguntas, las cuales ayudarán en la evaluación de programas y proyectos que buscan promover el desarrollo sostenible en el local de estudio.

### **1.3. Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es, examinar la sostenibilidad de los recursos hídricos en el municipio de São Miguel do Anta, Minas Gerais.

Específicamente se pretende:

- a) Desarrollar un proceso de modelaje de dinámica de sistemas aplicado a los recursos hídricos, a través de la obtención de modelos mentales de especialistas y de la construcción de diagramas causales, de estoque y de flujos;
- b) Elaborar y validar un modelo matemático representativo de la oferta y demanda de agua limpia en el área de estudio; y
- c) Simular el comportamiento del sistema hídrico bajo diferentes escenarios de oferta y demanda.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Referencial teórico**

#### **2.1.1. Desarrollo sostenible**

Para Denardi et al. (2005), el concepto de desarrollo lleva construyéndose por muchos años, siendo un tema muy debatido y controvertido. Para él, éste concepto ha tenido variaciones a lo largo del tiempo. En un inicio se confundía el concepto de desarrollo con el de crecimiento económico, medido éste último a través de variables cuantitativas que expresaban el crecimiento de la economía en términos de producción y de incrementos en la productividad. Dichos conceptos reflejaban el pensamiento económico liberal de la escuela austriaca, que además veía la intervención del Estado en la economía como perjudicial, ya que interfería en el ajustamiento del mercado. Consideraba que, las leyes del mercado y el aumento de la producción, estaban por encima de los aspectos sociales y de calidad de vida de la población.

Después de la gran depresión de los años 30, surge la Teoría Keynesiana que defendía como necesario para el crecimiento económico, la intervención del Estado en la economía a corto plazo. Ésta teoría introdujo también, la concepción de que el crecimiento permitiría la promoción del desarrollo económico. Sería, por

lo tanto, necesario entender ambos conceptos de forma integrada, o sea, a medida que la economía desarrollaba la tecnología, la ciencia y las políticas mercantiles, también se debería procurar el mejoramiento de los indicadores sociales (salud, servicios básicos, seguridad, etc.) y culturales, en síntesis mejorar la calidad de vida en general, de la población de una nación como un todo.

En los primeros años de la década del 70, surgieron corrientes de pensamiento de la economía ambiental que marcaron el inicio de una nueva concepción sobre el desarrollo, conocida como desarrollo sostenible y cuyo significado todavía se encuentra en construcción. No obstante, varias son las visiones propuestas: "...desarrollo sostenible significa atender las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de atender sus propias necesidades..." (CMMAD, 1988).

Para Ehlers (1999), el desarrollo sostenible debe conciliar, en el largo plazo, el crecimiento económico y la conservación de los recursos naturales. Según Moreira (1999), ese desarrollo debe estar relacionado al uso, equilibrio y dinámica de los recursos de la biosfera en el presente y en el futuro. Romeiro (1998) agrega que, el desarrollo sostenible debe ser económicamente eficiente, ecológicamente prudente y socialmente deseable.

El desarrollo sostenible también es entendido como un proceso que se modifica de acuerdo a la dinámica de las inversiones, innovaciones y explotación de los recursos naturales. Para Sachs (2000), la sostenibilidad es un concepto dinámico que considera las necesidades crecientes de las poblaciones y tiene como base nueve dimensiones principales:

- La sostenibilidad social, vinculada a un padrón estable de crecimiento, distribución de la renta mas justa y minimización de las desigualdades sociales;
- La cultural, que busca promover la realización de cambios armónicos a los padrones culturales vigentes;
- La dimensión ecológica, relacionada al uso eficiente de los recursos existentes en los ecosistemas con un mínimo deterioro ambiental;
- La dimensión geográfica, asociada a la mala distribución poblacional en el planeta;

- La económica, ligada al flujo de inversiones públicas y privadas y al correcto uso y administración de los recursos naturales;
- La sostenibilidad ambiental, que permitiría la autodepuración de los ecosistemas naturales;
- La territorial, que busca la eliminación de las diferencias interregionales, la igualdad en la inversión pública y la conservación de la biodiversidad a través del ecodesarrollo;
- La sostenibilidad de las políticas nacionales, que pasa por un nivel aceptable de cohesión social, democracia y capacidad institucional del Estado a fin de implementar el proyecto nacional; y
- Con respecto a las políticas internacionales, la sostenibilidad pasa por la garantía de paz en el mundo, asegurada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), por el control del sistema financiero internacional, por la cooperación científica y por la reducción de las diferencias norte-sur.

### **2.1.2. Recursos hídricos: conceptos generales**

Los recursos hídricos ocupan un lugar particular dentro del contexto de recursos naturales existentes en el planeta, pues el agua es vital para la vida en la tierra. Es un componente importante del medio ambiente y un elemento esencial para la vida humana. El agua se torna fundamental para la calidad humana de vida y para el desarrollo social y económico de los pueblos (SHIKLOMANOV, 2000).

En las últimas décadas se ha ido percibiendo que, los recursos naturales y en especial el agua limpia, son limitados y debido a esto deben ser empleados de forma racional y eficiente, procurando con ello el desarrollo sostenible de las sociedades humanas. Lo anteriormente señalado implica satisfacer las demandas presentes y futuras, causando un mínimo de perjuicio al medio ambiente.

De acuerdo a estimativas de Korzun (1974 e 1978) la hidrosfera terrestre contiene aproximadamente 1,386 millones de kilómetros cúbicos (km<sup>3</sup>) de agua. Sin embargo, el 97.5 % de este total es agua salada, restando sólo un 2.5% de agua dulce; de este monto el 68.7% se encuentra en forma de hielo y nieve en las

regiones árticas, antárticas y montañosas. Se considera que el 29.9% del agua dulce esta en aguas subterráneas, quedando solo el 1.4% del total de ésta agua concentrada en lagos, reservorios y ríos. Estos últimos, constituyen las fuentes más accesibles para satisfacer las necesidades económicas de los seres humanos; siendo además, de gran importancia para mantener los ecosistemas acuáticos. Los valores antes mencionados, conforman lo que se conoce como recursos hídricos estáticos que están guardados en la hidrosfera.

El monto total de agua en la hidrosfera se compone del agua en estado líquido, sólido y gaseoso que se encuentra en la atmósfera, en la superficie de la tierra y en forma subterránea hasta una profundidad de 2,000 metros.

En el largo plazo, solo se consideran los montos promedio, que contienen los cuerpos de agua, acuíferos y la atmósfera. A corto plazo (años, estaciones, meses), los montos almacenados en la hidrosfera se intercambian constantemente entre el océano, la tierra y la atmósfera. Este intercambio se conoce como el ciclo hidrológico global (SHIKLOMANOV, 2000).

El agua de los ríos es de gran importancia para el ciclo hidrológico global y para abastecer a la humanidad de agua dulce. Con respecto a este ciclo, el período total de recarga es de 2,500 años para las aguas de los océanos; 10,000 años para el *permafrost* y el hielo polar y 1,500 años para las aguas subterráneas y montañas glaciares, ya el agua almacenada en lagos es completamente repuesta en 17 años y en los ríos en un período de 16 días (KORZUN, 1974 e 1978).

En términos de manejo hidrológico y de administración del agua, son usados comúnmente dos conceptos para abordar el estudio de este recurso en una región: el almacenamiento estático del agua fresca y el de recursos hídricos renovables.

El primero, considera normalmente al agua dulce que lleva un período de muchos años o décadas para ser repuesta completamente (grandes lagos, agua subterránea, glaciares, etc.), su uso intensivo resulta inevitablemente, en disminución del recurso con consecuencias ecológicas desfavorables, afectándose también los equilibrios naturales que han sido, logrados a través de los siglos y cuya recuperación toma decenas o centenas de años.

El segundo concepto incluye el agua que circula anualmente en la tierra. El volumen de agua renovable normalmente se mide en volumen por unidad de tiempo ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ,  $\text{km}^3\text{año}^{-1}$ ) principalmente compuesto por el escurrimiento regional y por el flujo de agua subterránea que cae en la red de los ríos. En los recursos renovables también se incluye el agua que se repone anualmente en la parte superficial del acuífero subterráneo que no es drenada por el sistema del río (SHIKLOMANOV, 2000).

En el proceso de circulación del agua, tanto el caudal del río así como la calidad del agua son repuestos. Es importante destacar que si se disminuye la contaminación de los ríos con el tiempo el agua va recobrando su pureza natural.

El caudal anual de agua que se repone en los ríos es el componente más importante del ciclo hidrológico y ejerce un gran efecto en los ecosistemas de la superficie terrestre así como en el desarrollo socioeconómico de los pueblos. A través de los ríos que se encuentran esparcidos por el planeta, es que se obtiene la mayor parte del agua usada en el mundo. En la práctica, la cantidad de agua de los ríos sirve para determinar la disponibilidad o déficit de agua en una región.

Para medir los recursos hídricos renovables es necesario determinar las fuentes de agua espaciales y temporales (de forma anual o por períodos anuales), la distribución del caudal y la calidad del agua; con esto se establecen las bases para determinar sus posibilidades de uso y forma de preservación.

Descubrir los factores antrópicos que afectan cambios en los parámetros de cantidad y calidad del agua de los ríos y el análisis de datos sobre usos del agua, son aspectos importantes para medir los recursos hídricos. Ésta información es necesaria para el proceso de toma de decisiones, que conlleven a un óptimo uso de los recursos hídricos tanto en el presente, como en el futuro. Es importante que este tipo de análisis sea realizado de forma regional ya que sirve como prerrequisito en lo que concierne a la utilización y manejo de los recursos hídricos, y en el desarrollo de medidas de protección de los mismos, contra la sobreexplotación y la contaminación humana.

### 2.1.3. Estudios sobre recursos hídricos

La preocupación sobre los recursos hídricos, ha llevado a los profesionales, diseñadores de políticas, científicos y académicos que tienen ésta temática como su principal materia de estudio, a conjuntar esfuerzos, para producir orientaciones que contribuyan en el correcto abordaje de la problemática del agua. Uno de los pasos importantes ha sido, tratar de estimar los recursos hídricos existentes en el planeta y sus diferentes usos con el objetivo de tener nociones sobre su futuro. Son referencias en este tema los estudios de Baumgartner y Reichel (1975), L'Vovich, (1979), Shiklomanov (1997), Maidment et al. (1998), y Gleick (1993, 1998, 2000). Metodológicamente hablando, los estudios antes señalados han hecho estimaciones cuantitativas de las características de los recursos hídricos renovables, utilizando datos observados sobre los caudales de los ríos.

Las características cuantitativas del uso del agua en escala global son determinadas usando diversos factores tales como: nivel de desarrollo socioeconómico, población y aspectos fisiográficos que incluyen factores climáticos. Las combinaciones de estos factores determinan el volumen y características de usos del agua, su dinámica y tendencia futura. Sin embargo, las relaciones entre factores importantes no son evidenciadas de forma explícita, perdiéndose de vista la importancia de la dinámica temporal y espacial, por lo que las predicciones futuras sobre el uso del agua y el balance entre oferta y demanda de este recurso, se torna difícil y sujeto a un margen de error grande (SIMONOVIC, 2002).

Entre otros esfuerzos realizados, cabe destacar los siguientes modelos de recursos hídricos que toman en cuenta solamente, las interacciones dinámicas que existen entre parámetros cuantitativos de los recursos hídricos disponibles y los usos del agua: a) *The Policy Dialogue Model* (PODIUM), desarrollado por el *Internacional Water Management Institute* (CGIAR, 2005); b) *The Internacional Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade* (IMPACT), elaborado por el *International Food Policy Research Institute* (IFPRI, 2005); c) el

modelo POLESTAR desarrollado en el *Stockholm Environment Institute* (SEIB, 2005); d) *Water Evaluation and Planning System* (WEAP) desarrollado por el *Stockholm Environment Institute* y por el *Boston Tellus Institute* (TELLUS, 2005); e) WATERGAP realizado por la Universidad de Kassel (USF, 2005), y por último, el modelo f) *Tool to Assess Regional and Global Environmental and Health Targets for Sustainability* (TARGETS), creado por el *Netherlands National Institute of Public Health and the Environment* (RIVM, 2005).

Según Simonovic (2002), en cada uno de los modelos anteriormente citados, se aborda el problema de los recursos hídricos bajo diferentes grados de detalle. Las relaciones de retroalimentación dinámica entre las características físicas de la oferta de agua disponible y el crecimiento poblacional, desarrollo de la agricultura e industria, desarrollo tecnológico y el empleo de otros recursos naturales, no son reflejados de forma explícita; por lo que la utilidad de dichos modelos para entender el impacto del agua en el desarrollo a gran escala es un poco limitado. No obstante a esta deficiencia, dichos modelos han recibido atención de muchos investigadores (MEADOWS et al., 1982), culminando con el trabajo de Jay W. Forrester y sus colaboradores de la *Sloan School of Management* del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT).

A través de los libros *World Dynamics* (FORRESTER, 1971 y 1973) y de *Beyond the Limits* (MEADOWS et al., 1992) se dirigió mucha atención al modelaje global del planeta a través del enfoque de dinámica de sistemas, que permite estudiar el futuro bajo las condiciones de crecimiento actuales. Simulaciones del futuro han sido hechas usando el modelo dinámico llamado *World3* (MEADOWS et al., 1992). No obstante en estos estudios se da poca atención a los recursos hídricos argumentándose principalmente que el agua es un recurso regional no global (MEADOWS et al., 1992). Esta afirmación se contrapone a la de la mayoría de la comunidad internacional que trabaja con recursos hídricos, que enfatiza la importancia de las diferencias regionales para resolver conflictos concernientes al agua, pero que, claramente apuntan hacia una crisis global (COSGROVE; RIJBERSMAN, 2000).

Es relevante señalar que los enfoques tradicionales para modelar el balance de recursos hídricos, no capturan el carácter dinámico de las variables principales de los modelos y su efecto sobre el uso futuro del agua no es reflejado. Mientras que, el enfoque de dinámica de sistemas proporciona una nueva manera de modelar la dinámica futura de sistemas complejos, por lo que este enfoque es usado en el modelaje del desarrollo mundial por Forrester (1971, 1973) y Meadows et al. (1974), y a nivel regional por Simonovic et al. (1997) y Simonovic y Fahmy (1999).

#### **2.1.4. El pensamiento sistémico**

En este trabajo adoptamos el pensamiento sistémico como marco teórico de referencia para abordar el problema de estudio.

El enfoque sistémico es una disciplina preocupada por ver la totalidad en las estructuras que subyacen en los problemas de análisis. Observa las interrelaciones existentes entre las variables que representan el problema, se preocupa más por esto que por analizar las variables en forma aislada, procura patrones de cambio más que representaciones estáticas, analiza procesos en vez de objetos. Según Simonovic (2000), la presuposición básica del pensamiento sistémico es el comportamiento dinámico que presenta un sistema y que es reproducido por su propia estructura.

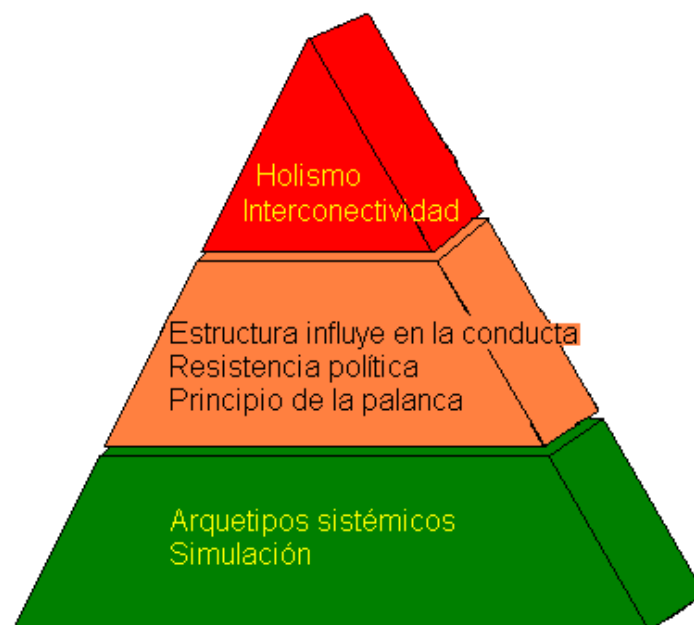
El pensamiento sistémico es una forma de aprehender la realidad, que nos enseña a articular las complejas interconexiones de causalidades circulares que nos rodean en el mundo en que vivimos, y permite además, que evaluemos las decisiones que tomamos. Engloba una diversa y heterogénea variedad de métodos, herramientas y principios, destinados a examinar la interrelación de fuerzas que constituyen un proceso común ya que todos los sistemas se comportan bajo ciertos principios universales.

El pensamiento sistémico es un marco conceptual, un cuerpo de conocimientos y herramientas, desarrollado para que los patrones totales resulten más claros y para ayudarnos a cambiarlos. Los diagramas causales, los arquetipos

y los modelos son herramientas utilizados por éste pensamiento, que nos permiten hablar con mayor claridad de las interrelaciones que se basan en el concepto teórico de los procesos de realimentación (SENGE, 1997).

Puede decirse que el pensamiento sistémico es una disciplina preocupada por ver totalidades, para así poder observar las estructuras internas subyacentes en situaciones complejas. La clave del pensamiento sistémico es la palanca, que lo constituye el punto de apoyo donde las políticas y modificaciones en la estructura conducen a mejoras significativas y duraderas en un sistema. Los arquetipos sistémicos, que son las estructuras que se repiten continuamente, nos ayudan a descifrar éstas y a encontrar el punto de apalancamiento.

Las conceptualizaciones sistémicas nos ayudan a entender como abordar problemas complejos que afectan o envuelven personas. Dentro del análisis sistémico encontramos herramientas que facilitan encontrar soluciones buenas y creativas para las problemáticas, recalcando que no siempre esta orientado a buscar la mejor solución. La Figura 1 muestra la esencia, principios y prácticas del pensamiento sistémico.



Fuente: Senge (1995).

Figura 1 – Esencias, principios y prácticas del pensamiento sistémico.

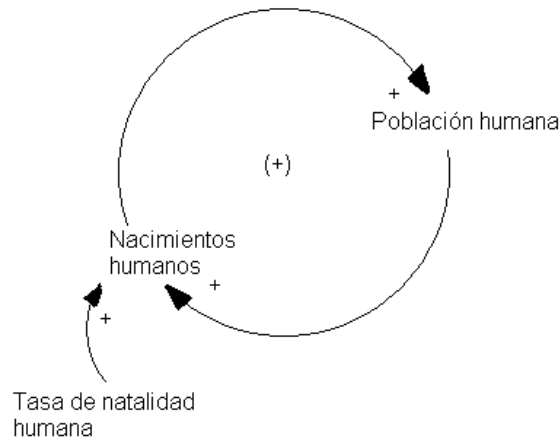
Senge (1990) sostiene que la falta humana de capacidad para entender y analizar sistemas complejos genera muchos de los problemas que suceden en la realidad. Para superar este obstáculo, él propone, el uso de las técnicas del pensamiento sistémico.

Estas técnicas están basadas en modelos mentales que reflejan en general, las creencias, teorías, conocimientos y las presuposiciones que cada quien tiene referentes a como funcionan los sistemas en la realidad; y es, a través de la dinámica de sistemas (que es una forma de pensamiento sistémico), que dichos modelos mentales son convertidos en procesos computarizados, capaces de derivar, las consecuencias de la interacción entre las diferentes partes del sistema, lo que muchas veces escapa a nuestra comprensión.

Esos modelos a su vez se corrigen y perfeccionan mediante un proceso de aprendizaje (ARACIL, 1986). Por dinámica de sistemas entiéndese entonces, una metodología de simulación basada en computación. Richardson (1981) define genéricamente esta metodología afirmando que esta diseñada para entender problemas muy complejos, caracterizados por ser dinámicos, en el sentido de que incluyen cantidades que varían a lo largo del tiempo y, por existir en ellos, *feedback* o realimentación. Es decir, cuando la situación en que se encuentra un sistema da lugar a una decisión cuyo resultado es una acción que a su vez influye en la misma y en decisiones futuras.

Para Aracil (1986), la característica principal de la dinámica de sistemas es que la estructura del modelo no está definida con anterioridad. La establece el constructor del mismo, y su principal objetivo es evidenciar el funcionamiento y desempeño del sistema, a través del tiempo.

Para representar los mapas mentales anteriormente señalados son empleados los diagramas causales (Figura 2), constituidos por relaciones de causa y efecto entre las variables principales del sistema; comprenden además las estructuras de retroalimentación o *feedback* responsables por la dinámica del sistema.



Fuente: Ford (1999).

Figura 2 – Ejemplo de un diagrama causal.

Las flechas muestran la dirección de causalidad, los signos indican si los efectos van en el mismo sentido (+), o se contraponen (-). Secuencialmente los círculos, indican la ocurrencia de retroalimentación, pudiendo ésta ser de refuerzo (+) o de balance (-). El primer caso es responsable por ciclos de crecimiento o decrecimiento; mientras que el segundo busca mantener la inercia del sistema. Avellar (2002) señala que el aporte principal de los diagramas, es permitir discusiones entre los individuos referentes a opiniones que se contraponen acerca de determinados problemas, lo que posibilita detectar diferencias, mejorando de esa forma la comprensión de la realidad.

Según Lourenzani (2001), éste método procura visualizar las principales relaciones que existen entre los elementos que componen un sistema, ayudando también a descubrir soluciones de largo plazo, permitiendo además diferenciar en los problemas lo que son las causas de lo que son los síntomas.

El proceso de modelaje que sigue los pasos del pensamiento sistémico se vuelve un instrumento de gran potencial, tanto para la representación como para el entendimiento de sistemas complejos y sus respectivas interrelaciones.

Para definir con precisión, los componentes de un sistema, y el nivel en que este es afectado se usan técnicas de modelaje matemática presentes en los

modelos computacionales, elaborados en base a los principios de la dinámica de sistemas.

## **2.2. Modelo analítico**

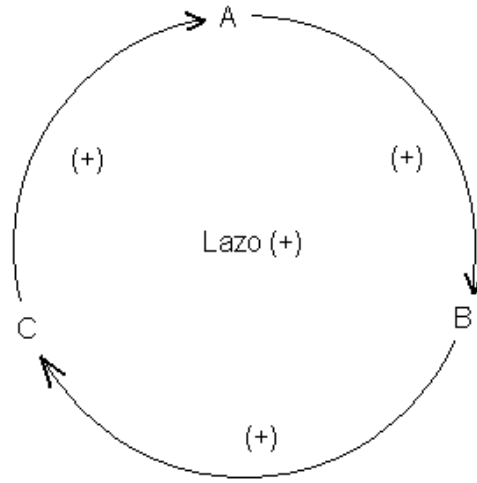
La metodología usada en el desarrollo del MASMA, es la dinámica de sistemas (modelaje y simulación), específicamente diseñada para modelar y analizar sistemas socio-económicos complejos. Este enfoque es usado en muchas áreas incluyendo las que tienen que ver con el medio ambiente sostenible global (FORRESTER, 1971; MEADOWS et al., 1994), aspectos sobre desarrollo sostenible regional (BACH; SAEED, 1992; SAEED, 1994), manejo ambiental (MASHAYEKHI, 1993), modelaje ecológica (WU et al., 1993) y planeamiento de recursos hídricos (FORD, 1996).

La metodología se centra en entender los procesos físicos, los flujos de información y las políticas administrativas que interactúan para generar el comportamiento dinámico de las variables de interés. La totalidad de las relaciones entre esos componentes es lo que llamamos de estructura del sistema. Podemos decir entonces, que la estructura del sistema que opera a través del tiempo, genera sus propios patrones de comportamiento dinámico (como crecimiento exponencial o decreciente, colapso o fluctuaciones, crecimiento en forma de s, etc.). El propósito clásico de un estudio de dinámica de sistemas es entender como y porque se genera la dinámica y encontrar las políticas para mejorar la situación. Estas políticas son de largo plazo, tomadas a nivel macro por los encargados o responsables del manejo de los recursos.

