

Vol.6, No. 1 y 2

ISSN 1860-8894

I + D

Tecnológico

Revista de investigación de la  
Universidad Tecnológica de Panamá



ISSN 1680-8894

# REVISTA DE I + D TECNOLÓGICO

---

VOLUMEN 6

• Revista I + D •

2009

---

**AUTORIDADES DE LA  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ**

**RECTORA**

Marcela Paredes de Vásquez

**VICERRECTOR ACADÉMICO**

Luis Barahona G.

**VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN, POSTGRADO Y EXTENSIÓN**

Martín Candanedo G.

**VICERRECTORA ADMINISTRATIVA**

Myriam González B.

**SECRETARIO GENERAL**

Jeremías Herrera D.

**Correspondencia para suscripciones y/o canje:**

Universidad Tecnológica de Panamá  
Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión  
Apdo. Postal: 6-2894, El Dorado  
Panamá, Rep. de Panamá

Edición aprobada por la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión de la  
Universidad Tecnológica de Panamá



Medio de Divulgación Oficial de las investigaciones de la Universidad Tecnológica de Panamá  
CIPE No. 07-98 del 7 de octubre de 1998

## **DIRECTOR DEL COMITÉ EDITORIAL**

Darío Solís Caballero

## **COMITÉ EDITORIAL**

Clifton Clunie

Eleicer Ching

Humberto Álvarez

Humberto Rodríguez

Wedleys Tejedor

## **PORTADA**

Arte y diseño:

Jonathan Aranda

Dirección de Investigación

Universidad Tecnológica de Panamá

## **LEVANTADO DE TEXTO**

### **Y DIAGRAMACION**

Eduardo A. Caballero E.

Yesslyn Sarmiento

Dirección de Investigación

Universidad Tecnológica de Panamá

Impreso en Panamá

1000 ejemplares

Imprenta

Universidad Tecnológica de Panamá

Copy Right

© Derechos Reservados UTP

## **PRESENTACIÓN**

Es con mucha satisfacción que le presentamos a la comunidad científica de Panamá y al mundo el Volumen 6 de nuestra revista I+D Tecnológico, en sus Números 1 y 2.

Nuestro país avanza con paso firme hacia un futuro mejor dentro de una comunidad globalizada que intercambia bienes, información y tecnología a ritmo acelerado. Nuestra posición geográfica siempre nos ha representado un recurso inigualable y con el paso de los siglos este recurso solamente se ha visto aumentado. Hoy, no solamente participamos de la mayor expansión del Canal de Panamá desde su construcción, y su respectivo impacto en el comercio mundial, sino vemos como la Ciencia, la Tecnología y la Innovación se vislumbran como las coordenadas que definen otro espacio de intercambio en el cual Panamá participa de manera activa, marcando un camino a seguir en la región por países en similares condiciones y en cercana cooperación con los países más adelantados.

Los artículos que se publican en esta modesta pero importante revista, son una pequeña muestra de los trabajos que realizan nuestros investigadores al servicio del país. La nueva portada de la revista refleja un diseño sobrio, dirigido a resaltar la calidad de su contenido y con el aumento vertiginoso en la cantidad de proyectos de Investigación y Desarrollo en Panamá, se consolida como una plataforma regional para la divulgación de resultados de investigación de manera económica y efectiva.

Con este Volumen, le reiteramos nuestra invitación a toda la comunidad científica para que incluya al I+D Tecnológico entre sus revistas favoritas para publicar.

**Ing. Marcela Paredes de Vásquez**

**Rectora**

## CONTENIDO

---

Comparación entre Metodología Cuantitativa y Cualitativa en Medición de Cultura – un Estudio Preliminar . . . . .	<i>P. Rebolledo</i>	5
---	---------------------	---

---

Códigos Convolucionales de Producto: Propiedades de Distancia, Codificación y Decodificación. . . . .	<i>C. Medina; V. Sidorenko</i>	17
---	--------------------------------	----

---

Modelación Hidrológica con Escenarios de Contaminación Difusa, para la Planificación Ambiental en la Cuenca del Río David. . . . .	<i>V. Domínguez</i>	27
--	---------------------	----

---

La Expansión del Canal de Panamá: Análisis utilizando un Modelo de Dinámica de Sistemas. . . . .	<i>H. Álvarez; L. Rabelo; D. Solís</i>	35
--	--	----