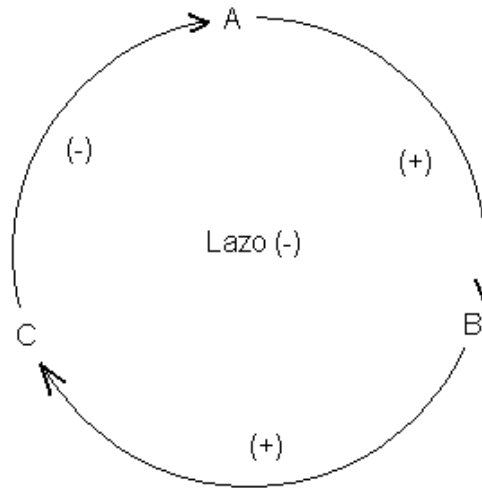
### **2.2.1. Principios de la dinámica de sistemas**

La dinámica de sistemas esta basada en tres principios fundamentales, que son: existencia de realimentación, inexistencia de linealidad entre las variables y la existencia de retrasos en las relaciones entre variables.

a) La existencia de lazos de realimentación o *feedbacks*. Este concepto es básico para entender el comportamiento dinámico de un sistema. De acuerdo con FORRESTER (1961), existe realimentación cuando el medio o situación en que está un sistema, lleva a una decisión que resulta en una acción que a su vez, influye en el citado medio y, por ende, en las decisiones futuras. Richardson (1981), de forma más simple afirma que la retroalimentación es la transmisión y retorno de la información. Esto produce, en términos generales dos tipos de sistemas: abiertos y cerrados. Los abiertos se distinguen porque los resultados obtenidos no influyen sobre los insumos que los produjeron, o sea que, en estos sistemas, no existe retroalimentación. Mientras que, en los sistemas cerrados, los resultados influyen en los insumos que los generaron y que a la vez, volverán a tener influencia sobre los resultados, existiendo por tanto, retroalimentación. Las relaciones entre las variables se reflejan en los lazos de realimentación, éstos representan cadenas cerradas de relaciones causales. Todo modelo está constituido por uno o varios lazos de realimentación que interactúan entre sí, y posibilitan explicar, el comportamiento de variables, que no, serían justificadas a través de una relación lineal. Existen dos tipos de lazos de realimentación: los de realimentación positiva o de refuerzo y los de realimentación negativa o de compensación. Los primeros se caracterizan por que la variación de un elemento se difunde a lo largo del lazo, reforzando la variación inicial, y generan un crecimiento exponencial del sistema. En estos lazos, todo movimiento es amplificado produciendo más movimiento en la misma dirección, tal como se muestra en la Figura 3a. Los lazos de realimentación negativa son aquellos en los que la variación en un elemento se transmite a lo largo del lazo, de forma que determina una variación, que contrarresta la variación original, buscando así la estabilidad del sistema (Figura 3b).



(a)



(b)

Fuente: SENGE (1995).

Figura 3 – Lazo de realimentación: (a) positiva y (b) negativa.

b) La existencia de no linealidad entre las variables. La clásica visión lineal, es caracterizada por fijar su atención en las relaciones causa-efecto entre las variables. Diferentemente, la dinámica de sistemas conlleva una visión holística de la forma en que están relacionadas las variables. Desde la perspectiva sistémica lo que se busca es tener una visión global de la realidad, analizándola en su conjunto; es decir, como un todo, buscando con ello tomar decisiones y establecer políticas que tomen en cuenta la influencia de unas variables sobre otras.

c) La existencia de retrasos en las relaciones entre variables. Al trabajar con sistemas dinámicos, es importante recordar que pueden producirse retrasos materiales y/o de información. La ocurrencia de retrasos, demoras, o retardos implica que los efectos de las decisiones tomadas no se den de manera inmediata, lo que complica la detección de las relaciones causa-efecto, pues los síntomas frecuentemente aparecerán distantes en el tiempo y en el espacio del acto que los genera (FORRESTER, 1961). Es importante señalar que los cambios siempre necesitan tiempo, sus efectos no son instantáneos. Generalmente, los efectos de las decisiones se expresan en el largo plazo, por lo que en un momento dado, nos estamos enfrentando a problemas que fueron originados por decisiones tomadas en el pasado. El tiempo se torna una cuestión fundamental al estudiar el comportamiento de un sistema dinámico, ya que su evolución se desenvuelve a lo largo del mismo. Muchas decisiones que se toman pueden ser incorrectas, y causar efectos contraproducentes si subvaluamos el período de duración del retraso, por lo que retrasos en la transmisión de las informaciones o en los flujos, deben ser cuidadosamente observados (HAMILTON, 1980).

### **2.2.2. Etapas en el modelaje de dinámica de sistemas**

Según Ford (1999), el proceso de modelaje de dinámica de sistemas abarca las siguientes etapas: a) identificación del sistema en estudio y definición del problema de forma concisa, precisa y clara; b) determinación y aislamiento de los factores que parecen interactuar en la creación de los síntomas observados en el problema; c) elaboración de los circuitos de realimentación de información de

causa-efecto llamados de diagramas causales, que unen las decisiones con la acción; d) construcción de diagramas de estoque y flujos; e) elaboración de un modelo matemático que refleje el funcionamiento real del sistema en estudio; f) estimación de los parámetros del modelo; g) simulación y contraste de los resultados con la realidad; h) realización de análisis de sensibilidad y evaluación del impacto de nuevas políticas o reglas que determinan la (s) decisión (es) a tomar.

Para Forrester (1961), los pasos para desarrollar un modelo de dinámica de sistemas deben ser: a) identificación del problema a estudiar y de las preguntas que deberán ser respondidas; b) establecer las interrelaciones entre los elementos del sistema; c) descripción del problema en lenguaje matemático; d) simulación del modelo; e) interpretación de resultados y por último, f) revisión del sistema y experimentación. Es importante no perder de vista adonde se quiere llegar con el modelo y saber cuáles caminos llevan a construir un sistema, que contenga las variables esenciales que representan la realidad que se quiere estudiar.

De forma sintética podemos resumir las etapas de desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas en tres: a) etapa de conceptualización; b) etapa de formalización; y por último, c) etapa de evaluación y explotación (simulación).

### **2.2.3. Componentes de los modelos de dinámica de sistemas**

Entre algunos de los *softwares* existentes en el mercado para transformar diagramas causales en modelos computacionales tenemos *STELLA*, *POWERSIM*, *VENSIM* y *I THINK*.

En la presente investigación, el modelo representativo del sistema de recursos hídricos del municipio bajo estudio, se elaboró con el programa *STELLA* Versión 8.0, *for Windows*, que trabaja con programación orientada a objetos, donde cada icono que se utiliza, tiene una función específica, en la conformación de estructuras o diagramas representativos del modelo matemático utilizado para representar los fenómenos deseados. La organización de los elementos tiene una asociación directa con el enfoque sistémico y la dinámica de sistemas, que



reflejan las actividades que llenan o vacían los referidos estoques. Por último, los convertidores indicados por círculos; son variables intermediarias usadas para efectuar diferentes cálculos. Además un modelo tiene conectores, representados por flechas que señalan los enlaces entre causas y efectos que ocurren al interior de la estructura del modelo. Dependiendo de las características de estos últimos se clasifican en: conector de desfasaje, de información inicial y de información. (STELLA, 2001).

En el programa que nos ocupa, los estoques son las variables que se acumulan en el sistema, y son considerados como reservas, estos son derivados de la diferencia entre los flujos de entrada y los de salida. Las variables de flujo explican las alteraciones de los estoques a través del tiempo, son descritas por ecuaciones algebraicas. Pueden presentar en los extremos una nube que indica el límite externo del modelo.

Entre las variables complementarias se encuentran las auxiliares, comúnmente usadas para efectuar manipulaciones algebraicas. Tienen valores constantes o pueden tener valores basados en otras variables y son representadas por círculos, cuyo aspecto varía de acuerdo a la función que toman. Las variables temporales, por ejemplo, tienen sus valores asociados al tiempo de simulación, pudiendo hacer cálculos en base a informaciones desfasadas en el tiempo, llamándose en ese caso variables de desfasaje. Las variables fantasmas, son copias de otras y pretenden facilitar la construcción y la visualización del modelo. Con el mismo objetivo, se usan también las variables vectoriales, que representan elementos sujetos a acciones semejantes. Las variables gráficas expresan la relación entre una variable de insumo y una de resultado. Indican de forma específica como una variable de resultado cambia en correspondencia a los cambios en la variable de insumo (STELLA, 2001).

Muchos investigadores, que trabajan con dinámica de sistemas, coinciden en que cualquier sistema del mundo real puede ser representado por dos únicas estructuras que son: los estoques y los flujos. Los estoques son variables responsables por la descripción del comportamiento del sistema, y los flujos son variables que conducen al sistema a su estado futuro.

Debido a las características de las etapas de elaboración de modelos de dinámica de sistemas, la descripción detallada del grupo de variables y sus relaciones en el MASMA objeto de éste trabajo, será presentado en el acápite 2.5 del presente estudio.

#### **2.2.4. Utilidad de la dinámica de sistemas**

La dinámica de sistemas revela a partir de simulaciones sobre el futuro como llegar al presente. Partiendo de ahí identifica que caminos llevan a la mejoría del sistema, a través de la observación de las dificultades causadas en el desempeño de éste, durante el proceso de simulación (FORRESTER, 1994).

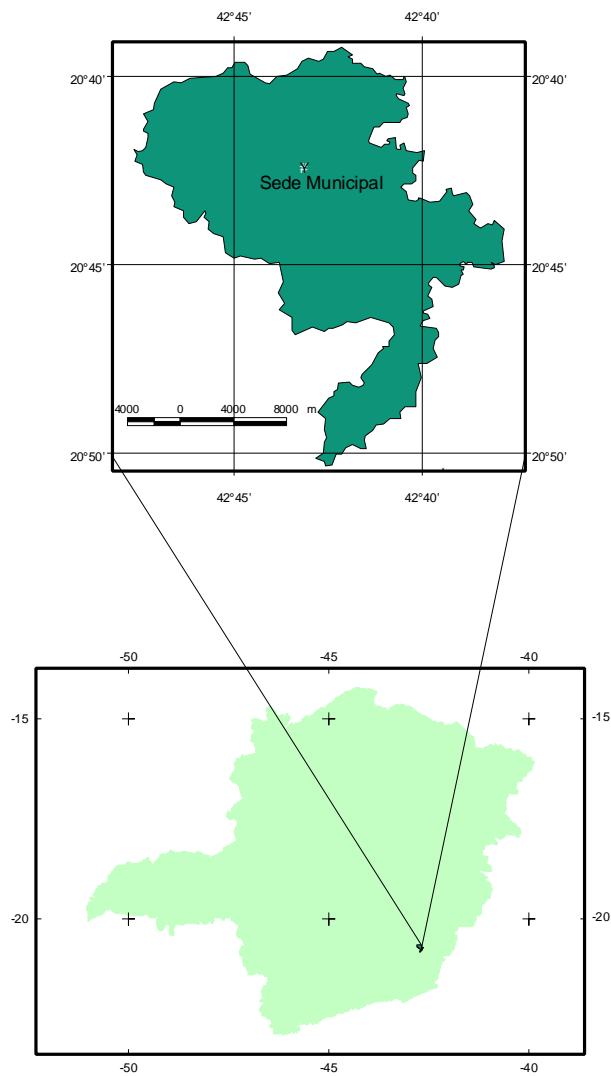
De acuerdo con Pidd (1996), los sistemas dinámicos pueden usarse tanto para reforzar la importancia de la retroalimentación que existe en los sistemas así como para comprender su comportamiento y ayudar a identificar formas más adecuadas de conducirlos. Todo esto vía el análisis de las consecuencias que generan distintas acciones.

La dinámica de sistemas es un enfoque capaz de reflejar las interdependencias que hay en un sistema, de evidenciar la existencia de decisiones alternativas y susceptibles de aplicación en un determinado aspecto. Por otra parte, permite observar si las decisiones tomadas generan consecuencias no deseadas en otras áreas del sistema en estudio. Su gran potencial reside en que se trata de un modelamiento dinámico, centrado en el tiempo, lo cual permite identificar las consecuencias que puedan producirse a corto, mediano y largo plazo de las decisiones adoptadas.

Entre otras ventajas del uso de la metodología de dinámica de sistemas, Sterman (2000), señala: a) la posibilidad de estudiar relaciones entre macro y micro estructuras, así como los efectos correspondientes sobre el sistema; b) el modelaje y solución de problemas reales que incorporan elementos físicos, biológicos y económicos; y c) la mejoría en el desempeño del sistema por la experimentación.

## 2.3. Caracterización del área de estudio

### 2.3.1. Delimitación espacial



Fuente: Elaborado por la autora en base a mapas del IBGE ([www.ibge.gov.br/servidordemapas](http://www.ibge.gov.br/servidordemapas)) – 2005.

Figura 5 – Localización del municipio de São Miguel do Anta, MG.

Para el desarrollo de la presente investigación se escogió el municipio de São Miguel do Anta, ya que en éste municipio se lleva a cabo la implementación del PRONAF y del Programa “Agronegocio Familiar”, a través de un convenio efectuado entre la Alcaldía Municipal, la Universidade Federal de Viçosa y el Banco do Brasil. Éste Programa se ha convertido en un instrumento de fomento y dinamización de las actividades productivas del lugar.

El municipio de São Miguel do Anta (Figura 5), se encuentra localizado en la microregión de Viçosa, Zona da Mata, Estado de Minas Gerais. El municipio tiene una área geográfica de 152.06 km<sup>2</sup>. Limita con los municipios de Pedra do Anta, Teixeiras, Viçosa, Cajuri, Coimbra, Ervália y Canaã. El censo demográfico del año 2000 contabiliza una población de 6,641 habitantes, la mitad de los cuales vive en la zona rural. La precipitación total media, es de 1,221 mm por año (DNM, 1992).

El curso de agua principal es el Río Casca, que pertenece a la Cuenca Hidrográfica do Río Doce. Ésta cuenca se sitúa en la región sudeste de Brasil, comprende un área de drenaje de 83,000 km<sup>2</sup>, de los cuales el 86% corresponden al Estado de Minas Gerais y 14% al Estado do Espírito Santo. En términos político-administrativos, la cuenca se compone en la actualidad por 222 municipios. Es necesario destacar, que la división geopolítica de los estados es diferente a la división de las cuencas hidrográficas. El río corre por una longitud de 853 km. (IARHA, 2005). Sin embargo, es preciso destacar, que en el presente trabajo, solo se ha considerado, la trayectoria del río que pasa por el área geográfica del municipio, sin tomar en cuenta los que sucede en el trayecto anterior y posterior del cuerpo de agua considerado.

Debido al desarrollo socio-económico de las zonas dentro de la cuenca del Río Doce, las aguas del mismo han sufrido sobreexplotación así como una significativa contaminación. El desarrollo, ha tenido una repercusión ambiental negativa, que se refleja en las precarias condiciones en las que se encuentra la citada cuenca (IARHA, 2005).

La cobertura vegetal nativa ha sido prácticamente eliminada. Es importante destacar que de acuerdo con Schneider y Wendel (2006), los bosques

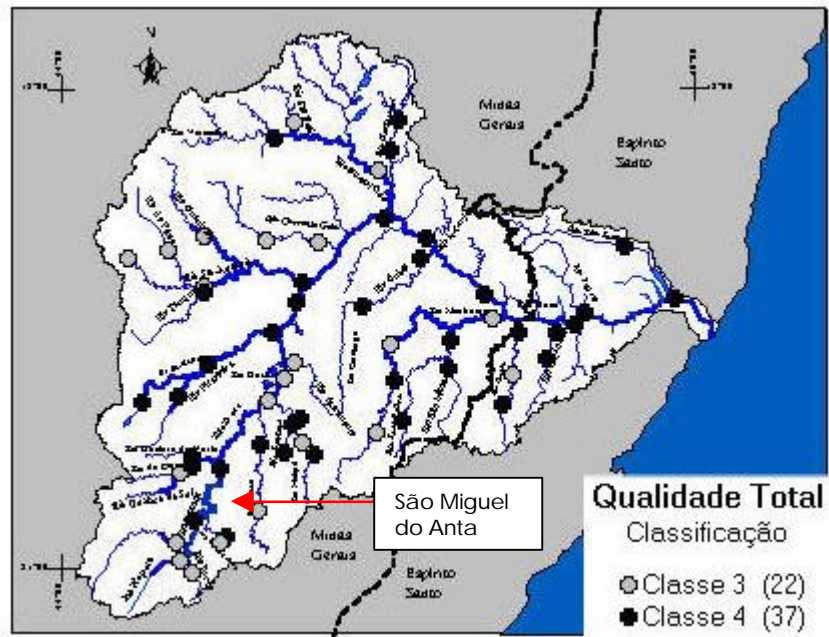
nativos son muy importantes para mantener el equilibrio ambiental y ecológico. Entre las funciones de mayor importancia que tienen, están las de protección y conservación que proporcionan a los manantiales de agua limpia.

En los bosques, el agua que proviene de la lluvia es captada por los árboles y luego se almacena en las hojas muertas que éstos han arrojado al suelo. Lo que posibilita que este agua se infiltre de forma lenta en los mantos subterráneos, abasteciendo así a los manantiales. Con la tala de árboles, toda esta dinámica es comprometida. Sin éstos el agua de lluvia desintegra y arrastra el suelo lo que ha ocasionando un alto grado de erosión, generando un aceleramiento en el proceso de asolvamiento del lecho del río.

El deterioro del cauce ha causado un incremento de las inundaciones en la época de lluvia, y la disminución gradual del cuerpo de agua, en la estación seca. Provocando deficiencias en el abastecimiento de agua en distintas ciudades. Por otra parte los contaminantes de origen doméstico, agroindustrial, pecuario y de mineración lanzados al cuerpo de agua han generado impactos negativos en la calidad de las aguas del Río Doce.

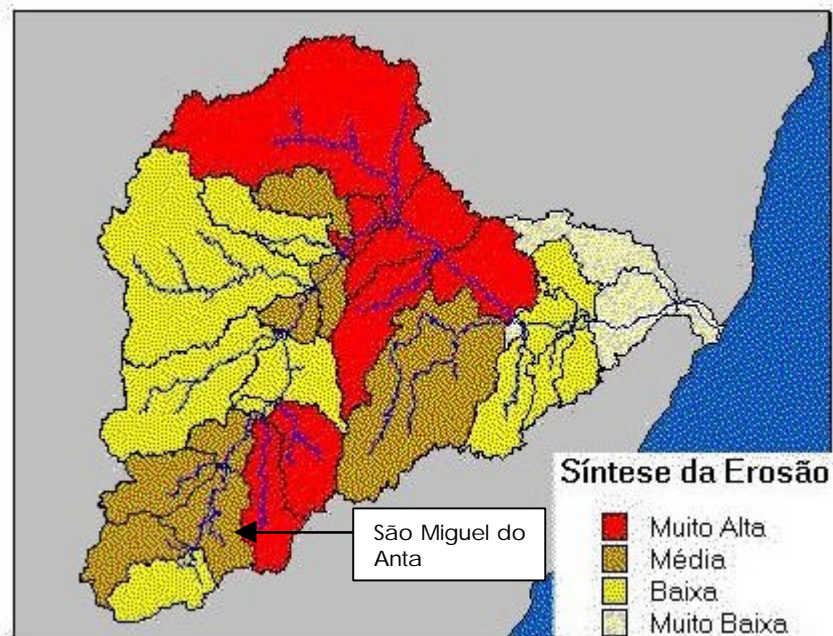
Con el objetivo de ilustrar lo anteriormente expuesto, se presentan los siguientes mapas: mapa de calidad del agua, mapa de erosión, y mapa de caudales específicos.

- a) Como se puede apreciar en la Figura 6, la calidad del agua en la zona de estudio es Clase 3 ó 4. Estos son niveles inferiores a los requeridos por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (Resolución CONAMA 020/86) (IARHA, 2005). De acuerdo con la legislación, las aguas de clase 4, no se destinan al consumo humano, aún después de tratamiento convencional.
- b) La Figura 7 refleja que la erosión en la sub-cuenca del río Casca, a la cual pertenece el municipio de São Miguel do Anta es considerada como muy alta.



Fuente: Iarha (2005).

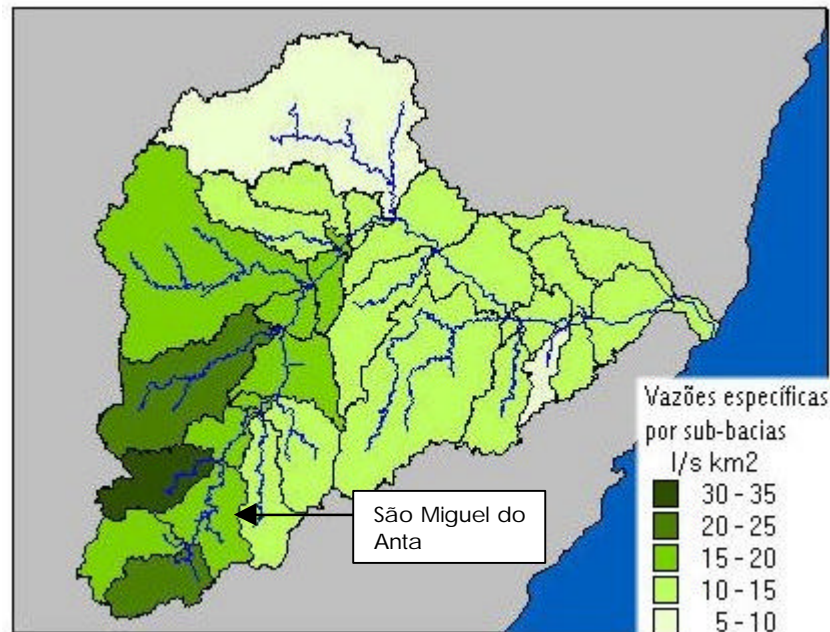
Figura 6 – Mapa de calidad del agua, cuenca del Río Doce.



Fuente: Iarha (2005).

Figura 7 – Mapa de erosión, cuenca del Río Doce.

c) Podemos observar en la Figura 8, que el municipio se encuentra dentro de una zona, de poca producción hídrica en la cuenca, teniendo un caudal específico medio de 10 a 15 L s<sup>-1</sup> km<sup>2</sup>. El caudal específico en términos conceptuales es el caudal de la cuenca dividido por su área de drenaje.



Fuente: Iarha (2005).

Figura 8 – Mapa de caudales específicos, cuenca del Río Doce.

Es importante destacar, que los datos representados en los mapas anteriores son de 1996, por lo que la situación allí descrita, puede haber empeorado a la fecha, ya que no se ha implementado ninguna estrategia para revertir esta situación.

Las actividades económicas principales del municipio son las agropecuarias. En el área agrícola, se destacan la producción de café, maíz, fríjol, caña de azúcar, arroz, frutas y hortalizas; y en la pecuaria, la avicultura y la suinocultura.

El municipio cuenta con redes básicas de energía eléctrica y servicios de agua y alcantarillado, pero no cuenta con un sistema de recolección y tratamiento de aguas negras.

## **2.4. Fuente de datos**

Los datos empleados en este trabajo son de naturaleza secundaria obtenidos a través de bancos de datos.

Los parámetros necesarios para la construcción del modelo que representa la estructura de oferta y demanda de recursos hídricos fueron calculados en base a informaciones provenientes del Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE), de la Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), de “Défluvios Superficiais em Minas Gerais” (TEIXEIRA SOUZA, 1993), y del Departamento Nacional de Meteorologia, Brasil (DNM, 1991).

## **2.5. Modelaje del sistema de recursos hídricos de São Miguel do Anta**

Estructurar y construir modelos son dos procesos eminentemente creativos. Es sin lugar a dudas un trabajo de creación, de abstracción, que implica una investigación amplia y multidisciplinaria. El modelaje, no se hace solo a través de seguir una guía, ciertos principios y pasos. Es un proceso permanente de aprendizaje y análisis, en el que cada investigador, crea el modelo más adecuado para lograr sus objetivos (STELLA, 2001).

El modelo MASMA, ha sido desarrollando de acuerdo al enfoque de dinámica de sistemas, el cual fue escogido para analizar los recursos hídricos en el municipio de São Miguel do Anta. Su construcción ha implicado una amplia investigación, y un trabajo eminentemente creativo, que ha sido estructurado por medio de las siguientes etapas: conceptualización; formalización; y por último, simulación. Ésta última incluye evaluación y explotación. Las dos primeras se presentan a continuación, la última será descrita en el acápite 3.2 del presente trabajo.

### **2.5.1. Etapa de conceptualización**

Esta etapa consistió en la familiarización con el problema de estudio, y tuvo como objetivo definir el mismo. Se buscó identificar los elementos que configuran el sistema de recursos hídricos de São Miguel do Anta, concluyendo con el establecimiento del diagrama causal.

#### **a) Enfoque sistémico de los recursos hídricos**

El MASMA representa un modelo de dinámica de sistemas. Como se señaló anteriormente, los modelos de simulación de dinámica de sistemas tienen la característica de que, las políticas que controlan el comportamiento del modelo, también conocidas como políticas de las variables, están separadas de la estructura matemática del sistema que representa el fenómeno bajo análisis.

En sistemas complejos, como es el caso de los recursos hídricos, los problemas usualmente tienen diferentes clases de variables tanto objetivas como aquellas de naturaleza más bien subjetiva (DANIELSON, 1979). Normalmente se tienen dificultades al integrar aspectos sociales con elementos de carácter técnico. En éste sentido, por mucho tiempo el uso de procedimientos de optimización ha sido muy empleado en el campo de la investigación sobre planeamiento de los recursos hídricos. Sin embargo, su adaptación a aplicaciones de tipo práctico no ha sido totalmente satisfactoria, debido a que aborda los sistemas de manera sumamente simplista (YEH, 1986; AHMAD; SIMONOVIC, 2000). Por esto, existe la necesidad de encontrar nuevas herramientas que puedan representar de forma más apropiada las complejas relaciones encontradas en los sistemas de recursos hídricos. Una de las opciones, potencialmente más prometedoras es la dinámica de sistemas, que es un enfoque basado fundamentalmente en la retroalimentación de las informaciones y en las simulaciones orientadas.

El enfoque de dinámica de sistemas es una técnica adecuada para el análisis de los recursos hídricos. Las características de flexibilidad y transparencia que le son intrínsecas, se tornan extremadamente útiles para el desarrollo de modelos de simulación de sistemas hídricos de naturaleza compleja, que contienen

variables y parámetros subjetivos. La flexibilidad permite la descomposición del problema en forma jerárquica; ya la transparencia aumenta el nivel de confianza de los diseñadores de los modelos en la operación y resultados de éstos (SIMONOVIC, 2000).

En comparación con los modelos convencionales de optimización y simulación, el enfoque de dinámica de sistemas ayuda de forma más eficiente a indicar como, diferentes cambios en los elementos básicos del sistema, afectan la dinámica del mismo en el futuro. Esto es particularmente útil en la representación de sistemas complejos sujetos a fuertes influencias de elementos económicos y/o sociales.

Procurando en la literatura sobre recursos hídricos y cuyo abordaje tenga en cuenta una óptica sistémica del manejo del agua en un análisis de largo plazo, encontramos pocos estudios englobando ambos aspectos. Entre estos, se encuentran los trabajos elaborados por Palmer et al. (2005), que tratan sobre el planeamiento de ríos y cuencas; estudios sobre planeación de los recursos hídricos en el largo plazo y análisis de políticas de Simonovic y Fahmy (1999); y trabajos sobre operaciones de reservorios de Ahmad y Simonovic (2000). Otro de estos escasos trabajos, hace énfasis en la necesidad de emplear el enfoque sistémico para “efectuar un planeamiento integrado en el manejo de los recursos hídricos, debido a que éste enfoque da soluciones eficientes a la compleja problemática del agua” (SIMONOVIC, 2000).

El pensamiento sistémico, de acuerdo con Senge (1994), es un concepto relativamente nuevo, que ha sido muy usado en el campo de la administración de empresas, mientras que, el enfoque de sistemas es una forma de estudiar problemas de tiempo y control en la ingeniería aeroespacial y de cómo resolverlos.

Los métodos empleados en el pensamiento sistémico tienden a ser más cualitativos mientras que el enfoque de sistemas tiende a ser más cuantitativo. La simulación de dinámica de sistemas es la herramienta más usada que la ingeniería tiene disponible para cuando se hace necesario entender la influencia del tiempo en el comportamiento de un sistema complejo; como por ejemplo, en el caso de los recursos hídricos.

## **b) Definición del problema**

El sistema hídrico de São Miguel do Anta está conformado por un conjunto de elementos o componentes que cumplen diferentes funciones, cuyo resultado final es la obtención del objetivo de adecuación y distribución del agua para posibilitar la vida y la producción de las plantas, los animales y las familias. El sistema está constituido no solo por los elementos unidos entre sí y sus interrelaciones, sino que ellos están organizados alrededor de propósitos u objetivos que deben satisfacer.

Teniendo lo anterior como punto de partida se analizó la sustentabilidad de éste sistema en el municipio. Con el MASMA se busco determinar si las generaciones presentes y futuras cuentan con los recursos hídricos que necesitan para garantizar el desarrollo sostenible, del municipio. Este análisis se hizo a través de una visión de largo plazo (32 años) de los recursos antes citados.

El MASMA ha sido diseñado para representar la estructura de la demanda de agua de la población, la producción agrícola y pecuaria, la producción agroindustrial, y la demanda de tipo ambiental requerida para mantener la vida de los ecosistemas del lugar. Comprende también la oferta de recursos hídricos disponibles en la zona. La cual fue estimada, en base al caudal medio de los ríos, y al volumen disponible de agua subterránea, siendo expresado este último (por falta de datos más precisos) como un porcentaje de las precipitaciones medias anuales.

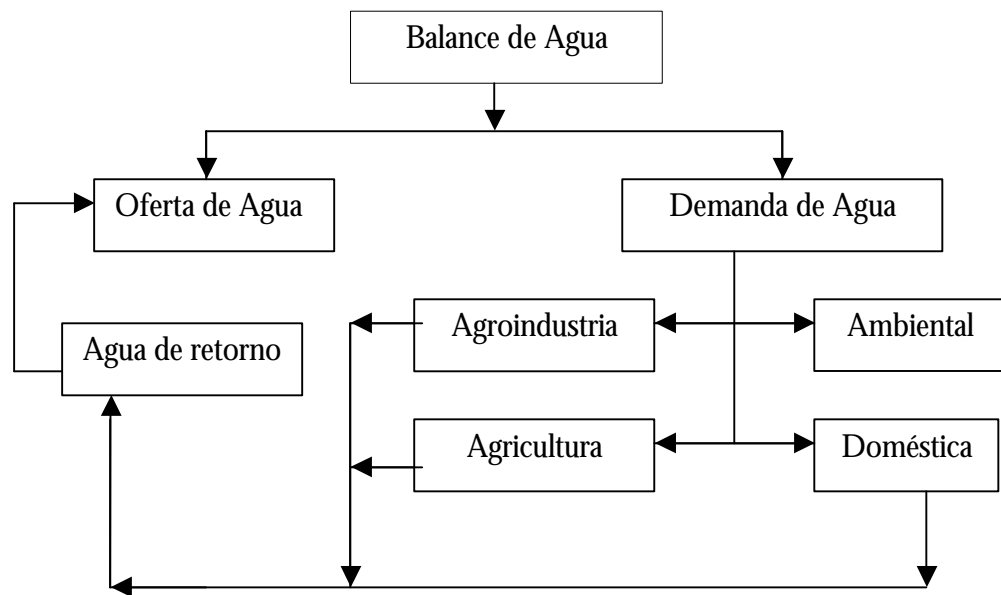
Utilizando el enfoque de dinámica de sistemas se rompe con el análisis aislado del destino del agua. Al disociarse de este paradigma, se enfoca algo más importante: el uso final y el control del recurso, centrándose en particular en quien lo usa. Con éste objetivo en claro, se logra superar las políticas diseñadas para resolver problemas que, contrariamente a su propósito inicial, pueden muchas veces reforzar los problemas que intentaban solucionar.

## **c) Relaciones entre los elementos del sistema: diagrama causal del modelo**

Para el diseño del diagrama causal, que representa las relaciones principales y relevantes para el estudio de la estructura de oferta y demanda hídrica en el municipio bajo estudio, se tomó como base el flujograma que de acuerdo con

Xu et al. (2002), contiene los componentes principales de la estructura de un modelo de recursos hídricos que analiza el balance entre oferta y demanda de agua.

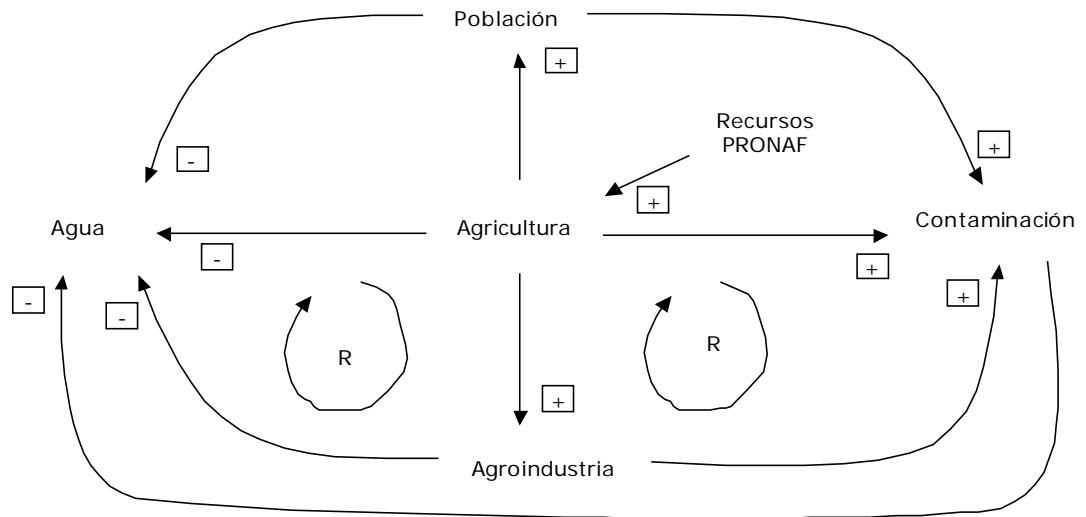
La Figura 9 describe de forma esquemática el sistema de recursos hídricos y los elementos principales que lo componen. Se conforma de dos agregados principales, el primero que representa la oferta de agua disponible, y el segundo, que engloba la demanda del referido recurso. De estos dos grandes agregados se deriva el balance hídrico del modelo.



Fuente: Adaptado de Xu et al. (2002).

Figura 9 – Flujograma que representa la estructura del modelo de recursos hídricos.

El esquema anterior permitió establecer los principales componentes del MASMA, e identificar las relaciones de causalidad más importantes que existen entre ellos. Como resultado de este análisis, se elaboró el diagrama causal específico para el municipio en estudio. Éste diagrama permite visualizar el tipo de relaciones que existe entre los elementos que componen el modelo.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 10 – Diagrama causal del MASMA.

Como puede observarse en la Figura 10, están identificados los componentes básicos del sistema así como la interacción que se da entre ellos, siendo ésta última la que proporciona las características estructurales al sistema que nos ocupa. Presentándose “Agua”, como la oferta de agua limpia disponible; y por otro lado las demandas estudiadas: “Población”, que indica la demanda de agua para consumo doméstico, tanto en el área rural como en la urbana; “Agricultura” que engloba los requerimientos hídricos de los cultivos y de la actividad pecuaria; “Agroindustria” evidenciando la demanda de agua requerida por este sector. El componente “Contaminación” representa la calidad del agua residual que se deriva de las actividades agrícolas, agroindustriales y del consumo humano. Expresa la contribución *per cápita* de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) promedio, producida por los seres humanos y la actividad pecuaria. Por último tenemos la variable “Recursos PRONAF”; que en la presente investigación ha sido considerado un factor de inyección de recursos financieros en las actividades agrícolas. Esta última variable está dinamizando e incrementando las actividades del sector productivo y de servicios del municipio.

Con respecto a los lazos de realimentación existentes entre los componentes del sistema podemos apuntar lo siguiente: la inyección de recursos financieros provenientes del PRONAF, genera un impacto positivo sobre las actividades del sector agrícola, es decir los efectos de una variable sobre otra caminan en la misma dirección que se representa con un signo (+) al final de la flecha (Figura 10). Si, por ejemplo, los recursos financieros aumentan, ello repercute en un aumento de las actividades agrícolas y viceversa. Por el contrario, un aumento en el consumo de agua del sector agrícola, agroindustrial, y de la población genera un impacto negativo sobre la oferta de agua disponible, es decir, el crecimiento de éstas variables ocasiona disminución en la oferta de agua limpia, aumento de la contaminación y viceversa; pudiéndose afirmar entonces que los efectos caminan en direcciones contrarias, representándose con un signo (-). Se puede también observar que, el incremento en las actividades agrícolas, agroindustriales y de consumo de la población ocasionan un aumento en el nivel de contaminación del agua, por lo que existe un efecto positivo derivado de la relación entre éstas variables, si una crece la otra también y viceversa. Asimismo, la variación en la actividad agrícola (que ha sido considerado como el eje dinamizador de la economía del municipio) genera efectos en el mismo sentido de la variación; en la agroindustria y, en la población.

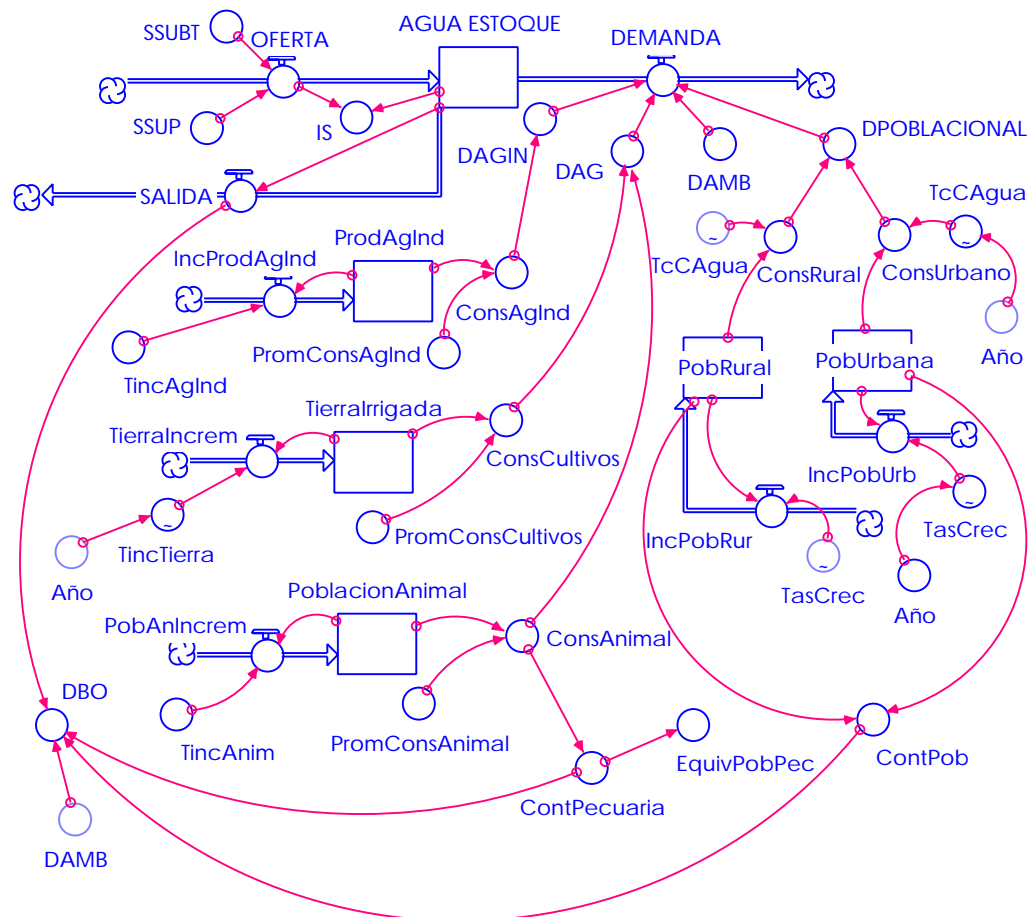
Producto de los efectos de las relaciones entre las variables, el modelo está caracterizado, en síntesis, por un lazo de realimentación positivo (R). Esto significa que, la variación de un elemento se propaga a lo largo del lazo reforzando la variación inicial, generando un crecimiento exponencial del sistema donde toda variación es amplificada provocando más movimiento en la misma dirección. En el caso de la sostenibilidad de los recursos hídricos en el municipio, es un círculo vicioso, que provoca un empeoramiento del sistema, pues queda evidenciado que el aumento de las actividades productivas ejerce fuertes presiones sobre la oferta del recurso, y disminución de la calidad del mismo.

## 2.5.2. Etapa de formalización

En esta etapa se efectuó la formalización del diagrama anterior empleando para ello un lenguaje matemático. El punto de partida fue la elaboración del diagrama de estoque y flujo, en base al cual se escribieron las ecuaciones del modelo.

### a) Diagrama de estoque y flujo

El diagrama causal del modelo (Figura 10), permitió diseñar el diagrama de estoque y flujo, que de forma más detallada describe el funcionamiento del sistema (Figura 11).



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 11 – Diagrama de estoque y flujo del MASMA.

La conversión se dio de la siguiente forma: una vez representados en el diagrama causal, los componentes principales del modelo de oferta y demanda de recursos hídricos del municipio (agua, población, sector agrícola, agroindustria, contaminación y recursos PRONAF) así como las relaciones principales existentes entre ellos, que de forma abstracta y bajo el enfoque del pensamiento sistémico construimos, procedimos a su formalización en el lenguaje de dinámica de sistemas, auxiliándonos para ello de las herramientas empleadas en la construcción de modelos que se elaboran bajo este enfoque. Las estructuras básicas para el diseño del diagrama son los estoques y los flujos (ver Figura 4).

Los estoques representan en el modelo las acumulaciones de recursos y también las restricciones de éstos. Representan las condiciones, informando como está la situación; y son las variables que acumulan cambios influenciadas por los flujos. En este caso, los estoques los constituyen por un lado, el agua limpia que denominaremos “agua” y representa la oferta hídrica del modelo; y por el otro las poblaciones humana y animal, las tierras con riego y la producción agroindustrial que determinan la demanda de agua, requerida por los diferentes sectores económicos y sociales del municipio.

Los flujos se representan con válvulas, representan las acciones que llenan y/o vacían los estoques, es decir, como las cosas están desarrollándose, son variables dependientes del tiempo. Como puede observarse en la Figura 11, en este modelo se tienen los flujos llamados con tasas que son controlados por la(s) tasa(s) de la(s) variable(s) en conexión, que usualmente es una variable auxiliar o una constante, y que están alimentando la oferta hídrica. Ésta oferta está constituida por las aguas superficiales (Río Casca) y las aguas subterráneas.

Por otra parte tenemos los flujos que representan la demanda hídrica del modelo. Estos están compuestos por los requerimientos de agua de los sectores agrícola, agroindustrial, por la población urbana y rural, y la demanda ambiental, constituida esta última, por el caudal mínimo que el río debe de tener, para mantener la vida de los ecosistemas, correspondientes. Lo cual equivale a una oferta mínima de agua limpia. Estas demandas tienen un flujo de salida que alimenta el estoque de agua residual.

Los otros elementos del modelo evidenciados en el diagrama causal, y que determinan los flujos, se convierten en variables auxiliares o constantes, tales como el consumo de agua del sector agrícola, poblacional, agroindustrial, etc.

Las relaciones entre las variables que en el diagrama causal se establecían a través de flechas, en este diagrama se indican de la misma forma, y son llamados conectores. Éstos vinculan, los estoques a las variables auxiliares o a las constantes, los estoques a los reguladores de flujos, y las auxiliares o las constantes a otras auxiliares o constantes.

## **b) Descripción matemática del modelo**

Los modelos de simulación dinámica, son construidos por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales, que son matemáticamente resueltas a través de un período por un algoritmo que genera comportamientos dependientes del tiempo para las variables que tiene el modelo.

### **b.1) Estimación de la demanda de agua**

La ecuación siguiente muestra los cinco componentes considerados en el modelo.

$$D = DAGIN + DPOBLACIONAL + DAG + DAMB \quad (1)$$

Donde  $D$  es el monto total de agua demandado,  $DAGIN$  es la demanda de agua del sector agroindustrial. La  $DPOBLACIONAL$  engloba por una parte, la demanda urbana de agua para consumo doméstico, y por la otra la demanda rural de agua usada para los mismos fines. La  $DAG$  es la demanda agrícola de agua y  $DAMB$  es la demanda ambiental de agua. Todas estimadas en metros cúbicos.

La demanda de agua para usos domésticos, ha sido separada en este estudio en rural y urbana, ya que los valores de consumo son diferentes. En el área urbana existe un mejor acceso al recurso, al contar la ciudad con un sistema de abastecimiento de agua canalizada y, a que normalmente, en las áreas urbanas el consumo de agua para uso doméstico es mayor.

## b.2) Demanda doméstica de agua

En la demanda de agua doméstica se incluyen, además, del consumo humano las cantidades de agua consumida, para usos en el hogar tales como: cocinar, limpieza y uso sanitario; los consumos de los sectores comercial y de servicios del municipio, asimismo se incluyen también, el mantenimiento de jardines, plazas, edificios públicos, etc. Se estimó multiplicando la población por la demanda *per cápita*. Tomando como base, datos históricos de población del municipio (IBGE, 2005) ésta es definida por la población inicial y la tasa de crecimiento anual.

La población futura para el año  $i$  se estimó de la siguiente forma

$$POB_i = POB_0(1 + rp_1)(1 + rp_2)\dots(1 + rp_i) \quad (2)$$

Donde  $POB_0$  es la población inicial,  $rp_i$  es la tasa de crecimiento de la población en el año  $i$ , que puede variar para cada año e incluye cualquier cambio futuro en la política poblacional.

La demanda doméstica individual se mide en litros *per capita* diarios. La demanda *per capita* para el año  $i$  se estimó de la siguiente forma

$$AP_i = AP_0(1 + rap_1)(1 + rap_2)\dots(1 + rap_i) \quad (3)$$

Donde  $AP_0$  es la demanda *per capita* inicial de agua,  $rap_i$  es la tasa de crecimiento del consumo de agua en el año  $i$ , que de acuerdo con estimaciones del Fondo de Población de las Naciones Unidas (FNUAP), se ha estabilizado y está creciendo al mismo ritmo que la población, asumiéndose por tanto para la estimación de ésta tasa los valores correspondientes a la tasa proyectada de crecimiento de la población (FNUAP, 2005).

La demanda doméstica de agua para el año  $i$  se estimó así

$$DDOM_i = AP_i * POB_i \quad (4)$$

Los datos para este rubro comprenden la población existente, la tasa de crecimiento de la población y el consumo *per capita* de agua. Para el caso del consumo humano urbano fue usado el valor promedio de consumo anual reportado por COPASA (VILELA CUNHA, 2005) en la sede municipal (137.62 L d<sup>-1</sup> *per capita*), y en el área rural el valor promedio de consumo se consideró igual a 100 L d<sup>-1</sup> *per capita* (SIMONOVIC, 2002). El valor inicial de la población rural corresponde a la población del año 2000 registrada en el censo demográfico de ese mismo año por el IBGE. En el caso de la población urbana se usaron datos de Vilela Cunha (2005). Los datos sobre la tasa de crecimiento de la población y sus proyecciones, hasta 2050, para Minas Gerais, provienen también del IBGE. La tasa de crecimiento de la población se encuentra como una constante dentro de una función gráfica, con el fin de incorporar el planteamiento de periodos con diferentes tasas de crecimiento de la población, calculándose entonces, para cada periodo, el volumen demandado de agua, dependiente del número de habitantes.

### **b.3) Demanda agroindustrial de agua**

Al igual que para la demanda doméstica de agua, los datos históricos reflejan que la cantidad de agua empleada por unidad de producción varía de acuerdo a la escala de producción. La demanda de agua agroindustrial se estimó multiplicando la producción agroindustrial con la correspondiente demanda de agua por unidad de producto.

La demanda de agua agroindustrial para el año  $i$  se estimó de la siguiente forma

$$DAGIN_i = AGINP_i * AAGINP_0(1 - aai_i) \quad (5)$$

En donde  $AAGINP_0$  es la demanda inicial de agua por unidad de producción,  $aai_i$  es la tasa de reducción de la demanda de agua por unidad de producción en el año  $i$  debido a la eficiencia en el uso del agua, y  $AGINP_i$  es la producción agroindustrial en el año  $i$ , que se estimó de la siguiente forma:

$$AGINP_i = AGINP_0 * (1 + rain_1)(1 + rain_2)...(1 + rain_i) \quad (6)$$

Donde *rain* es la tasa de crecimiento de la producción agroindustrial.

Los datos de este sector incluyen producción agroindustrial existente, tasa de crecimiento de la agroindustria, demanda de agua por cantidad de producto, y el posible decrecimiento de la tasa de agua demandada por unidad de producto agroindustrial, debido a mejoras en la eficiencia del uso del agua por la adopción de nuevas tecnologías.

#### **b.4) Demanda agrícola de agua**

Generalmente, la demanda de agua para la agricultura irrigada, corresponde al 70% de la demanda total sectorial. Sin incluir la demanda de tipo ambiental. En la demanda agrícola normalmente se incorporan el riego, la pesca y la pecuaria (AL-WESHAH, 2000). En este estudio el agua para riego se estimó para cada cultivo, multiplicando el total de tierra irrigada por cultivo, por los requerimientos de agua del cultivo por hectárea, calculados usando el *software* IRRIGA (GESAI, 2003) del Departamento de Ingeniería Agrícola y Ambiental de la Universidade Federal de Viçosa. Dicho programa calcula la suma de las necesidades hídricas de cada cultivo a suplir por el riego, así como, las pérdidas por ineficiencia en el sistema de regadío, esto permitió estimar la demanda total de agua por hectárea cultivada.

De igual forma, procedimos con las actividades pecuarias. Para esto, se multiplicó para cada especie el número de animales existentes por los requerimientos de agua *per capita* (MATOS, 2003), tanto de consumo directo como de limpieza, al final sumamos los resultados por especie para obtener la demanda total de agua para usos pecuarios.