---

Planificación de Movimiento mediante Campo de Potencial con Restricciones Dinámicas para Robots Móviles. . . . .	<i>H. Rodríguez</i>	43
--	---------------------	----

---

Mecanismos de Autodepuración de Clorofenoles en Ríos. . . . .	<i>V. Domínguez</i>	49
---	---------------------	----

---

Evaluación Preliminar de 20 variedades de Amaranto en Panamá . . . . .	<i>L. Manso; F. Pineda</i>	55
--	----------------------------	----

---

Analysis and prediction of heat induced deformation produced by the line heating process using the finite element method. . . . .	<i>A. Vega</i>	61
---	----------------	----

---

# COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍA CUANTITATIVA Y CUALITATIVA EN MEDICIÓN DE CULTURA – UN ESTUDIO PRELIMINAR

**Pedro R. Rebolledo I., Ph. D.**  
Facultad de Ingeniería Industrial  
Universidad Tecnológica de Panamá  
[pedro.rebolledo@utp.ac.pa](mailto:pedro.rebolledo@utp.ac.pa)

## RESUMEN

*Con fundamento en sus propias afirmaciones, ¿podrán tanto un instrumento cualitativo como uno cuantitativo, dentro de cualquier organización, aflorar con igual eficacia los verdaderos valores culturales básicos-subyacentes con independencia del marco conceptual en el que se fundamentan? A fin de avanzar parcialmente en la búsqueda, se escogió una organización sin fines de lucro (HOPO en todo el escrito), tipo religiosa, para aplicar tanto el instrumento cuantitativo “OCAI” como la cualitativa “Metodología Clínica Iterativa.” Los instrumentos generaron valores culturales que luego sugirieron estrategias para alcanzar un único y común objetivo de la organización investigada. A través de un modelo de campo que respondió tanto al “pensamiento lógico deductivo” como al diseño pre-prueba, post-prueba, y grupos de control, la data generada fue guiada en su aplicación siguiendo la “teoría de alineamiento” entre el valor cultural encontrado, la estrategia derivada, y el objetivo de HOPO. De esta manera, la aplicación progresiva de la data también se fundamentó en el “concepto de jerarquía en la medición del desempeño.” Se constituyeron “evaluadores” asignados al azar quienes analizaron la data surgida en cada fase del modelo. Sus aportes, sin embargo, fueron triangulados. Los resultados parciales, hasta la segunda fase del modelo, tienden a señalar al método cualitativo como el más eficaz en aflorar, y explicar, los valores culturales subyacentes de tercer nivel. En adición, tienden a corroborar la eficacia del método científico y sistemático de estudio, por encima de procedimientos intuitivos, para la obtención de valores culturales y estrategias.*

**Palabras claves:** Cultura, Cultura organizacional, Alineamiento

## ABSTRACT

*Base on their own claims, ¿will a qualitative instrument as well as a quantitative one, within any organization, surface with equal efficacy the basic underlying true cultural values independently of the conceptual frame of reference which gives them support? In order to partially pursue this search, the author chose a nonprofit organization (HOPO from here on) of the religious type; the intention was to apply the “OCAI” quantitative instrument as well as the qualitative “Clinical Iterative Methodology.” The instruments surfaced values which permitted the best*

*strategies to reach a unique and common objective within the researched organization. Through a field model which responded to the “logical deductive thinking” as well as to a pretest posttest design, with control groups, the generated data was guided in its application following the “Alignment theory” involving the cultural value found, the consequent derived strategy, and HOPO’s objective. Moreover, progressive application of the data also found fundament on the concept of “Performance measurement hierarchies.” The researcher, randomly, called on raters and assigned them for the analysis and decision taking on the data obtained. Raters’ apportions, nonetheless, were submitted to the data triangulation technique. Preliminary partial results, through the second phase of the model, tend to corroborate the qualitative method as the most effective to emerge, and explain, underlying cultural values originating at the deepest third level in HOPO. Additionally, compared to the intuitive methodology, partial results tend to point toward the efficacy of the systematic scientific method to obtain cultural values and strategies.*