Con los avances de las tecnologías de riego, es de esperar que la demanda de agua por hectárea disminuya con el tiempo por lo que es considerada como una función dependiente del tiempo. Debido a falta de datos, la eficiencia en el sistema de riego por aspersión considerado, se fijó constante en un nivel de 75%. Asimismo, el área con riego puede variar debido a la urbanización y al desarrollo

de nuevos campos. La tasa de crecimiento de las tierras incorporadas al cultivo, se definió como una función gráfica, con el objetivo de determinar periodos con diferentes tasas de crecimiento (CASTERAD; HERRERO, 1998). El agua para riego se estimó a través de las siguientes ecuaciones.

$$DAGR_{x,i} = CTC_{x,i} * RAC_x * aT_i * rT_i \quad (7)$$

$$CTC_{x,i} = CTC_0(1 + rT_1)(1 + rT_2)...(1 + rT_i) \quad (8)$$

Donde  $CTC_{x,i}$  es la cantidad de tierra (ha) empleada con el cultivo  $x$  en el año  $i$ ,  $RAC_x$  es el requerimiento de agua del cultivo  $x$  en  $m^3 ha^{-1}$ ,  $aT_i$  es la tasa de reducción de la demanda de riego por ha. En el año  $i$ , y  $rT_i$  representa la tasa de crecimiento del área (ha) irrigada en el año  $i$ .

La demanda de agua para usos pecuarios se estimó a través de la siguiente ecuación

$$DAGP_{x,i} = CAN_{x,i} * RA * rAi \quad (9)$$

Donde  $CAN_{x,i}$  representa el número de animales de la especie  $x$ , en el año  $i$ , y  $RA_x$  es la demanda *per capita* de agua de la especie  $x$  en litros por día. y  $rAi$  representa la tasa de crecimiento de la población animal en el año  $i$  (IBGE, 2005).

La demanda total de agua del sector agrícola se estimó sumando la demanda agrícola por cultivo para riego y la demanda agrícola para usos pecuarios a través de la siguiente ecuación

$$DAG_i = \sum DAGR_i + \sum DAGP_i \quad (10)$$

Los datos usados para el cálculo de esta demanda fueron recogidos de la base de datos del IBGE (2005) sobre la producción agrícola y pecuaria del Municipio de São Miguel do Anta en el periodo 1994-2004, y se presentan en el Anexo A. Las proyecciones para las tasas de incremento de las tierras agrícolas

para cultivos, se estimaron a través del análisis de disponibilidad de tierras, susceptibles de ser cultivadas en el municipio, y con el empleo de datos de la Organización mundial para la Alimentación y la Agricultura (FAO), resumidos por Postel (1999) y que han sido estimados en 0.6% por año para el período 2000-2025; 0.4% para 2025-2050 y de 0.3% para 2050-2100.

#### **b.5) Demanda ambiental de agua**

La demanda de agua para la protección del medio ambiente y de los ecosistemas es asumida como un valor constante. Para este estudio, se considero igual al caudal mínimo registrado en la estación pluviométrica sobre el Río Casca, denominada con el código 152 de la red existente en el Estado de Minas Gerais que abarca una serie de 50 años (TEIXEIRA SOUZA, 1993).

#### **b.6) Estimación de la oferta de agua disponible**

La oferta total de agua disponible esta expresada por la siguiente ecuación de balance de masa

$$S = SSUP + SSUBT + SRET \quad (11)$$

Donde  $S$  es la oferta total de agua disponible,  $SSUP$  es la oferta disponible de agua superficial,  $SSUBT$  es la oferta disponible de aguas subterráneas y  $SRET$  es la oferta disponible de aguas de retorno.

##### **b.6.1) Aguas superficiales**

Los recursos hídricos superficiales potenciales se estimaron a través de datos históricos del caudal medido en el Río Casca. Para este estudio, se considero igual al caudal medio registrado en la estación pluviométrica sobre el Río Casca, denominada con el código 152 de la red existente en el Estado de Minas Gerais que abarca una serie de 50 años (TEIXEIRA SOUZA, 1993). Los cálculos se presentan en el Anexo B (Tabla 1B). Queremos destacar que esta no es la única fuente de

agua superficial del municipio, sin embargo es para la cual existe una serie histórica de datos, por lo que solamente se considero esta.

### **b.6.2) Aguas subterráneas**

La disponibilidad de aguas subterráneas, se estimó considerando, que un cinco por ciento del total de las precipitaciones anuales, se infiltra profundamente (CHOW et al., 1988) en el acuífero bajo el Municipio. Los datos de precipitaciones más próximos al área de interés, son los disponibles en la estación de Viçosa (DNM, 1992), que son los usados para estimar este volumen anual (Anexo B, Tabla 2B).

### **b.6.3) Aguas de retorno**

Las aguas de retorno son estimadas, en el caso de la agricultura, como un porcentaje del agua usada en el riego y en el consumo animal, considerándose normalmente, un 80% del agua consumida, como aguas residuales (MATOS, 2003). Asimismo, se usan valores promedio de aguas de retorno de uso doméstico y agroindustrial. En la presente investigación no se consideraron estas aguas, para el análisis, sin embargo se incorporan en las ecuaciones, para futuros estudios.

### **b.7) Evaluación del sistema de recursos hídricos**

Ente los criterios para evaluar el funcionamiento de un sistema de recursos hídricos se encuentran los de: confiabilidad, vulnerabilidad y capacidad de recuperación (JINNO et al., 1995; XU et al., 1998). En este estudio fue empleado un índice de sostenibilidad (IS) (XU, et al., 2002), definido como la relación entre un posible déficit de agua con respecto a la oferta correspondiente en una misma región, que se describe a continuación:

$$IS = \begin{cases} (S - D) / S & S > D \\ 0 & S \leq D \end{cases} \quad (12)$$

Donde  $D$  es la demanda de agua y  $S$  es la oferta disponible de agua. Si el valor del IS es mayor a 0.2 eso indica un bajo o ningún stress en la oferta de agua, lo que implica que la demanda de agua es menor o igual al 80% de la oferta potencial de agua. Valores menores a 0.2 reflejan condiciones de vulnerabilidad, lo que supone que la demanda de agua es mayor al 80% de la oferta potencial de agua. Valores iguales a cero indican que la oferta de agua es insostenible, lo que sugiere que la demanda de agua es igual, o excede a toda la disponibilidad de recursos hídricos locales.

### **b.8) Calidad del agua**

Para examinar la calidad del agua, en el presente trabajo fue considerada solamente, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) generada por la población humana y por la actividad pecuaria. No se pudo incluir la contaminación generada por los cultivos, por falta de datos.

La carga *per capita* de contaminación es un valor que representa la contribución individual por unidad de tiempo. Usualmente se expresa como la relación entre la masa del agente que produce la contaminación y la unidad de tiempo en que sucede. Unidades comúnmente usadas en el caso de contaminación humana es  $g \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , y se considera como contribución *per capita* de DBO promedio, en el caso de los seres humanos, el valor promedio es de  $54 g \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (VON SPERLING, 1996).

El equivalente poblacional es un parámetro importante para caracterizar los desechos agropecuarios e industriales. El traduce en cuanto estas actividades están contaminando el medio ambiente, medido usualmente, en términos de materia orgánica, como si ésta fuese contaminación humana. Es decir, cuantos seres humanos produciendo residuos orgánicos son necesarios para igualar la contaminación de un determinado sector (VON SPERLING, 1996). A seguir, se presentan las ecuaciones a través de las cuales se estimaron estos valores.

$$\text{Carga}(kg \cdot d^{-1}) = \frac{\text{Población}(\text{hab}) \times \text{Carga per capita}(g \cdot \text{hab}^{-1} \cdot d^{-1})}{1000(g \cdot kg^{-1})} \quad (13)$$

$$\text{Carga}(kg \cdot d^{-1}) = \frac{\text{Concentración}(g \cdot m^{-3}) \cdot \text{Caudal}(m^3 \cdot d^{-1})}{1000(g \cdot kg^{-1})} \quad (14)$$

$$\text{Equivalente poblacional} = \frac{\text{Carga de DBO de la pecuaria } (kg \cdot d^{-1})}{\text{Contribución per cápita de DBO } (g \cdot hab^{-1} \cdot d^{-1})} \quad (15)$$

### **3. RESULTADOS Y DISCUSION**

#### **3.1. Validación del modelo de simulación dinámica**

Los modelos de simulación dinámica, permiten efectuar descripciones abstractas de la realidad, posibilitando la representación de problemas complejos, caracterizados por ser dinámicos, no lineales, donde existen relaciones de retroalimentación y desfases temporales y espaciales. El objetivo de las simulaciones de modelos es hacer evidentes las presuposiciones efectuadas acerca de los mismos.

Es importante que el comportamiento real de un sistema sea reproducido por el modelo, sin embargo como sostienen Grcic y Munitic (2000), al elaborar un modelo, algunas características de la dinámica del mismo no son cuantificables, por lo que se utilizan datos cualitativos y empíricos, perdiéndose entonces la eficacia de los testes de validación cuantitativa. Derivado de lo anteriormente expuesto, surge la necesidad, de efectuar una validación cualitativa del modelo, buscando con ello establecer de manera prioritaria, si éste es útil para el objetivo propuesto, tal como lo sostiene Ford (1999).

Para Sterman (2000), los modelos no representan la realidad, por lo que no se puede constatar su veracidad, todos son susceptibles de ser falsificados o refutados de acuerdo algunos testes o teorías. Lo importante es entonces,

seleccionar el modelo que de mejor manera alcanza determinado objetivo. En este contexto se torna prioritario identificar de forma clara y precisa el problema a ser estudiado y contextualizarlo a fin de especificar sus objetivos reales.

Según Forrester (1961), en la dinámica de sistemas, la validación de los modelos de simulación se juzga de acuerdo a su conveniencia y utilidad. Se debe confiar en su comportamiento bajo condiciones limitadas y de acuerdo a un objetivo en particular.

El modelo de simulación dinámica debe de capturar solamente los factores esenciales de un sistema real, debiéndose abstraer los factores restantes. Su validación debe de ser considerada de acuerdo a la consistencia lógica de su estructura interna. (RUTH; HANNON, 1994).

Son utilizados algunos testes y procedimientos a fin de darle al modelo de simulación dinámica, mayor confiabilidad, además de evidenciar sus limitaciones, entre los que se destacan, de acuerdo con Forrester (1961), Ford (1999), y Sterman (2000):

- Padronización en la documentación de los componentes del modelo.
- Replicabilidad del modelo y disponibilidad de sus ecuaciones para revisiones.
- Teste de Errores Mecánicos: utilizado en la búsqueda de errores mecánicos de simulación a fin de garantizar la estabilidad inicial.
- Teste de Robustez: se refiere a condiciones extremas, se aplica con el objetivo de evaluar la consistencia del modelo.
- Teste de Consistencia Dimensional: análisis dimensional de las ecuaciones del modelo.
- Teste de Políticas: Se usa para señalar y descubrir formas de cambiar el desenvolvimiento del sistema.
- Teste de Sensibilidad: analiza la solidez de las políticas a través de la variación en los valores de los parámetros del modelo.
- Teste de Frontera: constata si las delimitaciones del modelo y los conceptos que lo describen, representan de forma adecuada el sistema real bajo estudio.

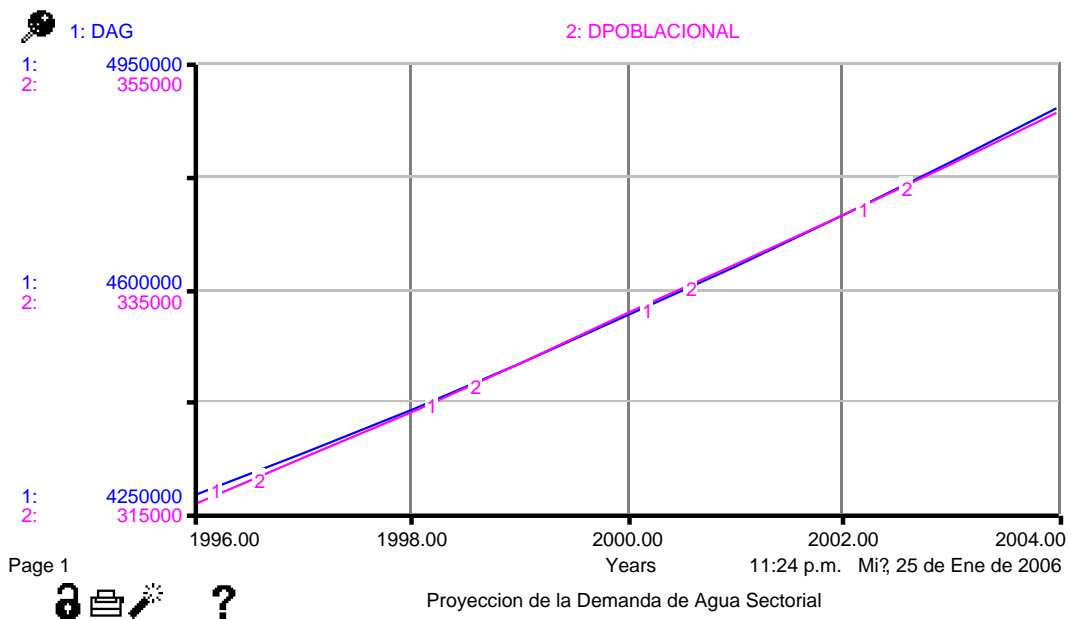
En este estudio se ha pretendido representar el sistema de recursos hídricos del municipio de São Miguel do Anta, a fin de examinar si estos recursos están siendo utilizados de forma sostenible. Éste sistema está constituido por un conjunto de elementos organizados alrededor del objetivo de adecuación y distribución del agua para posibilitar la vida y la producción de las plantas, los animales y las familias. Para poder construir el sistema, se identificaron prioritariamente los elementos claves que lo conforman y se utilizaron los procedimientos anteriormente citados.

Considerando que la dinámica del sistema, es determinada por la demanda de los recursos hídricos necesarios, para satisfacer las necesidades de la población, y del sector agrícola. No se incluye la demanda del sector agroindustrial por falta de datos y la demanda ambiental por que ésta se mantiene constante a lo largo de todo el período de simulación. Esta demanda comprende las necesidades de agua del municipio y repercute de forma directa en la sostenibilidad del sistema. Mientras que, por el lado de la oferta, debido a la limitación en los datos, hemos supuesto que esta permanece constante, a través del tiempo.

A lo largo de todo el proceso de simulación se conoce de forma exacta la cantidad de agua requerida, por cada sector frente a la oferta de agua disponible. Por lo que tomando como base datos de 1996, se simuló el comportamiento de las demandas sectoriales hasta 2004. Encontrándose los resultados que se describen en la Figura 12.

Los datos de la Figura 12 ilustran la cuantificación de las demandas sectoriales, de acuerdo a los parámetros especificados.

Analizando los datos en la figura anterior, observamos que las demandas de los sectores poblacional y agrícola, se van incrementando a medida, que la población crece y que se aumenta el número de hectáreas cultivadas. Dicho resultado es coherente con la lógica de que a medida que crece la población y la cantidad de tierras de cultivo con riego se requiere más agua para satisfacer sus respectivas necesidades.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 12 – Resultados simulados de las demandas sectoriales ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ) en el período 1996-2004.

Para determinar la consistencia dimensional del modelo se verificó la siguiente equivalencia:

$$\text{Oferta de Agua} = \text{Demanda de Agua} + \text{Salida}$$

Pudiéndose constatar ésta equivalencia a lo largo de todo el período de simulación y en cada uno de los escenarios evaluados.

El proceso de validación de un modelo de dinámica de sistemas, tiene como objetivo fundamental establecer la validez estructural del modelo con respecto a los objetivos para el que fue construido. Este aspecto es determinante, pues el propósito de un estudio efectuado bajo la óptica de la dinámica de sistemas es servir de base para la evaluación de diferentes estrategias y políticas que permitan mejorar el desempeño del sistema. Perfeccionar el comportamiento de un sistema, solo tiene sentido si se tiene confianza en la estructura del modelo. Una

vez que se ha construido el modelo de forma confiable, se deben efectuar testes de validación, cuyo énfasis debe de estar orientado prioritariamente a los patrones de predicción, más que a resultados precisos, en particular, cuando se trata de modelos diseñados para proporcionar una visión de largo plazo, del comportamiento de los sistemas en estudio (BARLAS, 1996).

La validación en dinámica de sistemas es una práctica en cada etapa del modelaje, a fin de detectar fallas en los sistemas construidos.

De acuerdo con Forrester y Senge (1980), y Barlas (1996), entre los procedimientos formales esta la aplicación de testes orientados de comportamiento estructural. Entre los cuales se tienen los testes de condiciones extremas, sensibilidad, y testes de relacionamiento.

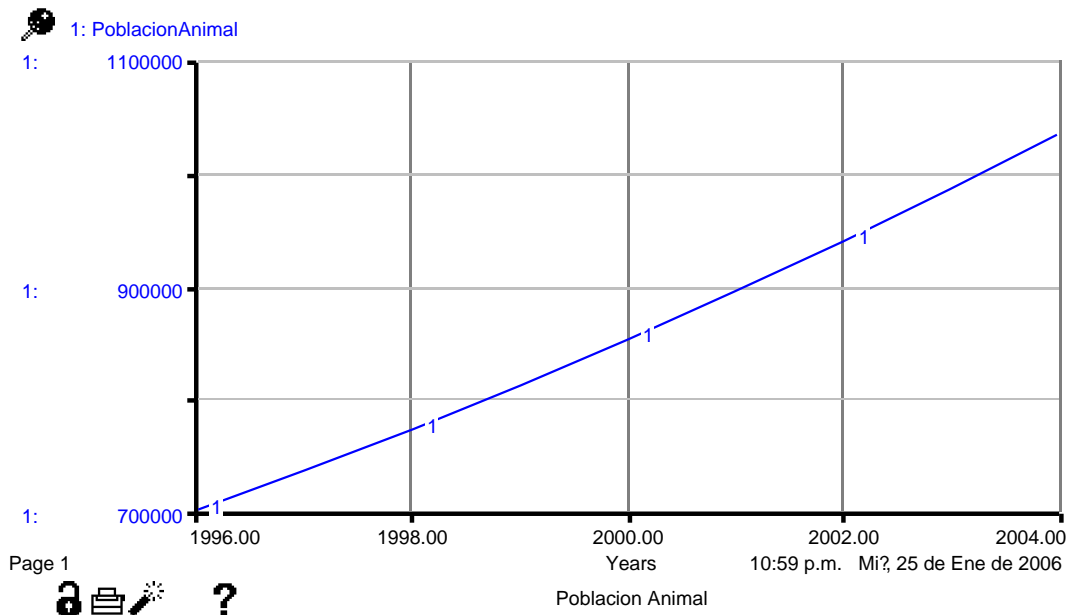
Las Figuras 13 y 14 comprenden los resultados de la calibración del modelo, a través de ciertos parámetros, para los cuales existen datos en el periodo 1996-2004. En esta simulación, la dinámica de crecimiento de la población humana y animal son comparadas con respecto a sus respectivos datos históricos (Anexo A). El comportamiento del modelo corresponde de forma satisfactoria a los datos disponibles.

Es importante señalar que ningún modelo puede ser validado al 100%, pues se incluyen variables que no pueden ser cuantificadas, y también se hacen suposiciones acerca del comportamiento esperado de los parámetros, que muchas veces pueden diferir de lo que sucede en la realidad.

### **3.2. Etapa de simulación: aplicación del modelo de simulación dinámica**

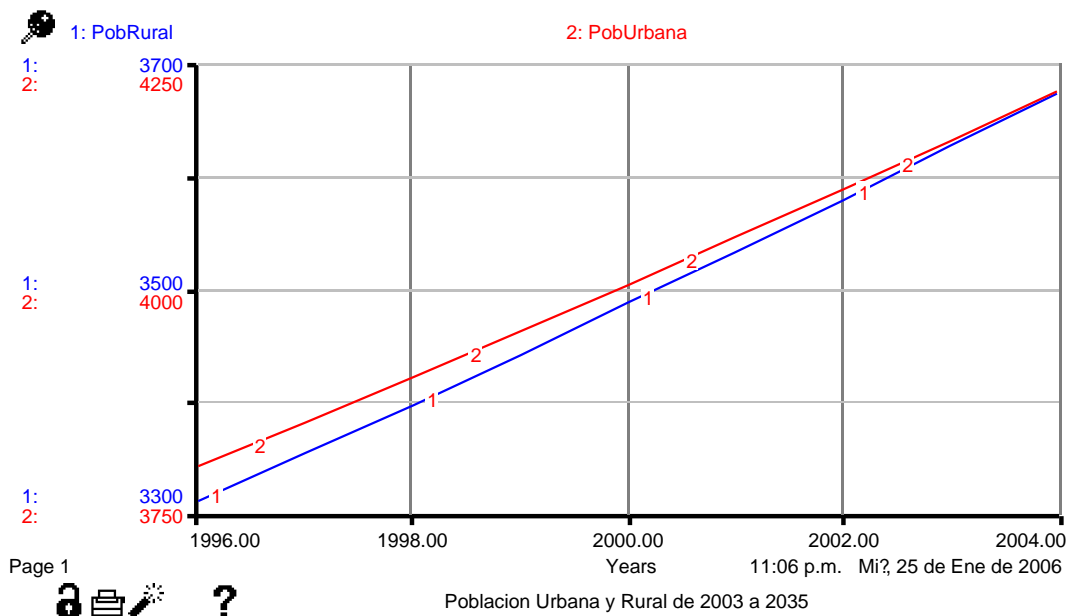
La escala temporal del modelo ha sido determinada de acuerdo a la naturaleza del problema, y al objetivo en base al cual ha sido desarrollado el mismo.

En este trabajo se tiene como objetivo principal, examinar la sostenibilidad de los recursos hídricos en el municipio de São Miguel do Anta, en el largo plazo.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 13 – Resultados simulados del crecimiento de la población animal (cabezas), en el período 1996-2004.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 14 – Resultados simulados del crecimiento de la población humana, urbana y rural (habitantes), en el período 1996-2004.

Es necesario tener una perspectiva sistémica, de los recursos hídricos a largo plazo, ya que, solo en el futuro distante se hace posible evaluar, si dichos recursos están siendo usados de manera sustentable.

El proceso de simulación del modelo comprendió diferentes escenarios de oferta y demanda de agua, de acuerdo a las siguientes especificaciones:

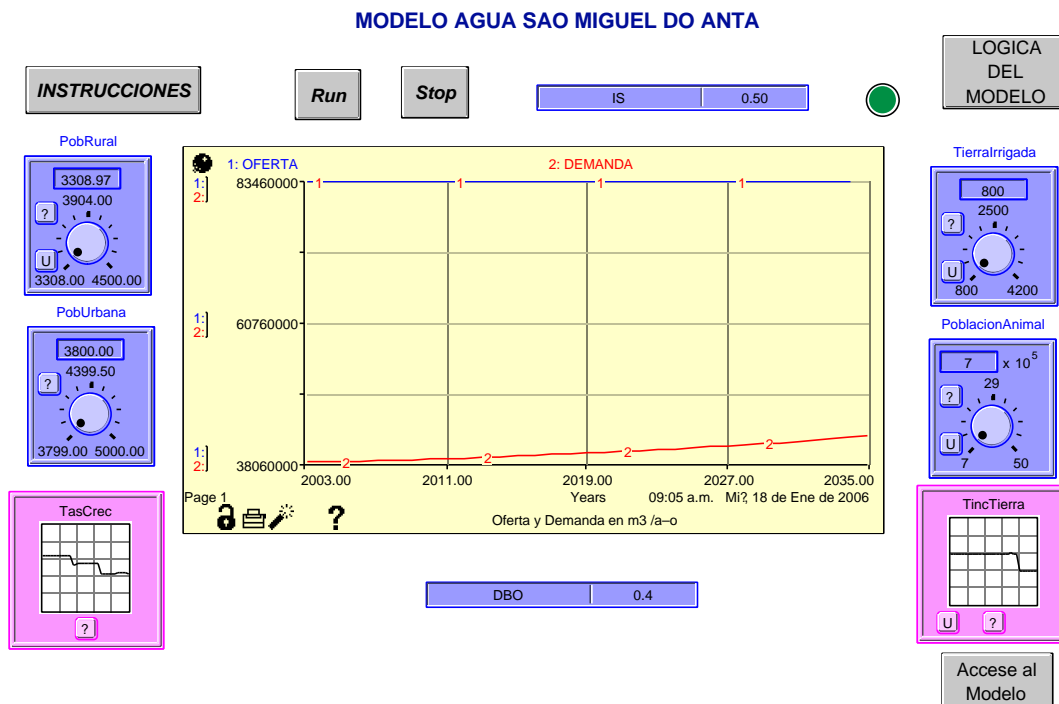
- Horizonte temporal: se propuso un horizonte de 32 simulaciones. Cada simulación se caracterizó por unidad/año lo que hace un horizonte de tiempo de 32 años.
- Paso de tiempo o *step*: el paso de tiempo fue de una unidad.
- Método de integración: se emplearon ecuaciones diferenciales para describir las complejas relaciones en la dinámica del sistema, las que son resueltas a través del método de Euler, que es el más frecuentemente utilizado, y esta caracterizado por la adopción de un flujo constante durante un paso de tiempo o *step* (STELLA, 2001).