**Key Words:** Culture, Organizational culture, Alignment

## 1. INTRODUCCIÓN

Tanto investigadores como académicos y otros profesionales de la administración nos han provisto de acceso a un número considerable de metodologías en el campo de la evaluación de la cultura. El hecho ha sido notado dado el interés que ha despertado la importancia del estudio de las culturas en las organizaciones (Gibney, 2002; Siliceo, Casares y González, 1999; Taylor, 2002). Los referidos métodos culturales o instrumentos han sido presentados, normalmente, como capaces de obtener el valor verdadero del concepto cultural (Cameron y Quinn, 1999; Fraser, 2001; Pino, 2001; Schein, 1985; Zwell, 2000). En efecto, estos métodos o instrumentos han sido presentados a las organizaciones – tanto con fines de lucro o sin el – como un medio para evaluar el concepto verdadero de cultura organizacional; cuyo conocimiento siempre

podrá aportar beneficios al momento de lograr objetivos y/o desempeños. Aun cuando se ha concedido crédito al trabajo presentado por los escritores antes citados, el autor de éste estudio se preguntó si todos los instrumentos de evaluación cultural poseían la misma capacidad para evaluar los valores verdaderos subyacentes y/o básicos implícitos proclamados por ellos. ¿Logran estos instrumentos el mismo objetivo aun cuando estuviesen enmarcados en metodologías conceptualmente opuestas? ¿Exhiben la misma capacidad para penetrar hasta el nivel cultural más profundo de una particular organización sin fines de lucro en la República de Panamá, a fin de hacer surgir sus verdaderos valores culturales tal como se prometía?

De igual forma, asumido el conocimiento de la cultura, varios escritores propusieron la existencia de una teoría de alineamiento, la cual reclamaba una relación entre cultura, la estrategia emanada de esa cultura, y un determinado objetivo o desempeño (Deal y Kennedy, 1999; Golnaz y Lees, 2001; Herrero, 2000; McNamara, 2001; Nickols, 2000). Sin embargo, ¿constituiría esta trilogía evidencia categórica para afirmar que tal relación se mantendría cierta dentro del particular ambiente empresarial y cultural de Panamá, República de Panamá, distinto al de los Estados Unidos de Norteamérica?

Consecuentemente, el problema de ésta investigación consistió en descubrir si tanto un instrumento externamente generado para evaluación cultural, tipo de formato estandarizado, representativo del enfoque metodológico cuantitativo, así como un instrumento de entrevista clínica iterativa, representativo del enfoque metodológico cualitativo, serían capaces de revelar los mismos valores culturales tácitos, subyacentes y/o las verdaderas asunciones culturales dentro de una organización sin fines de lucro en Panamá, República de Panamá.

En forma colateral, ésta investigación buscaba confirmación con relación a la establecida teoría de alineamiento en la organización estudiada.

## 2. MARCO TEÓRICO

El marco teórico o conceptual para éste trabajo se basó en las investigaciones de cultura organizacional realizadas en los Estados Unidos de América y en otros países de Europa. En términos concretos, se trabajó en la búsqueda de verdaderos valores tácitos subyacentes o asunciones culturales sumergidas. Fuera de una técnica complementaria de “tormenta de ideas,” para descubrir valores previos intuitivos culturales y estratégicos, los métodos principales para obtener valores culturales de Cameron y Quinn (1999) así como el de Edgar H. Schein (1985, 1999) constituyeron los marcos principales para éste estudio. Ambos métodos fueron escogidos por sus similares aseveraciones sobre sus capacidades de hacer surgir el concepto de cultura básica verdadera definida con anterioridad. Más aún, estas metodologías han sido clasificadas dentro de la estructura de conceptos metodológicos distintos y opuestos.

En adición, éste trabajo se fundamentó en la perspectiva teórica de cinco “generalizaciones empíricas o micro-teorías” (Sampieri, Collado y Lucio, 1998, pp.47-48; 2003, pp. 97-99). La primera de ellas sostenía la necesidad de obtener la verdadera definición cultural antes de establecer estrategia alguna (Garden, 2000; Hagberg & Heifetz, 2000; Harrison & Shirom, 1999; Martin, 1992; entre otros). La segunda consistía de dos declaraciones antagónicas: (a) Que los instrumentos como los cuestionarios estandarizados representan uno de los métodos correctos para obtener verdaderos valores culturales dentro de una organización, y (b) Que la metodología “clínica iterativa” es uno de los instrumentos correctos a utilizar cuando se tiene la intención de hacer surgir las verdaderas asunciones culturales tácitas. En efecto, la primera declaración era básica para éste estudio dada la intención de usar el “Organizational Culture Assessment Instrument, OCAI” (Competency Suite, 1999, p.1; Denison, 2000, p.1). De igual forma, la segunda declaración era parte del corazón de éste estudio (Deal & Kennedy, 2000; Küng-Shankleman, 2000b). La tercera micro teoría establecía la necesidad de una relación propia entre el conocimiento