Empleándose una *interfase* amigable, como la que se presenta a continuación; se torna fácil la experimentación del sistema a través de la selección de los componentes o *inputs* más importantes, pudiéndose configurar éstos a través de íconos interactivos, por lo que se tiene un laboratorio del sistema que permite simular políticas y escenarios, a fin de descubrir nuevas ideas así como la generación de nuevos cuestionamientos.

En la Figura 15 se presentan los paneles de control y de parametrización del modelo.

El modelo desarrollado en este estudio ha sido usado para evaluar diferentes opciones de explotación de los recursos hídricos para el municipio de São Miguel do Anta. Estableciéndose diferentes escenarios para analizar el comportamiento de las demandas de los sectores económicos y sociales evaluados: población, agroindustria, y agricultura. Asimismo, se han analizados los efectos causados por restricciones en la oferta de recursos hídricos.

En este trabajo se han analizado 5 escenarios de oferta y demanda de recursos hídricos, mismos que se describen en la Tabla 1.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 15 – Interfase del MASMA.

Tabla 1 – Escenarios propuestos y evaluados en la investigación

Escenario	Clase	Descripción
1	BaU	Bussiness-as-Usual
2	Cambio climático	Oferta reduce en 10%
3	Cambio climático	Oferta reduce en 20%
4	Incremento del área irrigada	50% de la cantidad de tierras cultivadas tienen riego
5	Escenario Integrado	Combinación de los escenarios 3 y 4

Fuente: Resultados de la investigación

Como señalamos anteriormente, el MASMA ha sido diseñado para simular diferentes escenarios de recursos hídricos, con el propósito de identificar, a largo plazo, la sustentabilidad del sistema bajo distintas opciones, tanto en lo que concierne al abastecimiento, como en lo que respecta a las necesidades hídricas de los distintos sectores socio-económicos, incorporados en el modelo. Sirviendo éste, además, como una herramienta de análisis del impacto que podrían ocasionar diferentes cambios de oferta y demanda en el desempeño del sistema, Para lograr esto, se han hecho diferentes suposiciones acerca de la oferta y la demanda de agua, en el municipio, en el período que va desde el año 2003 hasta el 2035.

El efecto del incremento de recursos provenientes del PRONAF, ha sido incorporado en el crecimiento que las actividades productivas del municipio, han tenido en los últimos cinco años, lo que esta reflejado en los datos de producción del sector agrícola del citado municipio, factor que ha servido para el cálculo de las demandas hídricas de dicho sector y para la estimación de sus respectivas tendencias.

El escenario 1, es el Bussiness as Usual (BaU), es decir que se mantienen las tendencias actuales de crecimiento y consumo, y de oferta de agua. El escenario 2, contempla la reducción de la oferta de agua en un 10%, debido a cambios climáticos asumiéndose que el resto de componentes del modelo no presentan variaciones; el escenario 3, contempla la reducción de la oferta de agua en un 20%, debido a factores relacionados con el clima; el escenario 4, contempla que de la cantidad total de hectáreas cultivadas , se incorporan al riego 50% de las tierras, y por último, en el escenario 5, se han combinado los escenarios 3 y 4.

### **3.2.1. Escenario 1: BaU**

La dinámica de sistemas es usada como una herramienta, que auxilia en el conocimiento de la situación existente y su posible futuro. Lo cual posibilita visualizar el comportamiento del sistema en estudio, a corto, mediano y largo plazo, identificándose así, aquellos elementos claves, que puedan servir como

puntos de apoyo, para la aplicación de políticas que permitan mejorar el sistema, lo que ayuda en el proceso de planeación de recursos hídricos.

Esta metodología permite integrar en un sólo modelo diferentes perspectivas del uso del agua, proporcionar datos sobre lo que acontece cuando simulamos la implementación de una política, y también posibilita el manejo de variables físicas y sociales dentro del mismo modelo. La simulación con variables de éste tipo, ayuda a determinar impactos tanto físicos cuanto sociales resultantes de la implementación de políticas de largo plazo.

La dinámica de sistemas es un enfoque adecuado para modelar y simular el comportamiento de problemas de recursos hídricos en el tiempo, permitiendo además descomponer éste en subproblemas.

El modelo tiene la ventaja de proporcionar información cuantitativa, lo que permite analizar varios escenarios a fin de escoger la solución más adecuada. Esto se alcanzó en dos etapas. En la primera etapa se efectuó la simulación del escenario BaU, que no considera ninguna variación en los parámetros incorporados en el modelo, manteniendo éstos, por tanto, sus tendencias actuales. Esto puede servir de base para estudios posteriores. Las ecuaciones estimadas del modelo se presentan en el Anexo C.

En la segunda etapa, se evaluaron escenarios alternativos, estableciéndose para ello modificaciones en los parámetros, de acuerdo a suposiciones hechas acerca de cambios experimentados tanto en la oferta como en la demanda de agua, debido a variaciones climáticas y a incrementos en la cantidad de tierras irrigadas para cultivos agrícolas.

Los parámetros en el escenario BaU, reflejan las tendencias de crecimiento económico de largo plazo en el Municipio de São Miguel do Anta, Estado de Minas Gerais; como puede observarse en la Tabla 2.

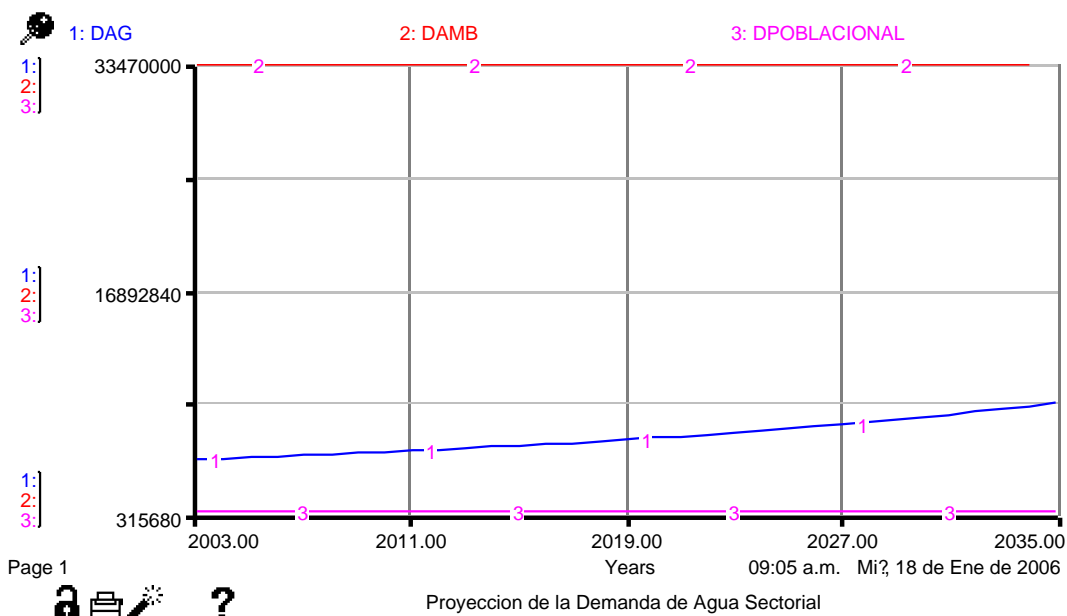
Tabla 2 – Parámetros principales del BaU escenario

Período	2003-2011	2011-2019	2019-2027	2027-2035
Crecimiento poblacional (%)	1.32	1.32 - 1.11	1.11 - 0.9	0.9
Demanda <i>per cápita</i> de agua (Lhab <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ): urbana rural	137.6 100.0	137.6 100.0	137.6 100.0	137.6 100.0
Incorporación de tierras al cultivo (%)	0.6	0.6	0.6	0.4
Cantidad de agua de riego por unidad de área (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	5000 - 6000	5000 - 6000	5000 - 6000	5000 - 6000

Fuente: Resultados de la investigación

El sector agroindustrial actualmente es poco significativo dentro del municipio, por lo que aún no se tienen datos precisos sobre volúmenes de producción. Sin embargo, se espera que en un futuro próximo, este sector vaya aumentando su participación, debido a los programas de fomento que se están aplicando. La incorporación de este sector dentro del modelo se ha hecho con el propósito de completar la demanda hídrica del municipio. Dejando solamente indicada la forma en que la dinámica ocurre dentro del sector, sin la incorporación de datos. Esto se ha hecho así, esperando que en un periodo cercano, se cuente con los datos, en base a los cuales se pueda estimar de forma confiable la producción agroindustrial, para poder entonces, calcular los requerimientos hídricos anuales, por tipo de producto y cantidad de producción.

Una de las ventajas de la plataforma STELLA empleada para la simulación del modelo, es que arroja los resultados obtenidos en la forma de formatos que pueden ser tablas o figuras, como lo muestra la FIGURA 16, que señala el comportamiento de las demandas sectoriales desde el año 2003 hasta el 2035.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 16 – Proyección de la demanda sectorial de agua ( $m^3 \text{ año}^{-1}$ ).

Tomando en cuenta en el lado de la demanda, los requerimientos ambientales, los del sector agrícola y de la población; podemos observar que en términos porcentuales la demanda agrícola representa el 13% en 2011, 15% en 2019, 17% en 2027, y 20% en 2035. Los datos base para la estimación de la demanda agrícola se presentan en el anexo A.

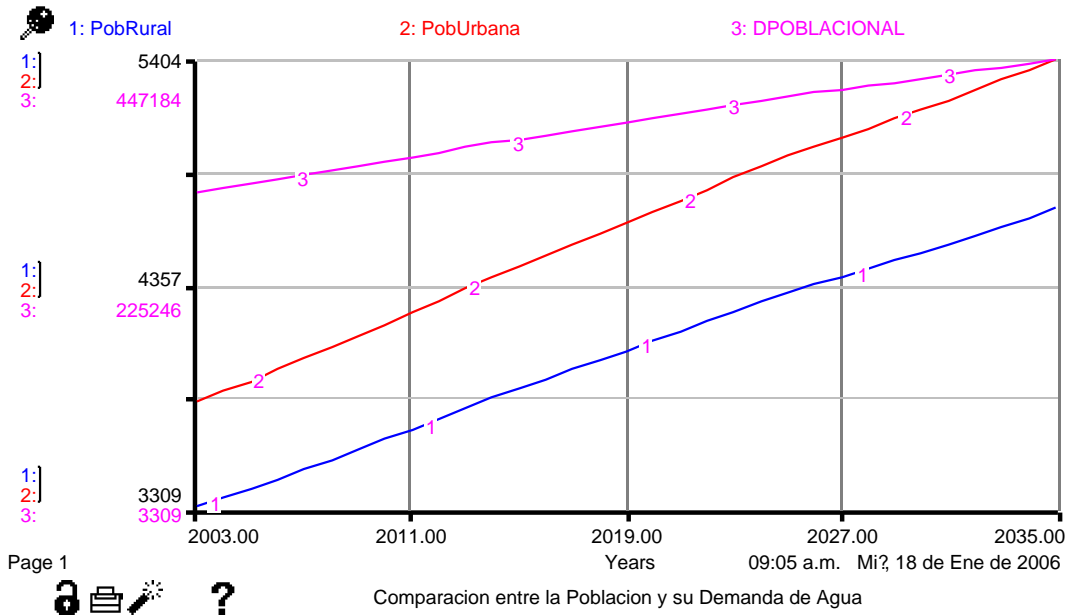
La demanda de la población corresponde al 0.9% en 2011 y en 2019, 0.95% en 2027, y 1% en 2035.

La demanda ambiental, ha sido considerada como constante en 33.5 millones de  $m^3 \text{ año}^{-1}$ . Como se señaló con anterioridad, esto es equivalente a una oferta mínima de agua, la cual es indispensable para mantener la vida de los ecosistemas del lugar, y representa el 86% de la demanda en 2011, el 84% en 2019, el 82% en 2027, y el 79% en 2035.

Es importante señalar que el desarrollo de la agroindustria y de la urbanización aumentará gradualmente el porcentaje de agua demandado por dichos sectores. De forma similar, responde el sector agrícola, que verá incrementados

sus requerimientos de agua, al ser incorporadas más tierras con riego al cultivo y al incrementarse la actividad pecuaria.

La Figura 17 muestra el comportamiento de la población y de la demanda de agua en el área de estudio.



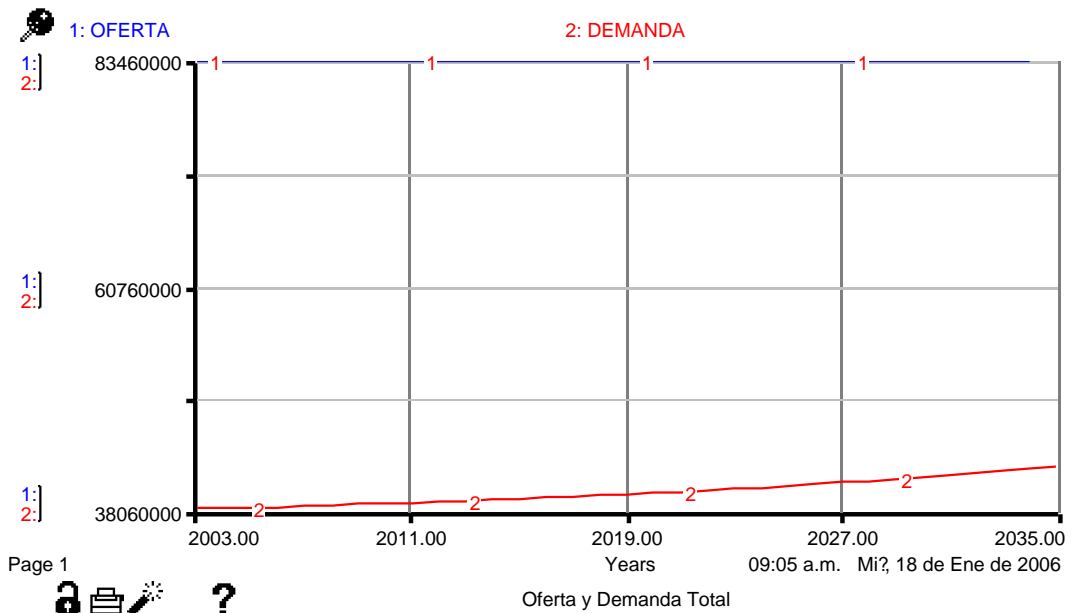
Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 17 – Comparativo entre el crecimiento poblacional (hab.) y su demanda de agua ( $m^3 \text{ año}^{-1}$ ).

La población y la demanda doméstica de agua en 2011, 2019, 2027 y 2035 en el municipio, son respectivamente de: 7613 habitantes y  $336,730 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ; 8153 y  $360,606$ ; 8731 y  $386,176$  y de 9350 habitantes y  $413,558 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . Como podemos observar, la población crece de forma lenta, lo que incide en que la demanda de agua de este sector, incremente muy poco a lo largo del período de estudio. Las proyecciones acerca de la tasa de crecimiento de la población de Minas Gerais, así como en general para Brasil, indican que esta tiende a experimentar una disminución en su ritmo, por lo que es de esperar que la demanda de agua por este concepto, tienda a incrementar de forma muy lenta.

Situación que podría revertirse, si existiera una fuerte migración al municipio, factor que podría incorporarse en estudios posteriores.

La Figura 18 relaciona la oferta y demanda total de agua. Se ha supuesto la oferta de 83.5 millones de  $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ , se mantiene constante, a lo largo del período estudiado. La demanda es de 38.8 millones de  $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$  en 2011; 39.6 en 2019; de 40.8 en 2027, llegando a 42.2 millones de  $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$  en 2035.



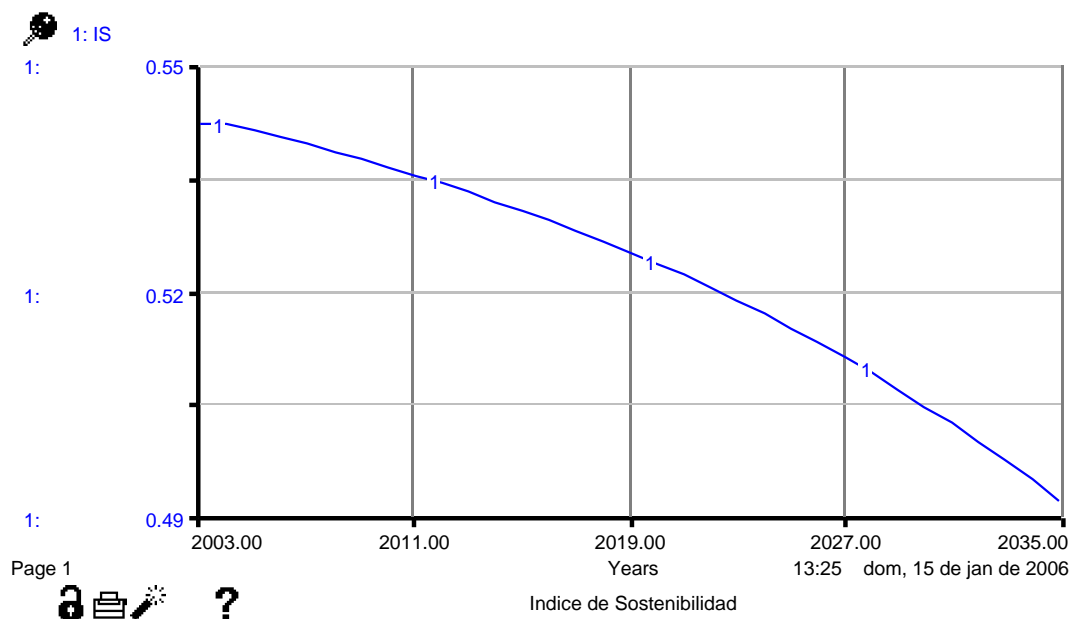
Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 18 – Proyección de la oferta y demanda de agua total ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ).

Dentro de las demandas estudiadas, la mayor parte del agua requerida, esta destinada a las actividades agrícolas. Esto evidencia, la vocación del municipio ya que la agricultura es la actividad económica principal del mismo. Dentro de los cultivos, los más importantes tanto en lo que respecta al área cultivada, producción y consumo de agua son: el café, maíz y frijol. En la pecuaria destacan la bovinocultura, suinocultura y avicultura. La actividad pecuaria, es la de mayor dinamismo, dentro del sector agrícola, experimentando un crecimiento del 5% anual (Anexo A, Tabla 9A).

La Figura 19 muestra la trayectoria del Índice de Sostenibilidad. Como especificamos en la sección 2.5.2 de la presente investigación, si el valor del IS es mayor a 0.2 eso indica un bajo o ningún stress en la oferta de agua, lo que implica que la demanda de agua es menor o igual al 80% de la oferta potencial de agua. Valores menores a 0.2 reflejan condiciones de vulnerabilidad, lo que supone que la demanda de agua es mayor al 80% de la oferta potencial de agua. Valores iguales a cero indican que la oferta de agua es insostenible, lo que sugiere que la demanda de agua es igual, o excede a toda la disponibilidad de recursos hídricos locales.

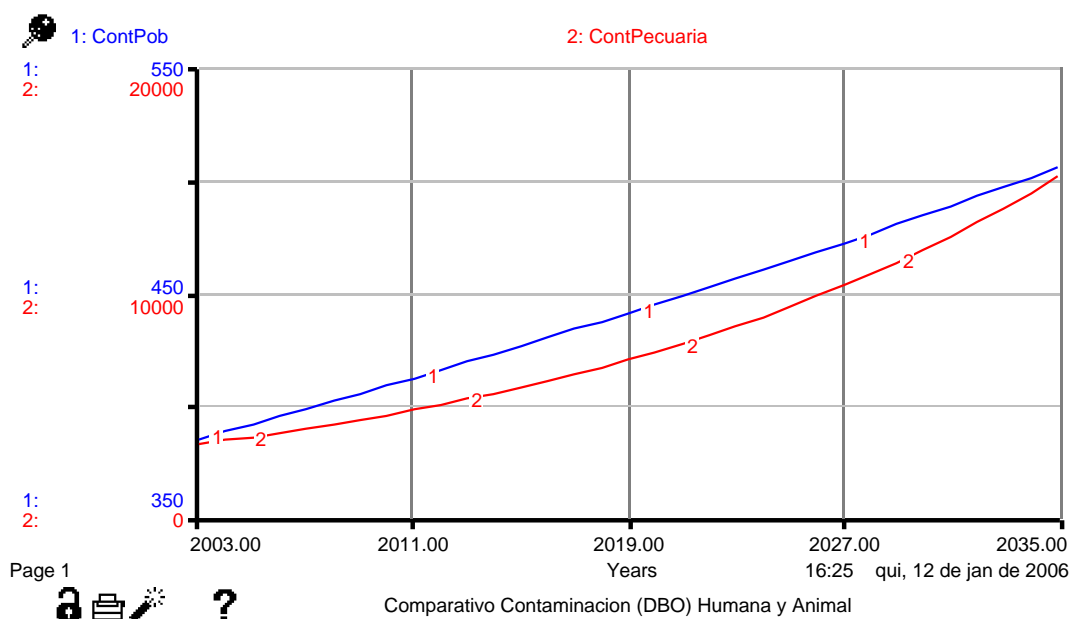
El IS es de 0.54 para 2011; 0.53 para 2019; 0.51 en 2027 y de 0.49 en 2035. Lo que nos indica que se está utilizando un promedio del 50% del agua disponible, por lo que el sistema estaría siendo explotado de forma sustentable.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 19 – Índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035.

La Figura 20 muestra los niveles de DBO vertidos al Río Casca, proyectados para el período 2003-2035, mismos que se especifican de forma detallada en la Tabla 3. Para fines comparativos es importante especificar que de acuerdo con Sperling (1996), las aguas negras domésticas poseen un nivel de DBO de  $300 \text{ mg L}^{-1}$ , lo que quiere decir que un litro de aguas negras consume aproximadamente 300 mg de oxígeno, en cinco días, durante el proceso de estabilización de la materia orgánica carbónica.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 20 – Niveles de DBO ( $\text{kg d}^{-1}$ ), proyectados para la población y la pecuaria.

Tabla 3 – Carga contaminante de origen humano y animal

Período	2011	2019	2027	2035
Humana (DBO en $\text{kg. d}^{-1}$ )	411	440	472	505
Animal (DBO en $\text{kg. D}^{-1}$ )	4,683	6919	10,222	15,103
DBO ( $\text{mg L}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) vertidos al cuerpo de agua	0.11	0.17	0.25	0.38

Fuente: Resultados de la investigación.

Es importante ilustrar en este aspecto, que la contaminación generada por la actividad pecuaria equivale en 2011 a la que genera una población humana de 86,719 personas; en 2019 a la que crean 128,123 individuos; en 2027 a la generada por 189,300 y en 2035 a la causada por 280,000. Esto nos revela que la calidad del agua esta siendo seriamente afectada por esta actividad. Triplicándose en el período el nivel de DBO, que se vierte al curso de agua. Siendo responsabilidad de la actividad pecuaria, más del 90% de la contaminación por DBO, de las aguas del municipio.

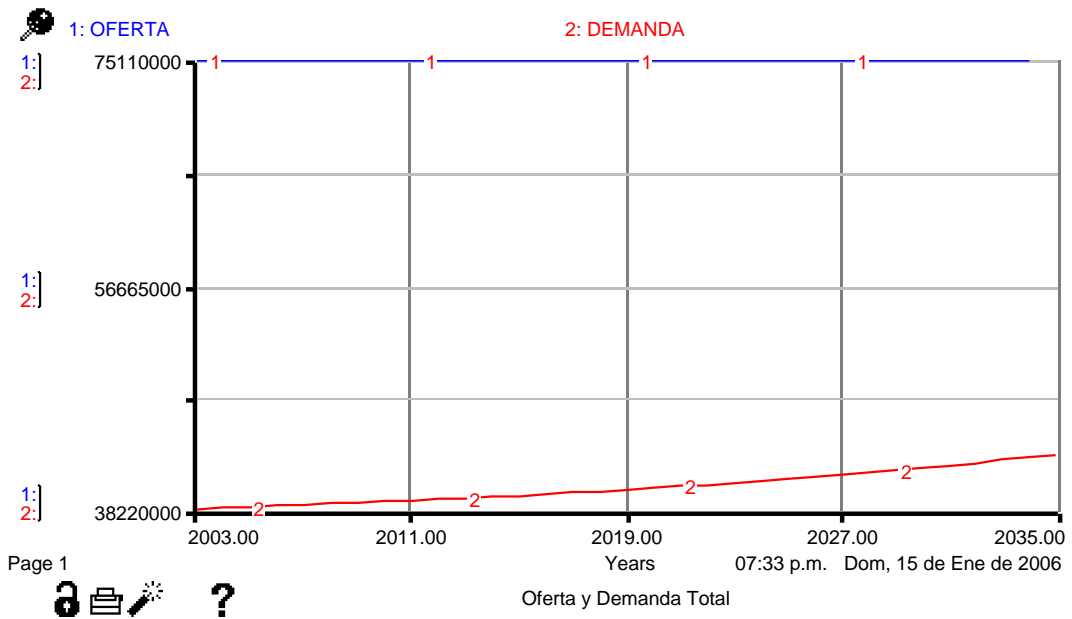
### **3.2.2. Escenario 2: disminución de la oferta de agua en 10% debido a variaciones climáticas**

En el escenario 2, se supone, una disminución en la oferta disponible de agua del 10%, debido a cambios climáticos.

La Figura 21 nos muestra la proyección de la oferta y demanda de agua. En este escenario hemos supuesto, que debido a factores climáticos, la oferta de agua sufre una reducción del 10%. Por lo que ésta, se reduce a 75.5 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ , que se mantiene constante, a lo largo del período estudiado. La demanda no sufre alteraciones, por lo que, al igual que en el escenario 1, es de: 38.8 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$  en 2011; 39.6 en 2019; de 40.8 en 2027, llegando a 42.2 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$  en 2035.

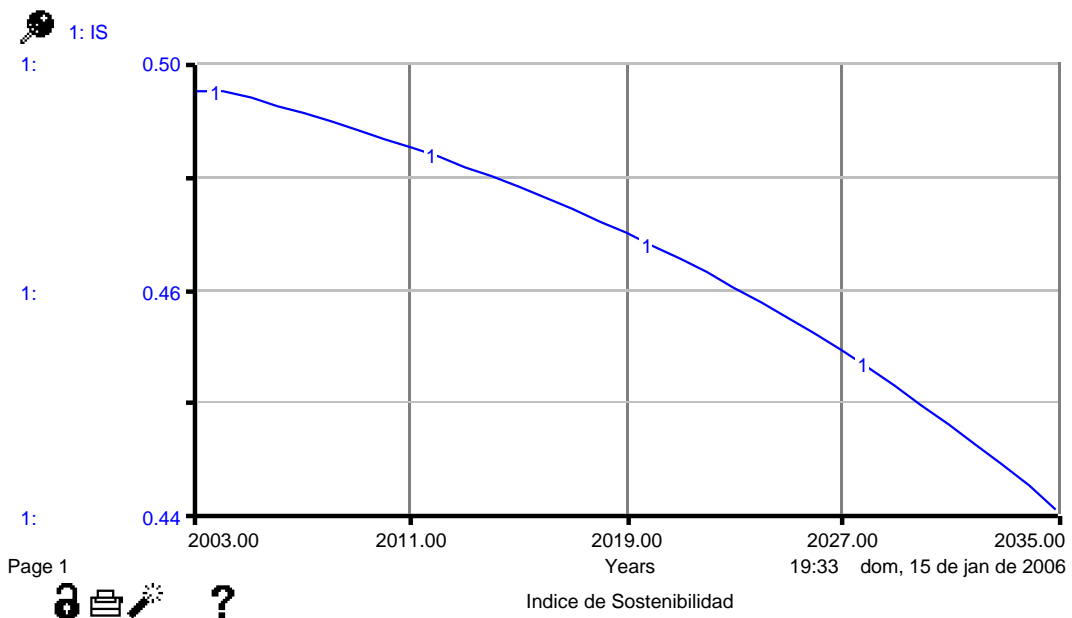
La Figura 22 muestra la trayectoria del Índice de Sostenibilidad. Este Índice es de 0.48 para 2011; 0.47 para 2019; 0.46 en 2027 y de 0.44 en 2035. Lo que nos indica que se esta utilizando un 56% del agua disponible. Quedando un margen de 24% de disponibilidad de uso del agua, para que se mantenga la sustentabilidad en la explotación del sistema. La reducción de 10% en la oferta de agua, reduce el IS en un 3%, con respecto al escenario 1.

La Figura 23 muestra los niveles de DBO, que son arrojados diariamente al cuerpo de agua y que son de 0.13  $\text{mg L}^{-1}$  en 2011; 0.21 en 2019; 0.31 en 2027 y 0.48 para 2035. La reducción en la oferta de agua hace que los niveles de DBO, sean mayores que en el escenario 1, en 0.06  $\text{mg L}^{-1}$ , en promedio.



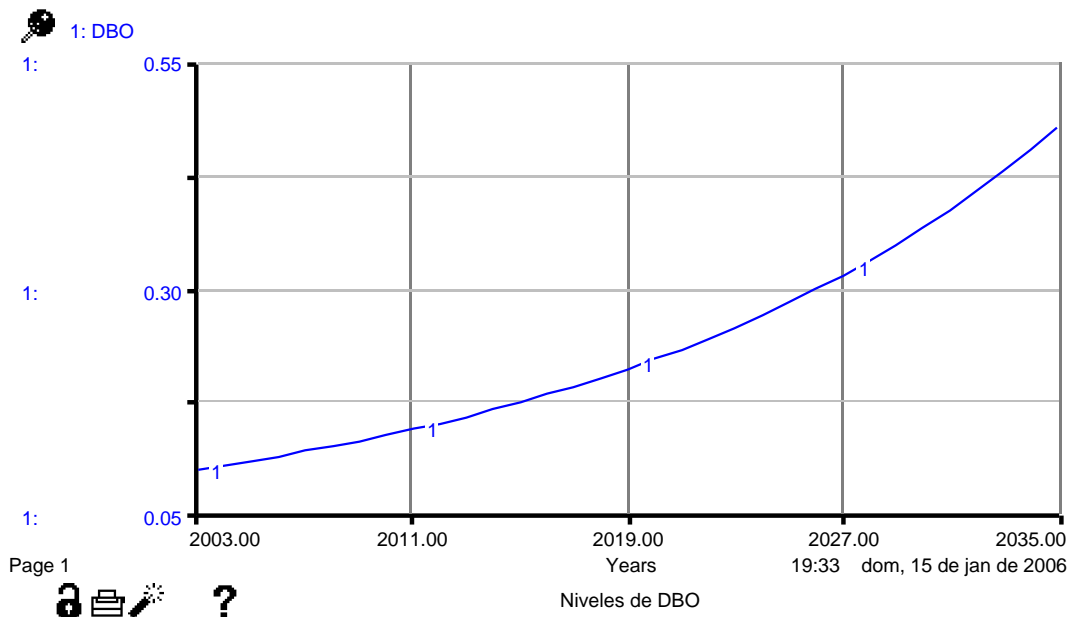
Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 21 – Escenario 2: proyección de la oferta y demanda de agua total (m³ año⁻¹).



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 22 – Escenario 2: índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035.



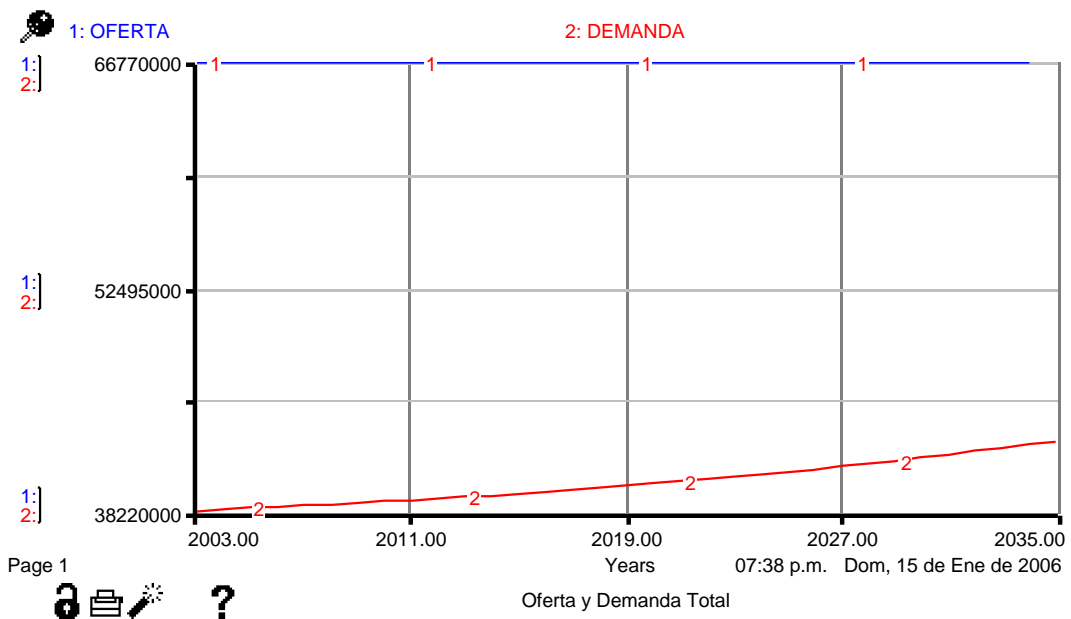
Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 23 – Escenario 2: niveles de DBO (mgL<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), vertidos al cuerpo de agua.

### 3.2.3. Escenario 3: disminución de la oferta de agua en 20% debido a variaciones climáticas

En el escenario 3, se supone, una disminución en la oferta disponible de agua del 20%, debido a cambios climáticos.

La Figura 24 nos muestra la proyección de la oferta y demanda de agua. En este escenario hemos supuesto, que debido a factores climáticos, la oferta de agua sufre una reducción del 20%. Por lo que ésta, se reduce a 66.8 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, que se mantiene constante, a lo largo del período estudiado. La demanda no sufre alteraciones, por lo que, al igual que en el escenario 1, es de: 38.8 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> en 2011; 39.6 en 2019; de 40.8 en 2027, llegando a 42.2 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> en 2035.

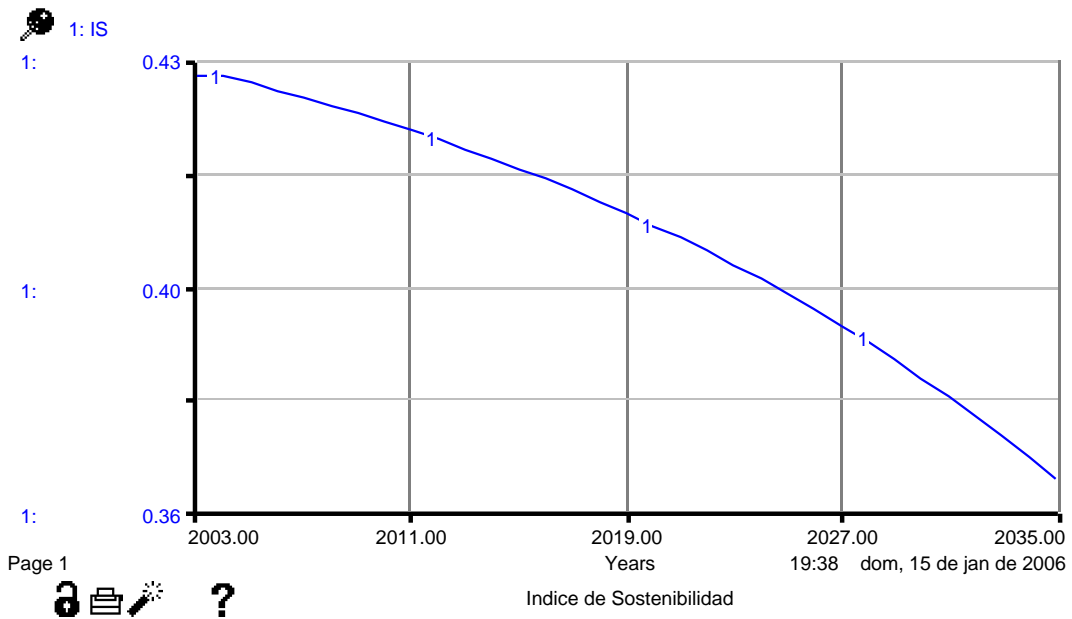


Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 24 – Escenario 3: proyección de la oferta y demanda de agua total (m³ año⁻¹).

La Figura 25 muestra la trayectoria del Índice de Sostenibilidad. Este Índice es de 0.42 para 2011; 0.41 para 2019; 0.39 en 2027 y de 0.36 en 2035. Lo que nos indica que se está utilizando un promedio del 60%, del agua disponible. Quedando un margen de 20% de disponibilidad de uso del agua, para que se mantenga la sustentabilidad en la explotación del sistema.

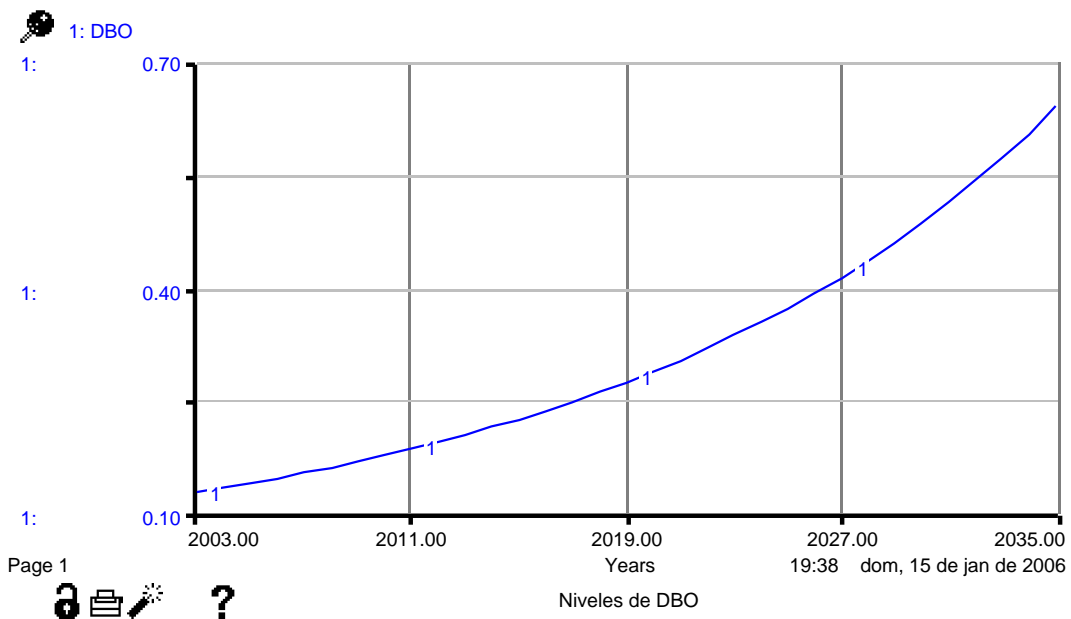
La reducción de 20% en la oferta de agua, reduce la disponibilidad de este recurso, en un 10% con respecto al escenario 1. De lo que podemos deducir, que una disminución en la oferta de agua de esta magnitud, ya tiene una repercusión importante, en la sustentabilidad del sistema, por lo que se va haciendo necesaria, la implementación de políticas que lleven a mejorar la eficiencia de uso del agua en el municipio.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 25 – Escenario 3: índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035.

La Figura 26 muestra los niveles de DBO, que son arrojados diariamente al cuerpo de agua y que son de 0.18 mg L<sup>-1</sup> en 2011; 0.27 en 2019; 0.41 en 2027 y 0.64 para 2035. La reducción en la oferta de agua hace que los niveles de DBO, sean mayores que en el escenario 1, en 0.15 mg L<sup>-1</sup>, en promedio.



Fuente: Resultados de la investigación.

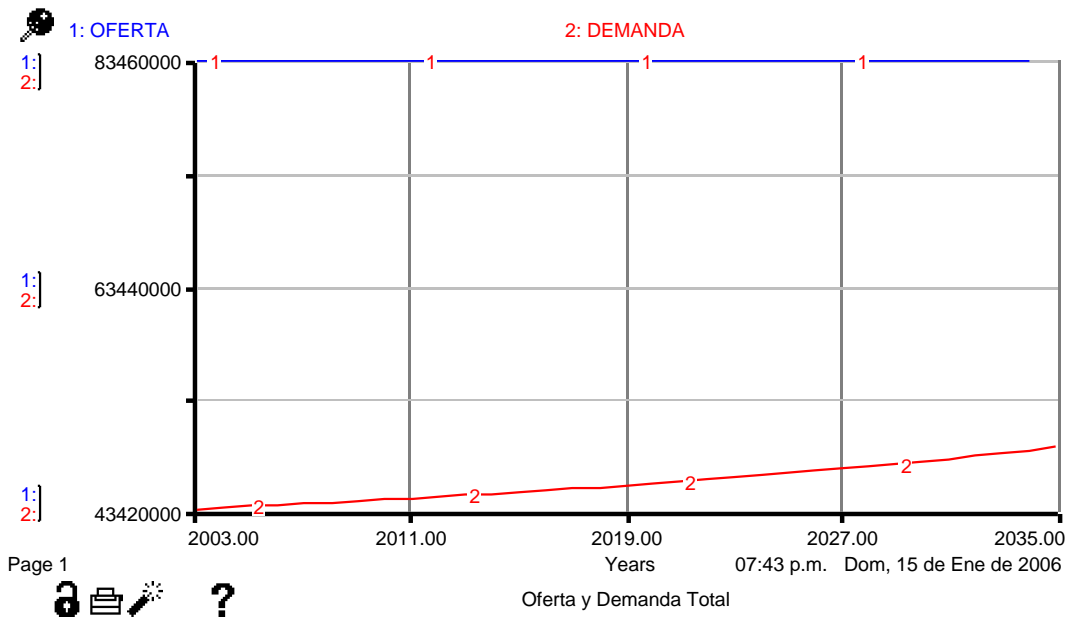
Figura 26 – Escenario 3: niveles de DBO (mg L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), vertidos al cuerpo de agua.

### 3.2.4 Escenario 4: 50% de la cantidad de tierras cultivadas tienen riego

En el escenario 4, se supone, que el 50% de las tierras cultivadas en el municipio tienen sistemas de riego.

La Figura 27 muestra la proyección de la oferta y demanda de agua. En el presente escenario hemos supuesto, que del monto total de tierras cultivadas, el 50% tiene riego. La oferta de agua no sufre alteraciones, manteniéndose, en un nivel de 83.5 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, que permanece sin modificaciones, a lo largo del período estudiado. La demanda experimentará incrementos significativos, debido a los mayores requerimientos de agua por parte del sector agrícola, pasando a: 44.4 MMC año<sup>-1</sup> en 2011; 45.5 en 2019; a 47 en 2027, llegando a casi 49 MMC año<sup>-1</sup> en 2035. Aumentando en promedio 8 MMC año<sup>-1</sup>, con respecto al escenario 1. Lo anterior nos indica, que los cambios que experimenta la demanda de agua, están fuertemente influenciados por lo que ocurra en el sector agrícola del municipio, sobre todo en lo que respecta a la incorporación de tierras con riego

para cultivos. Lo que se convierte en un fuerte determinante de la demanda de agua, de dicho sector.

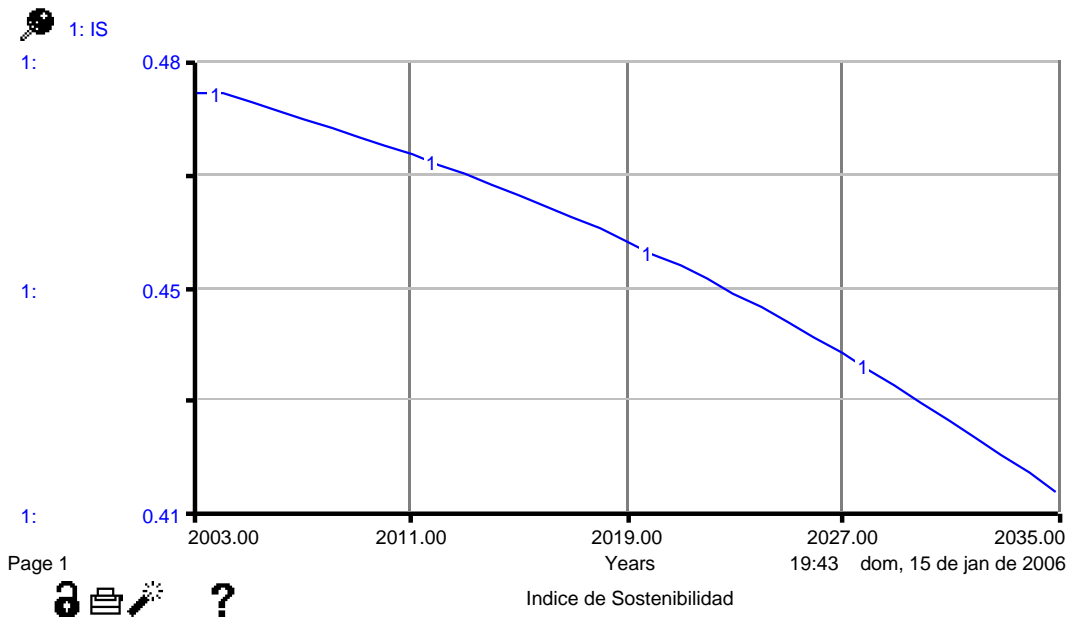


Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 27 – Escenario 4: proyección de la oferta y demanda de agua total (m³ año⁻¹).

La Figura 28 muestra la trayectoria del Índice de Sostenibilidad. El Índice antes referido, es de 0.47 para 2011; 0.46 para 2019; 0.44 en 2027 y de 0.42 en 2035. Lo que nos indica que se está utilizando un promedio del 55%, del agua disponible. Quedando un margen de de 25% de disponibilidad de uso del agua, para que se mantenga la sustentabilidad en la explotación del sistema.

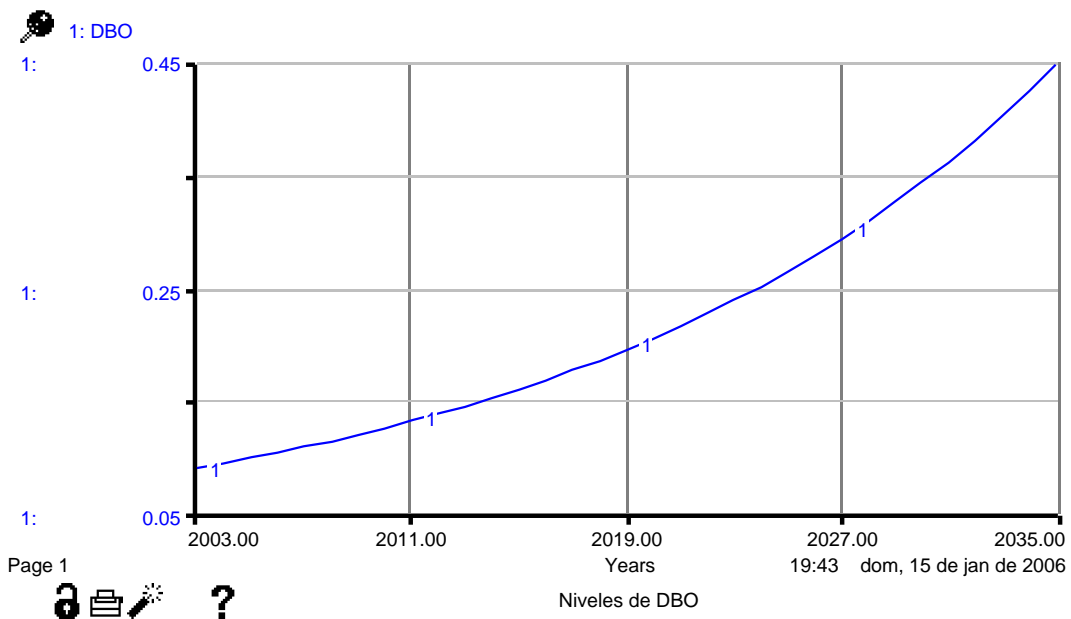
El incremento en la demanda de agua, reduce la disponibilidad de este recurso, en un 5% con respecto al escenario 1. De lo que podemos deducir, que un incremento en la demanda de agua de esta magnitud, no tiene una repercusión muy importante en lo que respecta a la sustentabilidad del sistema, por lo que aún se cuenta con un margen adecuado, para la incorporación de sistemas de riego en los cultivos.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 28 – Escenario 4: índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035.

La Figura 29 muestra los niveles proyectados de DBO, que son arrojados diariamente al cuerpo de agua y que son de  $0.13 \text{ mg L}^{-1}$  en 2011;  $0.19$  en 2019;  $0.29$  en 2027 y  $0.45$  para 2035. El aumento en la demanda de agua hace que los niveles de DBO, sean mayores que en el escenario 1, en  $0.04 \text{ mg L}^{-1}$ , en promedio. En este aspecto es importante destacar, que en el presente estudio el nivel de DBO, esta determinado por la población humana y animal, ya que no se encontró información adecuada sobre la contaminación generada por las actividades agrícolas en los cuerpos de agua del municipio; de esta forma en el presente trabajo, no repercuten de forma directa sobre este indicador aunque es sabido que la realidad es diferente.



Fuente: Resultados de la investigación.