verdadero de la cultura, la estrategia, y los objetivos o desempeños (Baker, 1995, 2001; Deal y Kennedy, 1999). La cuarta, y última, generalización empírica defendía el requisito de aplicar múltiples metodologías de evaluación cultural al momento de buscar los verdaderos valores culturales; refiriéndose específicamente a las metodologías cuantitativas y cualitativas. En este sentido, el presente estudio dependió de las evidencias suministradas por investigadores que invirtieron esfuerzos en éste último concepto citado (Hofstede et al., 1990; Kanungo et al., 2001).

### **3. RELEVANCIA Y CONTRIBUCIÓN**

El interés de éste trabajo sobre el tema metodológico de evaluación cultural combinado con aplicaciones a través de la teoría de alineamiento, se concentró en dos asuntos claves. En primer lugar se carecía, dentro del área comparativa experimental, de conocimiento investigativo en el mercado panameño a fin de distinguir cuál de los distintos conceptos metodológicos (v.g. cuantitativo o cualitativo) podría representar al instrumento capaz de descender hasta un nivel adecuado de información. Por ejemplo, aunque investigadores han introducido un número plural de instrumentos, con sus procedimientos particulares, los métodos se ven apoyados en metodologías conceptuales diferentes y no se detectó ningún intento de establecer una comparación entre ellos (Hagberg & Heifetz, 2000; Levin, 2000). En segundo lugar, aunque varios escritores habían propuesto la existencia de una relación entre el verdadero conocimiento de la cultura, la estrategia de allí derivada, y el desempeño u objetivos de una organización, éste estudio no encontró aplicación que confirmara tal evento para alguna organización sin fines de lucro en la República de Panamá.

Más aun, éste trabajo cuestionó la aparente indiferencia con la cual la comunidad empresarial en general enfrenta el proceso de selección de los instrumentos en el mercado. Falta de conocimiento que pudiera estar ocasionando decisiones desafortunadas con el

correspondiente impacto sobre los recursos invertidos en ésta área vital.

El propósito de ésta investigación, entonces, fue el negar las indiscriminadas aseveraciones acerca de la capacidad de cualquier metodología conceptual de medición de cultura en su rol de hacer surgir la verdadera definición cultural y los valores o asunciones subyacentes en una organización no lucrativa en Panamá, República de Panamá. De forma colateral, se anticipaba la confirmación de la teoría de alineamiento en la organización estudiada. Más aún, con el estudio se esperaba un avance y despertar en el conocimiento de la decisión sobre inversión eficaz cuando quiera que la precisión fuese necesaria para descubrir verdaderas definiciones culturales en las empresas.

Finalmente, dentro de los límites de la organización estudiada, se esperaba identificar una relación contingente entre la aplicación de alguna de las metodologías propuestas y la verdadera revelación de asunciones culturales subyacente.

### **4. DISEÑO GENERAL PARA EL ESTUDIO**

El diseño general (Apéndice 1) consistió de un flujo secuencial a través de cuatro fases de actividad. En la primera fase, la data se obtuvo de la aplicación de los instrumentos contrastados; además, el autor y altos dirigentes de HOPO realizaron una evaluación preliminar de los valores culturales surgidos. En la fase dos, la data fue analizada por evaluadores con el fin de opinar sobre: (a) el nivel de procedencia del valor cultural y (b) sugerir, sobre la base de la revelación obtenida, la más eficaz estrategia para obtener los objetivos de HOPO. En adición, también de manera preliminar, se contrastaron y evaluaron, junto a altos ejecutivos de HOPO, las estrategias intuitivas aplicadas por HOPO versus aquellas sugeridas por los evaluadores. Las estrategias intuitivas, obtenidas por HOPO de manera no sistemática, habían sido aplicadas por esa organización con anterioridad a ésta investigación. En la fase tres, se inició un experimento piloto mediante las aplicaciones de

las estrategias extraídas o sugeridas. En efecto, un experimento de campo se ha de correr a través de unidades estratégicas operacionales llamadas “células de reunión.” Una de éstas unidades se llamó “celda de predicación,” la otra “celda de enseñanza” (Apéndice 2). Finalmente, en la fase cuatro, los resultados serán evaluados y analizados.

Por razones de validez, en la Fase 3, se añadieron celdas de control. En adición, para apoyar la validez interna del experimento, se usó asignación aleatoria para con las celdas experimentales de campo y para las de control. Aún más, todas las celdas fueron medidas al inicio del experimento.

## 5. MATERIAL Y MÉTODO

En la primera fase del modelo se aplicaron tanto los instrumentos OCAI y la metodología de Edgar Schein así como la técnica de tormenta de ideas; ésta última a fin de obtener tanto los valores culturales como las estrategias intuitivas aplicadas por HOPO con anterioridad a éste estudio. Todos los valores culturales surgidos fueron preliminarmente evaluados. En la segunda fase, un primer grupo de evaluadores estuvo en posición de emitir su primera evaluación acerca de la equivalencia de ambas metodologías en su tarea. En efecto, independientes y a ciegas, los evaluadores emitieron su opinión sobre el origen de proveniencia de cada valor cultural aflorado; es decir, referente al nivel cultural organizacional interno de HOPO. En adición, el autor y los ejecutivos de HOPO también pudieron evaluar de forma preliminar tanto las estrategias intuitivas surgidas con la tormenta de ideas así como aquellas aportadas por los evaluadores.

La fase tercera se encuentra, todavía, en ejecución y tan pronto se obtengan resultados se darán a conocer tanto a la comunidad académica como a la empresarial. En ésta fase se desea que las distintas estrategias, aplicadas a las unidades operacionales de contraste, puedan señalar cuál de ellas ayudará a obtener el desempeño final más efectivo para HOPO. En la cuarta fase, aún pendiente, se espera que las mediciones finales señalen, cuál de las dos metodologías principales

evaluadas indica, y corrobora, la alineación más eficaz entre “cultura, estrategia, y objetivo.”

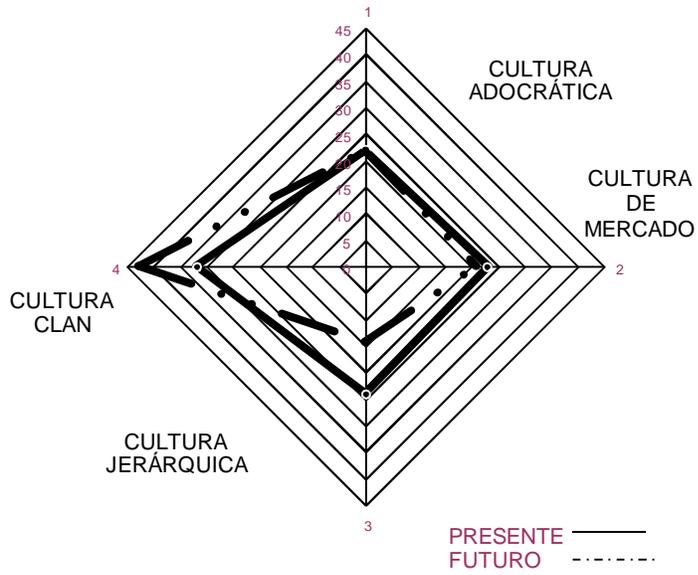
Con relación a los sujetos participantes, se tomó una muestra (229) de la mitad de la población adulta de la organización propuesta, así como de un grupo especial (150) de miembros jóvenes solteros, los cuales fueron evaluados con el método “OCAI.” Por otro lado, un grupo particular de miembros dentro de la población adulta se prestó, a manera de contraste, para aplicar el método conceptual cualitativo de Edgar H. Schein. Este último grupo selecto fue identificado a través de entrevistas exploratorias e investigación documental. Todos ellos tenían el necesario conocimiento histórico-experimental de HOPO, y estaban capacitados para contribuir ya de forma individual, grupal, o en ambas maneras. Este grupo selecto de miembros participó sólo con la metodología de Edgar Schein. Finalmente, este trabajo siguió las instrucciones ofrecidas por ambos creadores de las metodologías presentadas en ésta investigación. Más aún, la participación de todos los sujetos fue de tipo voluntaria.