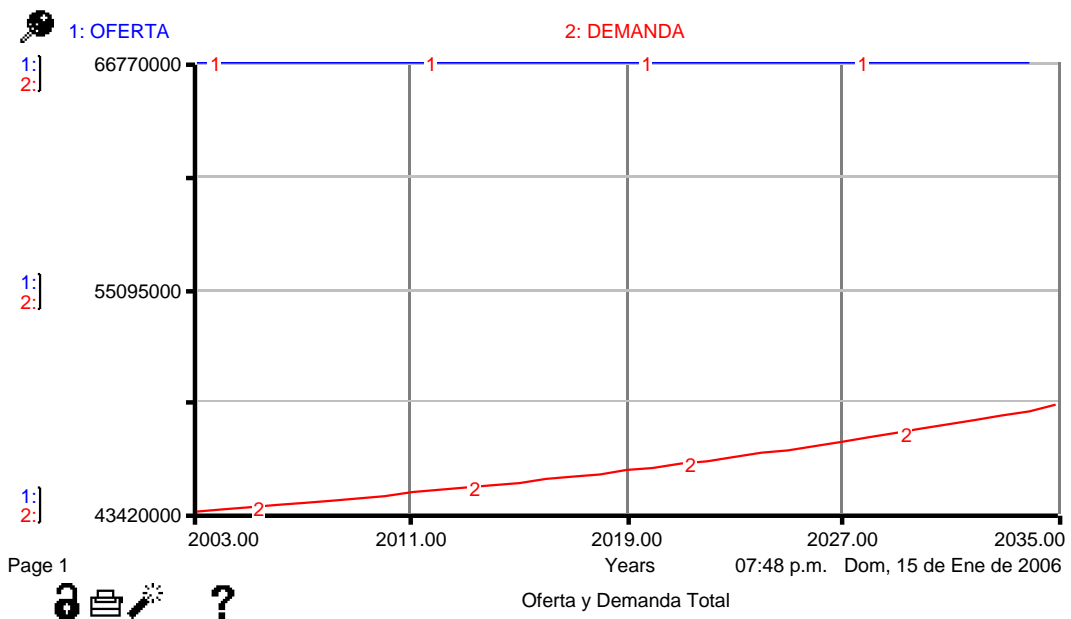
Figura 29 – Escenario 4: niveles de DBO (mg L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) vertidos al cuerpo de agua.

### 3.2.5. Escenario 5: combinación de los escenarios 3 y 4

En el escenario 5 se combinan los escenarios 3 y 4, suponiendo por un lado, que hay un 20% de disminución en la oferta de agua disponible, debido a variaciones climáticas, y por otro, que el 50% de las tierras cultivadas en el municipio tienen sistemas de riego.

La Figura 30 muestra la proyección de la oferta y demanda de agua. En este escenario hemos combinado los escenarios 3 y 4, que suponen, por un lado, una reducción en la oferta de agua del 20% y por el otro que el 50% de las tierras cultivadas cuentan con riego. La oferta de agua, se reduce a 66.8 MMC año<sup>-1</sup>, que se mantiene constante, a lo largo del período estudiado.

Como se indica en el escenario 4, la demanda experimentará incrementos significativos, debido a los mayores requerimientos de agua por la incorporación de más tierras con riego al cultivo, pasando a: 44.4 MMC año<sup>-1</sup> en 2011; 45.5 en 2019; a 47 en 2027, llegando a casi 49 MMC año<sup>-1</sup> en 2035.

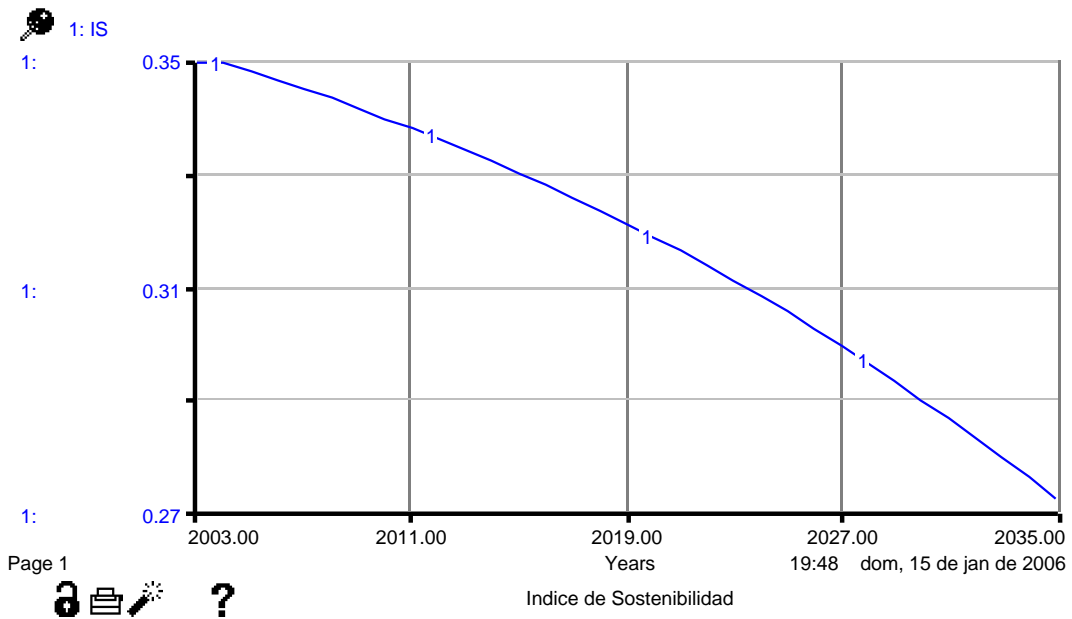


Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 30 – Escenario 5: proyección de la oferta y demanda de agua total (m³ año⁻¹).

La Figura 31 muestra la trayectoria del Índice de Sostenibilidad. Constituyéndose en 0.34 para 2011; 0.32 para 2019; 0.30 en 2027 y de 0.27 en 2035. Lo que nos indica que se está utilizando un promedio del 70%, del agua disponible. Quedando un margen del 10% de disponibilidad de uso del agua, para que se mantenga la sustentabilidad en la explotación del sistema.

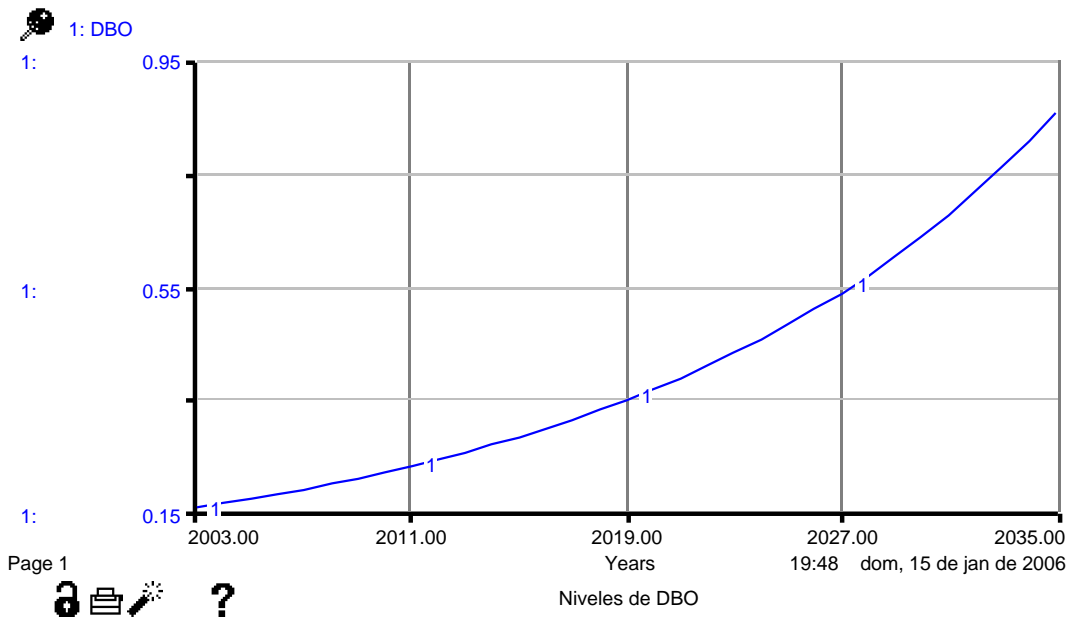
Derivado de lo anterior, podemos afirmar que tanto la disminución en la oferta de agua, como el incremento en la demanda de éste recurso, están reduciendo de forma significativa la disponibilidad del mismo, en un 20% con respecto al escenario 1. Pudiéndose afirmar entonces, que al combinar ambos factores se genera un fuerte impacto en lo que respecta a la sustentabilidad del sistema, acercándose éste a una situación de stress o vulnerabilidad, que es cuando el Índice llega a 0.2, nivel que señala, el uso de 80% de la oferta de agua disponible. Por lo que, al llegar el sistema a ese nivel, se torna importante el estudio y la aplicación de políticas que ayuden a controlar esta situación.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 31 – Escenario 5: índice de sostenibilidad proyectado para el período 2003-2035.

La Figura 32 muestra los niveles proyectados de DBO, que son arrojados diariamente al cuerpo de agua y que son de 0.23 mg L<sup>-1</sup> en 2011; 0.34 en 2019; 0.53 en 2027 y 0.86 para 2035. Tanto la reducción de la oferta de agua como el aumento de la demanda, hacen que los niveles de DBO, sean mayores que en el escenario 1, en 0.26 mg L<sup>-1</sup>, en promedio. Este escenario presenta los mayores niveles de DBO, con respecto a los otros escenarios, evaluados.



Fuente: Resultados de la investigación.

Figura 32 – Escenario 5: niveles de DBO (mg L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), vertidos al cuerpo de agua.

### 3.2.6. Análisis de la sostenibilidad de los recursos hídricos

La comparación de los IS obtenidos, a través de las diferentes simulaciones se hace con el objetivo de evaluar el impacto que cada escenario tiene sobre la oferta disponible de agua (Tabla 4).

Tabla 4 – Índice de sostenibilidad estimado en los diferentes escenarios

Escenario/periodo	2011	2019	2027	2035
1	0.54	0.53	0.51	0.49
2	0.48	0.47	0.46	0.44
3	0.42	0.41	0.39	0.36
4	0.47	0.46	0.44	0.42
5	0.34	0.32	0.30	0.27

Fuente: Resultados de la investigación

Al analizar los diferentes escenarios, podemos observar que, los IS obtenidos en el primer escenario, muestran que de mantenerse las tendencias actuales de crecimiento en los parámetros del modelo, el sistema no presenta una situación de *stress* o sobreexplotación durante el período estudiado, permitiendo incluso, el aumento en las actividades productivas de carácter, agrícola y/o agroindustrial, ya que aún se tiene un margen de aproximadamente un 30% de disponibilidad de recursos hídricos.

Con respecto al segundo escenario, en el que se ha supuesto una reducción en la oferta de agua, del 10%, la situación es similar a lo que sucede en el escenario anterior, al final del período estudiado, se llega a una utilización del 56% de la oferta de agua disponible, restando aún un monto del 24% que puede usarse sin afectar la sostenibilidad del sistema.

En el tercer escenario, se consideró una reducción en la oferta del 20%. Ésta reducción ocasiona que la disponibilidad de agua pase al 16%. Con respecto al primer escenario, la disponibilidad de agua se reduce a la mitad, lo que estaría indicando, que una reducción en la oferta de ésta magnitud, afecta significativamente la cantidad del recurso disponible. Por lo que es importante prestar atención a los cambios climáticos y a los efectos que ocasionan sobre los recursos naturales, en particular el agua, objeto de estudio del presente trabajo.

El cuarto escenario supone, la incorporación al riego del 50% de las tierras cultivadas en el municipio. Como se ha indicado con anterioridad, el sector agrícola es determinante en la demanda de agua, por lo que cualquier tipo de políticas que tiendan a variar la dinámica del sector, conllevará efectos significativos sobre los insumos requeridos por las actividades tanto pecuarias como de cultivos. En este sentido, se deben estudiar cuidadosamente, el tipo de actividades que deben potenciarse, así como las tecnologías que se adopten, buscando el fomento de aquéllas que sean eficientes en el uso del agua y que tiendan a utilizar métodos y técnicas amigables con el medio ambiente. En síntesis, procurar una agricultura sustentable. Con respecto al IS, estimado para el período, podemos decir, al compararlo con los resultados obtenidos en el primer escenario,

que la disponibilidad del recurso se reduce en un 10%, ya que se está utilizando un promedio del 60% del agua disponible, quedando un 20% de disponibilidad.

Por último, en el quinto escenario, donde se combina una reducción en la oferta con un incremento en la demanda; se obtienen los IS más bajos, acercándose éstos al nivel de 0.2, que es considerado como de *stress* o de vulnerabilidad del sistema de recursos hídricos, por lo que es importante estar atentos tanto a la evolución de la oferta como de la demanda de dichos recursos, pues medidas que lleven a un acelerado crecimiento de las actividades agrícolas y agroindustriales en el Municipio, pueden afectar seriamente los recursos del lugar, reduciendo su disponibilidad para las futuras generaciones.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se han examinado cinco escenarios que comprenden futuros aumentos en la demanda de agua y restricciones en la oferta de este recurso, a fin de evaluar la sustentabilidad de la oferta de agua disponible, en el municipio de São Miguel do Anta.

Las tendencias actuales del sistema de recursos hídricos del municipio, indican a través del índice de sostenibilidad calculado, que el sistema no está en una situación de sobreexplotación o *stress*. Se está utilizando el 50% del agua disponible en la región; contándose aún con un 30% de excedente que puede ser utilizado sin perjudicar la sostenibilidad del sistema.

En lo que respecta a la calidad del agua, la sostenibilidad del sistema se encuentra bastante afectada, pues los antecedentes en cuanto a calidad del recurso indican que este es considerado como de clase 3 y 4, o sea que tiene un alto grado de contaminación.

Aunado a lo anterior, los resultados muestran que tan sólo por residuos animales y humanos se produce una carga contaminante diaria, equivalente a la que produciría una población de aproximadamente 66,000 habitantes en el municipio y de seguir las tendencias actuales se llegaría en 2035, a tener una contaminación equivalente a la que produce una población de casi 300,000 personas . Si a esto le agregamos que en el municipio no existe ningún tipo de

tratamiento de las aguas residuales, tanto de origen humano, agropecuario o agroindustrial, podemos concluir entonces que el futuro del recurso en éste aspecto no es nada alentador.

Por lo que se hace necesario que a nivel local se tomen algunas decisiones para contrarrestar la creciente contaminación del agua, a través del uso de tecnologías más amigables con el medio ambiente, y de la colecta y tratamiento de aguas residuales, para su posterior reutilización.

Es importante destacar que las actividades productivas del municipio se encuentran concentradas en el sector agrícola. La participación de este sector en la demanda hídrica es importante, por lo que las políticas que se implementen para dinamizarlo, deben ser cuidadosamente estudiadas, ya que tendrán un impacto importante sobre la demanda de agua, lo cual repercutirá de forma directa en la sostenibilidad de éste recurso en el municipio. Por lo que se debe actuar con cautela, al momento de tomar decisiones con respecto ha dicho sector.

Dentro de los escenarios estudiados los primeros cuatro, presentan tendencias similares, la situación se torna diferente en el quinto escenario, en el cual se contempla, una reducción en la oferta, debido a factores climáticos; sumada a un incremento en la demanda del sector agrícola. El IS en éste escenario, se acerca a 0.2 que estaría indicando ya un uso insustentable de los recursos hídricos. Lo que evidencia la necesidad de estudiar muy bien el tipo de actividades que deben fomentarse en São Miguel do Anta y la magnitud de las mismas. A fin de asegurar que las actuales y futuras generaciones cuenten con los recursos hídricos necesarios y no sufran escasez tanto, en cantidad como en calidad, de los mismos.

El presente trabajo puede servir como punto de partida para futuras investigaciones sobre los recursos hídricos del municipio, da bases e informaciones para posteriores análisis, siendo éste trabajo, pionero en el abordaje de esta problemática, desde la óptica de la dinámica de sistemas. Asimismo ofrece informaciones que pueden ayudar en la toma de decisiones de programas de fomento, como es el caso del PRONAF, para que incorporen recursos destinados a que las actividades productivas que apoyan, adopten tecnologías y sistemas de producción amigables con el medio ambiente, a fin de minimizar los impactos

ambientales que causan y de procurar el uso sustentable de los recursos naturales, particularmente el agua, en el municipio.

A medida que aumente la disponibilidad de datos, acerca del área de estudio, el modelo se puede ir completando y perfeccionando con nuevas interrelaciones, ya que este trabajo solo ha utilizado datos del caudal que el afluente de agua principal, el Río Casca tiene en el área del municipio, haciendo abstracción tanto en cantidad como en calidad de las aguas que provienen de otros municipios y de otras fuentes internas menos importantes.

Por lo que podrían aparecer nuevas fuentes que estaban desapercibidas, o no incorporadas, nuevas demandas, ó nuevos arreglos espaciales, ó la implementación de nuevas tecnologías, por lo que podrían crearse interrelaciones que no existían con anterioridad.

Es necesario que el asunto de los recursos hídricos, tenga prioridad política para que los planes de desarrollo económico que impulsa el gobierno federal y los gobiernos estatales y municipales, destinen recursos para educación ambiental, capacitación con respecto a la gestión eficiente del uso del agua, asistencia técnica sobre la adopción de tecnologías limpias en las actividades productivas y para que los mismos planes contemplen recursos para determinar los impactos ambientales que su implementación conllevara y la forma de minimizarlos.

Los gobiernos en sus diferentes niveles de actuación, están en el deber de asegurar a los ciudadanos el derecho al uso del agua, por lo que deben destinarse recursos específicos para asegurar a largo plazo la reproducción de dicho recurso, que es un bien indispensable para la vida humana. Es necesario procurar la sustentabilidad del mismo tanto en lo que respecta a su cantidad como a su calidad. Por lo que deben buscarse soluciones propias a las realidades locales en las que se involucre a todos los usuarios y a los responsables por el diseño, implementación y gestión de las políticas públicas relativas al recurso, así como al de los demás factores que intervienen directamente en su reproducción.

Por último es importante señalar, que el enfoque de dinámica de sistemas, utilizado en este trabajo ha mostrado ser muy eficiente para la simulación de un

sistema complejo de recursos hídricos. Su mérito reside en la velocidad con que se puede desarrollar el modelo, facilidad para mejorar el mismo y las posibilidades que da para efectuar análisis de sensibilidad. A través del MASMA, se puede evaluar el desempeño del sistema bajo la aplicación de diferentes políticas, restricciones en el empleo del recurso, bajo diferentes opciones de conservación y modificaciones en los requerimientos ecológicos y ambientales de agua. Posibilitando además el análisis de escenarios distintos a los evaluados en este trabajo ya que se dan las bases sobre las cuales se pueden hacer diferentes suposiciones.

Sin embargo, es preciso destacar que el enfoque de dinámica de sistemas es más adecuado para indicar la dinámica interna del modelo, que para predecir el exacto futuro del sistema. Por lo que uno de los aspectos importantes del presente trabajo está en dar las bases para estudiar y evaluar la dinámica interna de comportamiento del sistema de recursos hídricos del municipio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, S.; SIMONOVIC, S.P. Systems dynamics modeling of reservoir operations for flood management . **ASCE**, v. 14, n. 3, p. 190-198, 2000.

AL-RASHED, M.F.; SHERIF, M.M. Water resources in GCC countries: an overview. **Water Resources Management**, n. 4, p. 59-75, 2000.

AL-WESHAD, R.A. Optimal use of irrigation water in the Jordan Valley: a case study. **Water Resources Management**, n. 14, p.327-338, 2000.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE. **Federal policies in water resources planning**. New York, 1985.

ARACIL, J. **Introducción a la dinámica de sistemas**. España: Alianza Universidad, 1986.

AVELLAR, S.O.C. **Estratégias de comercialização em laticínios de pequeno porte**: uma abordagem de dinâmica de sistemas. 2002. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BACH, N.L.; SAAED, K. Food self-sufficiency in Vietnam: a search for a viable solution. **System Dynamics Review**, n. 8, p. 129-148, 1992.

BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System Dynamics Review**, n. 12, p. 183-210, 1996.

BAUMGARTNER, A.; REICHEL, E. **The world water balance**. New York: R. Oldenburg Verlag, Munich, Germany and Elsevier Scientific Publishing Co., 1975. 54 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normas climatológicas (1961-1990)**. Brasília, 1992. 84 p.

CASTERARD, M.A.; HERRERO, J. Irrivol: a method to estimate the yearly and monthly water applied in an irrigation district. **Water Resources Res.**, v. 34, n. 11, p. 3045-3049, 1998.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 588 p.

COMISSÃO MUNDIAL PARA O MEIO AMBIENTE E O DESENVOLVIMENTO – CMMAD. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1988. 430 p.

COSGROVE, W.J.; RIJSBERMAN, F.R. **World water vision for the world water council**. London: Earthscan Publications Ltd., 2000. 120 p.

DANIELSON, L.E. An analysis of residential demand for water using micro time-series data. **Water Resources**, v. 14, n. 4, p. 763-767, 1979.

DENARDI, R.A.; HENDERIKX, E.; BORGES, D.; BIANCHINI, V. **Fatores que afetam o desenvolvimento local em pequenos municípios do Paraná**. Disponible en: <<http://www.cria.org.br>>. Accesado en: marzo 2005.

DOWS, T.J.; MAZARI-HIRIART, M.; DOMINGUEZ MORA, R.; SUFFET, I.H. Sustainability of least cost policies for meeting Mexico city's future water demand. **Water Resources**, v. 36, n. 8, p. 2321-2339, 2000.

EHLERS, E. **Agricultura sustentável: origens e perspectivas de um novo paradigma**. 2.ed. Guaíba, 1999.

ENVIRONMENT CANADA – EC. **Federal water policy**. Ottawa, 1993.

FALKENMARK, M. The massive water scarcity now threatening Africa – why isn't it being addressed? **Ambio**, v. 18, n. 2, p. 112-118, 1989.

FORD, A. Testing snare river explorer. **System Dynamics Review**, n. 12, p. 305-329, 1996.

FORD, A. **Modeling the environment**: an introduction to system dynamics modeling of environmental systems. Washington: Island Press, 1999. 401 p.

FORRESTER, J.W. **Industrial dynamics**. Portland: Productivity Press, 1961. 464 p.

FORRESTER, J.W. **World dynamics**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971. 142 p.

FORRESTER, J.W. **World dynamics**. 2.ed. Cambridge: Wright-Allen Press, 1973. 380 p.

FORRESTER, J.W. Policies, decisions and information sources for modeling. In: MORECROFT; STERMAN (Eds.). **Modeling for learning organizations**. Portland: Productivity Press, 1994.

FORRESTER, J.W. **System dynamics, systems thinking and soft OR**. Disponible en: <<http://sysdyn.mit.edu/road-maps/rm-toc.html>>. Accesado en: marzo del 2005.

FORRESTER, J.W.; SENGE, P.M. Tests for building confidence in system dynamics models. In: **System dynamics**. Amsterdam, North-Holland: Legast, Forrester & Lyneis, 1980.

FREIRE, A.G. **Águas do Jequitinhonha**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

GESAI. **Software IRRIGA**. Viçosa: UFV, 2003.

GESUALDI, F. Giù lê mani daí servize pubblici: il caso dell acqua privatizzata. In: CIPSI (Org.). **Acqua bene comune dell umanità**: probleme e prospettive. Udine: CeVI, 2001.

GLEICK, P.H. **Water in crisis**. New York: Oxford University Press, 1993. 420 p.

GLEICK, P.H. **The world's water 1998-1999**: the biennial report on freshwater resources. Washington: Island Press, 1998. 180 p.

GLEICK, P.H. **The world's water 2000-2001**: the biennial report on freshwater resources. Washington: Island Press, 2000. 170 p.

GRCIC, B.; MUNITIC, A. **System dynamics approach to validation**. Disponible en: <<http://www.efst.hr/gric/b2.html>>. Accesado en: octubre del 2005.

HAMILTON, M.S. **Estimating lengths and orders of delays in system dynamics models**: elements of the system dynamics method. 1980. Part 4, p. 162-183.

HINRICHSEN, D.; ROBEY, B.; UPADHYAY, U. **Solutions for a water-short world**. Baltimore, 1997. 60 p. (Population Report, series M, n. 14).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo demográfico**. Disponible en: <<http://www.ibge.gov.br>>. Accesado en: noviembre del 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal**. Disponible en: <<http://www.ibge.gov.br>>. Accesado en: julio del 2005.

JINNO, K.; XU, Z.; KANAMURA, A.; TAJIRI, K. Risk assessment of water supply system during drought. **Water Resources Management**, v. 11, n. 2, p. 185-204, 1995.

KASSEL UNIVERSITY – USF. **WATERGAP**. Disponible en: <<http://www.usf.unikassel.de>>. Accesado en: julio del 2005.

KORZOUN, V.I. **World water balance and water resources of the earth**. Leningrad: Hidrometroizdat, 1974. 638 p.

KORZOUN, V.I. **World water balance and water resources of the earth**. New York: UNESCO, 1978. 663 p.