## 6. RESULTADOS

Con respecto a la metodología OCAI, se añadió cada una de las respuestas para los temas A, B, C, y D de su cuestionario a fin de dividirla entre el número total de participantes. Los promedios obtenidos para las situaciones “Ahora” y “Futuro” fueron los puntajes que se graficaron para aflorar el perfil cultural de la organización; la Figura 1 muestra éste perfil de acuerdo a la data lograda de la población adulta. Por otro lado, la Figura 2 muestra el perfil cultural de HOPO, pero percibido por un grupo especial de jóvenes solteros.

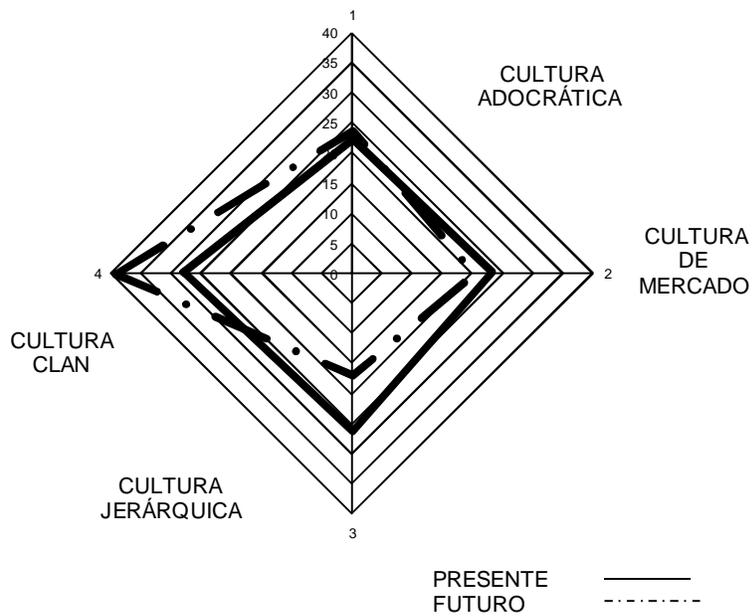
Producto de los datos recabados en la Fase 1, el autor y altos ejecutivos de HOPO compararon tanto los valores culturales intuitivos (tormenta de ideas) así como los surgidos con la metodología Cameron-Quinn, y la de Edgar H. Schein. Para lo anterior, se analizó si cada uno de los valores de los distintos instrumentos podía explicar con la misma eficacia y profundidad los valores culturales, aparentemente comunes, que

**PERFIL CULTURAL DE HOPO  
(DATOS DE LA POBLACIÓN ADULTA)**



**FIGURA 1**

**PERFIL CULTURAL DE HOPO  
(DATOS DE GRUPO ESPECIAL DE JÓVENES SOLTEROS)**



**FIGURA 2**

surgieron con la aplicación de los métodos probados. ¿Existiría alguna posibilidad de descubrir si los criterios de alguno de ellos pudiesen resultar de apoyo o de contraste a los criterios de los otros?

Posteriormente, en la Fase 2, el autor y los ejecutivos de HOPO contrastaron no sólo los valores estratégicos intuitivos surgidos con la técnica de tormenta de ideas sino, además, las otras estrategias sugeridas por los evaluadores en ese punto. Los evaluadores, analizaron todos los valores aflorados por ambas metodologías y expresaron su conocimiento respecto al nivel de cultura más probable desde donde los resultados pudieron haber surgido.

Basados pues en las comparaciones de las clasificaciones trianguladas de los resultados de valores culturales se pudo anticipar en la Fase 2 una tendencia preliminar. Tendencia acerca de la metodología más eficaz para descubrir las verdaderas asunciones culturales tácitas de HOPO; todo dentro del marco de las limitaciones de éste trabajo. De forma adicional, ésta tarea de contrastes permitió visualizar una tendencia preliminar en cuanto a la eficacia tanto de los valores culturales como las estrategias sistemáticamente obtenidas versus aquellos aportes empíricos y falta de sistematización a la hora de obtenerlos.

## **7. DISCUSIÓN**

En primera instancia, los perfiles culturales obtenidos con el instrumento OCAI, mediante la evaluación de dos subgrupos dentro de HOPO, permiten apreciar la validez interna tanto de éste instrumento como de sus resultados. En la etapa de avance en se encuentra la investigación, los datos recabados han permitido establecer una tendencia preliminar que se inclina a la distinción de uno de los dos métodos escogidos para este trabajo. En la Fase 1, los ejecutivos de HOPO coincidieron en percibir a los valores culturales surgidos mediante la metodología cualitativa como aquellos que mejor describían el comportamiento de su organización. Consintieron en encontrar descripciones más amplias, abundantes, e inclusive más profundas

y reveladoras acerca de la realidad vivida en HOPO. De igual forma, dieron testimonio acerca de lo certero de los datos obtenidos por éste instrumento de medición no estandarizado comparado a los conceptos culturales intuitivos que se tenían cinco años atrás.

En la Fase 2, nuevamente, se da un relativo alto porcentaje de eficacia en la percepción de los valores en los tres niveles de cultura según el método cualitativo (Apéndice 3). Esta particular percepción del nivel de asunciones tácitas o subyacentes tiende a situar ésta metodología como la aparentemente mayor capacitada para obtener los valores verdaderos profundos. En contraste, a pesar de reconocer la existencia de varios niveles culturales, la metodología ejecutada por OCAI se concentra en aportar sólo valores verdaderos para el nivel de la organización donde la cultura puede ser diagnosticada y cambiada. El instrumento OCAI no separa valores superficiales de los del nivel “espoused” ni del nivel subyacente; todo lo aportado se considera básico y profundo. Finalmente, en ésta misma Fase 2, al contrastar las estrategias surgidas de los instrumentos, los ejecutivos coincidieron, una vez más, en destacar las estrategias fundamentadas sobre los valores culturales cualitativos como las de mayor aporte, más descriptivas, abundantes y de mayor apego a la realidad observada por ellos en HOPO (entrevista con ejecutivos de HOPO, Mayo 2005). Aún más, los ejecutivos pudieron identificar, de los evaluadores, los aportes de estrategias logradas sobre valores detectados por el método cualitativo como las de mejor presentación, profundidad, y practicabilidad asociada a sus percepciones de la vivencia en HOPO.

## **8. CONCLUSIÓN**

Sobre la base de lo actuado hasta la concreción de la Fase 2, el autor se permite presentar las siguientes proyecciones preliminares-tentativas:

1. La valides en cuanto a la aplicación del instrumento cuantitativo OCAI queda expuesta por los perfiles producidos (Fase 1) tanto por la muestra de participantes

adultos como por la del grupo especial de jóvenes solteros.

2. La evaluación temprana (Fase 1) de todos los valores culturales surgidos de los distintos instrumentos, por parte de los ejecutivos de HOPO, señala a la metodología cualitativa como la más acertada en producir los verdaderos valores culturales en HOPO. En adición, el mismo análisis de los ejecutivos permitió que se vislumbrara la ventaja, y eficacia, de la metodología sistemática – científica – por encima de los métodos intuitivos – empíricos – de detección de valores culturales en una organización.
3. Sobre la base de una mayor identificación y clasificación (Fase 2) de niveles de procedencia, por parte de los evaluadores, respecto a los valores culturales procedentes de la metodología cualitativa, se pudo presentar la mencionada metodología como la más eficaz en detectar los elementos pertenecientes a los niveles subyacentes. De manera similar, luego de un análisis comparativo de las estrategias aportadas por las acciones del experimento, los ejecutivos coincidieron en señalar al instrumento cualitativo como el más eficaz generador de estrategias ajustadas a la percepción real de HOPO hoy día. Por último, los ejecutivos dejaron manifiesta su aceptación del método sistemático, versus el intuitivo, como el más eficaz en la tarea de generar estrategias válidas. No se puede omitir el señalamiento de los ejecutivos respecto a la relación impulsora que los valores culturales surgidos de la metodología cualitativa imponen sobre los valores estratégicos sugeridos por los evaluadores. En otras palabras, se logra ver en la Fase 2 un asomo tentativo del cumplimiento de la teoría del alineamiento.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baker, T., & Hawes, J. (1995). An empirical investigation into the impact of organizational culture and marketing strategy

on firm performance. Retrieved April 1, 2003, from <http://www.sbaer.edu/Research/1995/SMA/95swa005.htm>

Cameron, Kim S., & Quinn, Robert E. (1999). Diagnosing and changing organizational culture: Based on the competing values framework. Reading, Massachusetts: Addison – Wesley Publishing Company, Inc.