LOURENZANI, W.L. **Sustentabilidade de empreendimentos agroindustriais de pequeno porte**: uma aplicação da metodologia de dinâmica de sistemas. 2001. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

L'VOVICH, M. **World water resources and their future**. Chelsea, Michigan: AGU, 1979.

MAIDMENT, D.R.; REED, S.M.; AKMANSOY, S.; MCKINNEY, D.; OLIVERA, F.; YE, Z. **Digital atlas of the world water balance, version 2.0**. Disponible en: <<http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishyd98/atlas/atlas.htm>>. Accesado en: Julio 2005.

MASHAYEKHI, A.N. Rangelands destruction under population growth: the case of Iran. **System Dynamics Review**, n. 6, p. 167-193, 1993.

MATOS, A.T. **Manejo e tratamento de resíduos agroindustriais I**. Viçosa: UFV, 2003. 153 p. (Apostila del curso).

MEADOWS, D.H.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. **Dynamics of growth in a finite world**. Cambridge, Massachusetts: Wright-Allen Press, 1974. 670 p.

MEADOWS, D.H.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. **Groping in the dark**. New York: John Wiley & Sons, 1982. 250 p.

MEADOWS, D.H.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. **Beyond the limits**. Toronto, Ontario: McClelland & Stewart, 1992. 350 p.

MEADOWS, D.H.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. **Beyond the limits**. VT, USA: Chelsea Green Publishing, 1994. 300 p.

MOREIRA, J.R. **Agricultura familiar: processos sociais e competitividade**. Rio de Janeiro: Mauad; Seropédica, UFRRJ/CPDA, 1999. (Mimeogr.).

NACIONES UNIDAS – FNUAP. **Tendencias del medio ambiente**. Disponible en: <<http://www.unfpa.org>>. Accesado en: noviembre del 2005.

ORTEGA, A.C.; TROMBIM, M.C. Novos mecanismos de regulação dos recursos hídricos brasileiros: um passo a frente e dois atrás na participação da sociedade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 38, 38, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Brasília, DF: SOBER, 2000.

PALMER, R.N.; MOHAMMADI, A.; HAHN, M.; KESSLEG, D.; DVORAK, J.; PARKINSON, D. **Computer assisted decision support system for high level infrastructure master planning: case of the city of Portland**. Disponible en: <<http://www.maximus.ce.washington.edu/palmer/papers/imp-asce.pdf>>. Accesado en: julio del 2005.

PETRELLA, R. Per salvare l acqua viva. In: CIPSI (Org.). **Acqua bene comune dell umanità: probleme e prospettive**. Udine, CeVI, 2001.

PIDD, M. **Tools for thinking: modeling in management science**. Rexdale: Wiley, 1996. 350 p.

POSTEL, S. **Pillar of sand – can de irrigation miracle last?** New York, USA: Norton W.W. & Company, 1999. 312 p.

PROGRAMA NACIONAL DE AGRICULTURA FAMILIAR – PRONAF. **Crédito**. Disponible en: <<http://www.pronaf.gov.br>>. Accesado en: marzo del 2005.

RIBEIRO, A.; GALIZONI, F. Sistemas agrários, recursos naturais e migrações no alto Jequitinhonha, Minas Gerais. In: TORRES, H.; COSTA, H. (Orgs.). **População e meio ambiente: debates e desafios**. São Paulo: SENAC, 2000.

RICHARDSON, G.P.; PUCH, A.L. **Introduction to system dynamics modeling with dynamo**. Massachusetts: MIT Press, 1981.

ROMEIRO, A.R. **Meio ambiente e dinâmica de inovações na agricultura**. São Paulo: Annablume. FAPESP. 1998.

RUTH, M.; HANNON, B. **Modeling dynamic economic systems**. New York: Springer-Verlag, 1994. 339 p.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2000.

SAEED, K. **Development planning and policy design: a system dynamics approach**. VT USA: Brookfield, 1994. 254 p.

SCHNEIDER, S.; WENDEL, N.L. **Água sem florestas?** Disponible en: <<http://www.arvore.com.br>>. Accesado en: marzo del 2006.

SENGE, P.M. **A quinta disciplina: arte e prática da organização que aprende**. São Paulo: Best Seller, 1990. 441 p.

SENGE, P.M. **La quinta disciplina**. España: Editorial Granica, 1995.

SENGE, P.M. **La quinta disciplina en la práctica**. España: Editorial Granica. 1997.

SHIKLOMANOV, I. **Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world**. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 1997.

SHIKLOMANOV, I. Appraisal and assessment of world water resources. **Water International**, London, v. 25, n. 1, p. 11-32, mar. 2000.

SIMONOVIC, S. Tools for water management: one view of the future. **Water International**, London, v. 25, n. 1, p. 76-88, mar. 2000.

SIMONOVIC, S. World water dynamics: global modeling of water resources. **Journal of Environmental Management**, n. 6, p. 249-267, 2002.

SIMONOVIC, S.; FAHMY, H.; EL-SHORBAGY, A. The use of object oriented modeling for water resources planning in Egypt. **Water Resources Management**, n. 11, p. 243-261, 1997.

SIMONOVIC, S.; FAHMY, H. A new modeling approach for water resources policy analysis. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 295-304, 1999.

SISTEMAS DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS HÍDRICOS – IARHA. **Águas da Bacia do Rio Doce (MAPAS)**. Disponible en: <<http://www.hidricos.mg.gov.br>>. Accesado en: agosto del 2005.

STELLA. **Introduction to systems thinking**. NH: High Performance Systems, 2001. 165 p.

STERMAN, J.D. **Business dynamics** – systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin MacGraw-Hill, 2000. 982 p.

TEIXEIRA SOUZA, S.M. (Coord.). **Deflúvios superficiais no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Hidrosistemas, 1993. 325 p.

THE INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE – IFPRI. **Impact**. Disponible en: <<http://www.ifpri.cgiar.org/themes/impact.htm>>. Accesado en: julio del 2005.

THE INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE – CGIAR. **Podium**. Disponible en: <<http://www.cgiar.org/iwmi/software/podium.htm>>. Accesado en: julio del 2005.

THE NETHERLANDS NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND THE ENVIRONMENT – RIVM. **Targets**. Disponible en: <<http://www.baltzer.nl>>. Accesado en: julio del 2005.

THE STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE – SEIB. **Polestar**. Disponible en: <<http://www.seib.org/polestar/psbro.htm>>. Accesado en: julio del 2005.

THE STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE AND THE BOSTON TELLUS INSTITUTE – TELLUS. **Weap**. Disponible en: <<http://www.seib.org/weap/weapbro.htm>>. Accesado en: julio del 2005.

VAKKILAINEN, P.; VARIS, O. **Will water be enough? Will food be enough?** UNESCO, IHP-V, 1999. (Technical Documents in Hydrology, 24).

VILELA CUNHA, V. **Comunicación personal – SPAM-383/05.** Belo Horizonte: Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, COPASA, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2.ed. Belo Horizonte: FCO, 1996. 243 p.

VÖRÖSMARTY, C.J.; GREEN, P.; SALISBURY, J.; LAMMERS, R. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. **Science**, n. 289, p. 284-288, 2000.

WORLD BANK – WB. **Water resources management, policy paper.** Washington, D.C., 1993.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT – WCED. **Our common future.** New York: Oxford University Press, 1987.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Global water supply and sanitation assessment 2000 report.** WHO and United Nations Children's Fund.

WU, J.; BARLAS, Y.; VANKAT, J.L. Effect of patch connectivity and arrangement on animal metapopulation dynamics: a simulation study. **Ecological Modeling**, n. 65, p. 221-254, 1993.

XU, Z.X.; JINNO, K.; KAWAMURA, A.; TAKESAKI, S.; ITO, K. Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. **Water Resources Management**, v. 12, n. 1, p. 13-30, 1998.

XU, Z.X.; JINNO, K.; KAWAMURA, A.; TAKESAKI, S.; ITO, K. Sustainability analysis for yellow river water resources using the system dynamics approach. **Water Resources Management**, Netherlands, n. 16, p. 239-261, 2002.

YEH, W.W.G. Reservoir management and operation models: a state-of-the-art-review. **Water Resources**, v. 21, n. 12, p. 1797-1818, 1986.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

Tabla 1A – Población animal por especie (cabezas)

Año/Especie	Bovinos	Suínos	Aves	Caprinos	Conejos	Equinos	Mulas	Ovinos	Vacas Lecheras	Total
1994	6,600	3,100	203,600	0	0	0	0	0	0	213,300
1995	6,000	2,930	305,984	0	0	0	0	0	0	314,914
1996	7,392	4,567	459,012	117	49	417	5	49	1,368	472,976
1997	7,984	5,046	708,850	117	49	438	6	49	1,050	723,589
1998	8,000	5,194	719,280	117	49	438	6	49	1,050	734,183
1999	7,640	5,335	715,027	143	54	473	8	60	1,018	729,758
2000	7,710	5,489	715,185	131	40	576	10	53	1,018	730,212
2001	7,856	5,536	715,244	146	46	482	10	42	1,018	730,380
2002	7,815	5,480	715,974	160	53	490	14	54	1,018	731,058
2003	7,761	5,425	715,800	192	53	512	19	70	960	730,792
2004	7,062	5,107	877,929	170	53	542	23	63	912	891,861

Fuente: IBGE (2005)

Tabla 2A – Requerimientos de agua por especie

Espécie	(m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> unidad <sup>-1</sup> )
Bovinos	0.15
Suínos	0.20
Aves	0.00016
Caprinos	0.38
Conejos	0.005
Eqüinos	0.15
Ovinos	0.38
Vacas lecheras	0.05

Fuente: Matos (2003).

Tabla 3A – Requerimientos de agua por especie (m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>)

Año/Especie	Bovinos	Suínos	Aves	Caprinos	Conejos	Equinos	Mulas	Ovinos	Vacas lecheras	Total
1994	990.00	620.00	32.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,642.58
1995	900.00	586.00	48.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,534.96
1996	1,108.80	913.40	73.44	44.46	0.25	62.55	0.75	18.62	68.40	2,290.67
1997	1,197.60	1,009.20	113.42	44.46	0.25	65.70	0.90	18.62	52.50	2,502.64
1998	1,200.00	1,038.80	115.08	44.46	0.25	65.70	0.90	18.62	52.50	2,536.31
1999	1,146.00	1,067.00	114.40	54.34	0.27	70.95	1.20	22.80	50.90	2,527.86
2000	1,156.50	1,097.80	114.43	49.78	0.20	86.40	1.50	20.14	50.90	2,577.65
2001	1,178.40	1,107.20	114.44	55.48	0.23	72.30	1.50	15.96	50.90	2,596.41
2002	1,172.25	1,096.00	114.56	60.80	0.27	73.50	2.10	20.52	50.90	2,590.89
2003	1,164.15	1,085.00	114.53	72.96	0.27	76.80	2.85	26.60	48.00	2,591.15
2004	1,059.30	1,021.40	140.47	64.60	0.27	81.30	3.45	23.94	45.60	2,440.32

Fuente: Resultados de la investigación.

Tabla 4A – Requerimientos de agua por especie (m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>)

Año/Especie	Bovinos	Suínos	Aves	Caprinos	Conejos	Equinos	Mulas	Ovinos	Vacas lecheras	Total
1994	361,350.0	226,300.0	11,890.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	599,540.2
1995	328,500.0	213,890.0	17,869.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	560,259.5
1996	404,712.0	333,391.0	26,806.3	16,227.9	89.4	22,830.8	273.8	6,796.3	24,966.0	836,093.4
1997	437,124.0	368,358.0	41,396.8	16,227.9	89.4	23,980.5	328.5	6,796.3	19,162.5	913,464.0
1998	438,000.0	379,162.0	42,006.0	16,227.9	89.4	23,980.5	328.5	6,796.3	19,162.5	925,753.1
1999	418,290.0	389,455.0	41,757.6	19,834.1	98.6	25,896.8	438.0	8,322.0	18,578.5	922,670.5
2000	422,122.5	400,697.0	41,766.8	18,169.7	73.0	31,536.0	547.5	7,351.1	18,578.5	940,842.1
2001	430,116.0	404,128.0	41,770.2	20,250.2	84.0	26,389.5	547.5	5,825.4	18,578.5	947,689.3
2002	427,871.3	400,040.0	41,812.9	22,192.0	96.7	26,827.5	766.5	7,489.8	18,578.5	945,675.2
2003	424,914.8	396,025.0	41,802.7	26,630.4	96.7	28,032.0	1,040.3	9,709.0	17,520.0	945,770.8
2004	386,644.5	372,811.0	51,271.1	23,579.0	96.7	29,674.5	1,259.3	8,738.1	16,644.0	890,718.1

Fuente: Resultados de la investigación.

Tabla 5A – Lámina de riego necesaria en el municipio de São Miguel do Anta

Cultivo	mm	m <sup>3</sup> há <sup>-1</sup>
Pasto	760.07	7,600.70
Naranja	980.85	9,808.50
Maracuya 1	85.56	855.60
Maracuya 2	204.55	2,045.50
Mango	840.17	8,401.70
Maiz 1	284.15	2,841.50
Maiz 2	366.90	3,669.00
Limon	747.04	7,470.40
Frijol 1	205.51	2,055.10
Frijol 2	273.83	2,738.30
Café	616.50	6,165.00
Banano	686.18	6,861.80
Arroz	416.13	4,161.30
Caña de azúcar	1,218.38	12,183.80

Fuente: Resultados de la investigación.

Tabla 6A – Produccion (tn)

Producto/año	Arroz	Camote	Café	Caña de azúcar	Frijol	Naranja	Yuca	Maíz	Tomate	Banano	Mango	Mandarina	Maracuyá	Total
1994	478	10	1500	2000	318	900	60	2340	120	6	30	162	0	7,924.0
1995	386	10	1500	2000	720	900	60	4104	315	6	30	162	0	10,193.0
1996	265	4	594	1148	251	1104	120	2845	1134	10	30	335	0	7,840.0
1997	272	4	844	2000	456	1104	120	3900	3480	10	30	335	96	12,651.0
1998	291	4	1056	2000	509	1104	120	3640	3190	10	30	330	100	12,384.0
1999	218	4	1056	2000	436	1104	120	2160	3190	10	32	330	100	10,760.0
2000	193	7	1056	2100	420	1104	120	2160	3190	10	32	200	100	10,692.0
2001	95	7	1056	2100	850	1104	120	6000	3190	10	32	200	100	14,864.0
2002	95	7	967	2100	766	1104	120	6240	3190	10	32	240	100	14,971.0
2003	95	7	967	2100	832	1104	120	6240	3190	10	32	240	100	15,037.0
Média														11,731.6

Fuente: IBGE (2005).

Tabla 7A – Area (ha)

Año	Arroz	Camote	Café	Caña de azúcar	Frijol	Naranja	Yuca	Maíz	Tomate	Banano	Mango	Mandarina	Maracuyá	Total
1994	242	2	1000	50	1650	15	5	1300	3	8	1	3	0	4,279.0
1995	214	2	1000	50	2200	15	5	1710	7	8	1	3	0	5,215.0
1996	114	1	625	48	505	6	7	1154	58	6	1	4	0	2,529.0
1997	150	1	704	50	760	6	10	1300	58	6	1	4	4	3,054.0
1998	202	1	704	50	790	6	10	1300	58	6	1	4	4	3,136.0
1999	142	1	704	50	800	6	10	800	58	6	1	4	4	2,586.0
2000	140	1	704	50	800	6	10	800	58	6	1	4	4	2,584.0
2001	60	1	704	50	1300	6	10	1500	58	6	1	4	4	3,704.0
2002	60	1	1289	50	1300	6	10	1300	58	6	1	4	4	4,089.0
2003	60	1	1289	50	1350	6	10	1300	58	6	1	4	4	4,139.0
Média														3,531.5

Fuente: IBGE (2005).

Tabla 8A – Consumo de agua (m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>)

Año	Arroz	Camote	Café	Caña de azúcar	Frijol	Naranja	Yuca	Maíz	Tomate	Banano	Mango	Mandarina	Maracuyá	Total	(m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
1994	1,007,035	0	6,165,000	400,000	4,518,195	147,128	0	4,769,700	6,051	54,894	8,402	29,426	0	17,105,830	3,998
1995	890,518	0	6,165,000	400,000	6,024,260	147,128	0	6,273,990	14,119	54,894	8,402	29,426	0	20,007,736	3,837
1996	474,388	0	3,853,125	384,000	1,382,842	58,851	0	4,234,026	116,986	41,171	8,402	39,234	0	10,593,024	4,189
1997	624,195	0	4,340,160	400,000	2,081,108	58,851	0	4,769,700	116,986	41,171	8,402	39,234	8,182	12,487,989	4,089
1998	840,583	0	4,340,160	400,000	2,163,257	58,851	0	4,769,700	116,986	41,171	8,402	39,234	8,182	12,786,525	4,077
1999	590,905	0	4,340,160	400,000	2,190,640	58,851	0	2,935,200	116,986	41,171	8,402	39,234	8,182	10,729,730	4,149
2000	582,582	0	4,340,160	400,000	2,190,640	58,851	0	2,935,200	116,986	41,171	8,402	39,234	8,182	10,721,408	4,149
2001	249,678	0	4,340,160	400,000	3,559,790	58,851	0	5,503,500	116,986	41,171	8,402	39,234	8,182	14,325,954	3,868
2002	249,678	0	7,946,685	400,000	3,559,790	58,851	0	4,769,700	116,986	41,171	8,402	39,234	8,182	17,198,679	4,206
2003	249,678	0	7,946,685	400,000	3,696,705	58,851	0	4,769,700	116,986	41,171	8,402	39,234	8,182	17,335,594	4,188
Média														14,329,247	4,075

Fuente: IBGE (2005).

Tabla 9A – Tasa de crecimiento pecuaria 1994-2004

Espécie	Tasa crecimiento
Aves	0.0100
Bovinos	0.0009
Caprinos	0.0067
Conejos	0.0011
Eqüinos	0.0033
Mulas	0.0211
Ovinos	0.0033
Suínos	0.0045
Vacas lecheras	-0.0033
Media anual	0.0477

Fuente: Resultados de la investigación.

## ANEXO B

Tabla 1B – São Miguel do Anta: aguas superficiales

	Rio Casca		Area cuenca (km <sup>2</sup> )		152								
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Caudal medio (L s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )	26.5	23.2	21.2	16.6	12.2	10.5	9.3	8.2	8.2	10.0	15.8	24.4	
Caudal medio (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	4.0	3.5	3.2	2.5	1.9	1.6	1.4	1.2	1.2	1.5	2.4	3.7	
Caudal total (MMC)	10.79	8.53	8.63	6.54	4.97	4.14	3.79	3.34	3.22	4.07	6.22	9.93	74.18
Caudal medio (MMC d <sup>-1</sup> )	0.348	0.305	0.278	0.218	0.160	0.138	0.122	0.108	0.107	0.131	0.207	0.320	0.204
Caudal minimo (L s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )	11.0	7.7	9.6	7.0	5.5	6.3	5.0	4.1	4.4	5.5	9.8	8.0	
Caudal minimo (L s <sup>-1</sup> )	1,672.0	1,164.3	1,463.8	1,061.0	828.4	956.1	755.4	624.7	674.9	840.6	1,482.0	1,220.6	
Caudal minimo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	1.7	1.2	1.5	1.1	0.8	1.0	0.8	0.6	0.7	0.8	1.5	1.2	
Caudal total (MMC)	4.48	2.82	3.92	2.75	2.22	2.48	2.02	1.67	1.75	2.25	3.84	3.27	33.47

Fuente: Resultados de la investigación.

Tabla 2B – Cálculo de las aguas subterráneas disponibles ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ )

---

Precipitación anual media (mm)	1,221.4
( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ )	12,214.0
Volumen total precipitado en el municipio ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ )	185,652,800.0
% Lluvia que infiltra	5.0
<b>Aguas subterráneas disponibles (<math>\text{m}^3 \text{año}^{-1}</math>)</b>	<b>9,282,640.0</b>

---

Fuente: Resultados de la investigación.

## ANEXO C

$AGUA\_ESTOQUE(t) = AGUA\_ESTOQUE(t - dt) + (OFERTA - DEMANDA - SALIDA) * dt$   
INIT  $AGUA\_ESTOQUE = OFERTA - DEMANDA$   
 $OFERTA = SSUBT + SSUP$   
 $DEMANDA = DAG + DAMB + DPOBLACIONAL + DAGIN$   
 $SALIDA = AGUA\_ESTOQUE$   
 $PoblacionAnimal(t) = PoblacionAnimal(t - dt) + (PobAnIncr) * dt$   
INIT  $PoblacionAnimal = 730792$   
 $PobAnIncr = PoblacionAnimal * TincAnim$   
 $PobRural(t) = PobRural(t - dt) + (IncPobRur) * dt$   
INIT  $PobRural = 3309$   
 $IncPobRur = PobRural * TasCrec$   
 $PobUrbana(t) = PobUrbana(t - dt) + (IncPobUrb) * dt$   
INIT  $PobUrbana = 3800$   
 $IncPobUrb = PobUrbana * TasCrec$   
 $ProdAgInd(t) = ProdAgInd(t - dt) + (IncProdAgInd) * dt$   
INIT  $ProdAgInd = 0$   
 $IncProdAgInd = ProdAgInd * TincAgInd$   
 $TierraIrrigada(t) = TierraIrrigada(t - dt) + (TierraIncr) * dt$   
INIT  $TierraIrrigada = 4139 * .2$   
 $TierraIncr = TierraIrrigada * TincTierra$   
 $A - o = TIME$   
 $ConsAgInd = ProdAgInd * PromConsAgInd$   
 $ConsAnimal = PoblacionAnimal * PromConsAnimal$   
 $ConsCultivos = TierraIrrigada * PromConsCultivos$   
 $ConsRural = PobRural * 100 * 365 * TcCAgua / 1000$   
 $ConsUrbano = PobUrbana * 137.6 * 365 * TcCAgua / 1000$   
 $ContPecuaria = (ConsAnimal * .8 * 1.5) / 365$   
 $ContPob = (PobRural + PobUrbana) * .054$   
 $DAG = ConsAnimal + ConsCultivos$   
 $DAGIN = ConsAgInd$   
 $DAMB = 33470254$   
 $DBO = (ContPecuaria + ContPob) * 1000 / (SALIDA + DAMB / 365)$   
 $DPOBLACIONAL = ConsRural + ConsUrbano$   
 $EquivPobPec = ContPecuaria / .054$   
 $IS = AGUA\_ESTOQUE / OFERTA$

PromConsAgInd = 0  
PromConsAnimal = 945771/730792  
PromConsCultivos = 17335594/4139  
SSUBT = 9282640  
SSUP = 74175499  
TincAgInd = 0  
TincAnim = .05  
TasCrec = GRAPH(A-o)  
(2003, 0.013), (2004, 0.0132), (2005, 0.0132), (2006, 0.0132), (2007, 0.0132), (2008, 0.0132), (2009, 0.0132), (2010, 0.0132), (2011, 0.0132), (2012, 0.0132), (2013, 0.013), (2014, 0.011), (2015, 0.011), (2016, 0.0111), (2017, 0.0111), (2018, 0.0111), (2020, 0.0111), (2021, 0.0111), (2022, 0.0111), (2023, 0.0111), (2024, 0.0111), (2025, 0.0086), (2026, 0.0086), (2027, 0.0086), (2028, 0.0086), (2029, 0.0086), (2030, 0.0086), (2031, 0.009), (2032, 0.009), (2033, 0.009), (2034, 0.009), (2035, 0.0086)  
TcCAgua = GRAPH(A-o)  
(2003, 1.01), (2004, 1.01), (2005, 1.01), (2006, 1.01), (2007, 1.01), (2008, 1.01), (2009, 1.01), (2010, 1.01), (2011, 1.01), (2012, 1.01), (2013, 1.01), (2014, 1.01), (2015, 1.01), (2016, 1.01), (2017, 1.01), (2018, 1.01), (2020, 1.01), (2021, 1.01), (2022, 1.01), (2023, 1.01), (2024, 1.01), (2025, 1.01), (2026, 1.01), (2027, 1.01), (2028, 1.01), (2029, 1.01), (2030, 1.01), (2031, 1.01), (2032, 1.01), (2033, 1.01), (2034, 1.01), (2035, 1.01)  
TincTierra = GRAPH(A-o)  
(2003, 0.006), (2004, 0.006), (2005, 0.006), (2006, 0.006), (2007, 0.006), (2008, 0.006), (2009, 0.006), (2010, 0.006), (2011, 0.006), (2012, 0.006), (2013, 0.006), (2014, 0.006), (2015, 0.006), (2016, 0.006), (2017, 0.006), (2018, 0.006), (2020, 0.006), (2021, 0.006), (2022, 0.006), (2023, 0.006), (2024, 0.006), (2025, 0.006), (2026, 0.0062), (2027, 0.006), (2028, 0.006), (2029, 0.004), (2030, 0.004), (2031, 0.004), (2032, 0.004), (2033, 0.004), (2034, 0.004), (2035, 0.004)