Competency Suite. (1999). Culture Scope.net, Product Demonstration. Retrieved July 2, 2001, from <http://www.competencysinte.com/scope.htm>

Deal, T., E., & Kennedy, A., A. (1999). The new corporate cultures. Cambridge: Perseus Publishing

Deal, T., E. & Kennedy, A., A. (2000) Corporate cultures: the rites and rituals of corporate life. Cambridge: Perseus Books Publishing, L.L.C.

Denison, D., R. (2000). The Denison organizational culture survey. Retrieved March 9, 2003, from <http://www.denisonculture.com/>

Fraser, D. (1998). The cultural dimensions of standardized programs. Retrieved March 20, 2002, from [www.pamij.com/fraser.html](http://www.pamij.com/fraser.html)

Garden, A. (2000). Reading the Mind of the Organization: Connecting the Strategy with the Psychology of the Business. England: Gower Publishing Limited.

Gibney, F. (2002, January 14). Vrrrooom at the top. Time, 159(2). pp.42-43

Golnaz, S., & Lees, B. (2001). Developing corporate culture as a competitive advantage. The Journal of Management Development, 20(10). 583-859

Hagberg, R., & Heifetz, J., (1997-Winter, 2000). Corporate culture/organizational culture: Understanding and assessment (Telling the

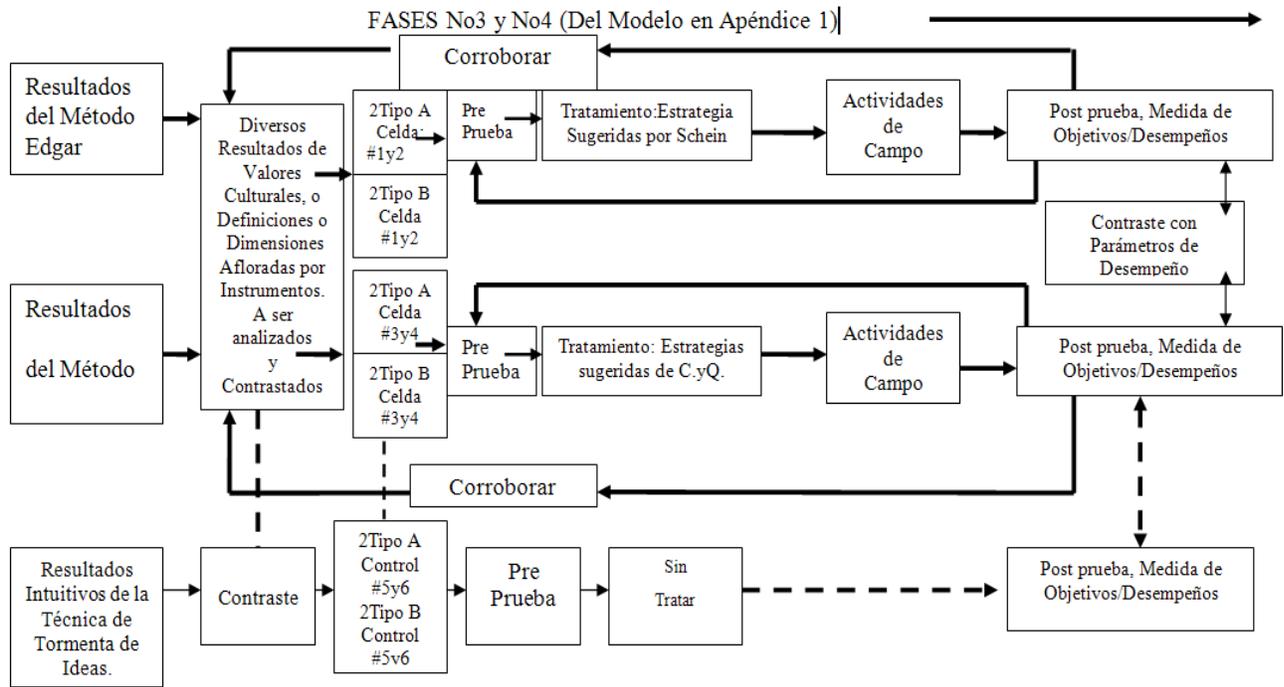
- CEO his/her baby is ugly). [Hagberg Consulting Group]. Retrieved August 22, 2003, from <http://www.hcgnet.com/html/articles/understanding-culture.html> & [http://www.hcgnet.com/content/Insights/Telling\\_the\\_CEO\\_the\\_Baby\\_is\\_Ugly.pdf](http://www.hcgnet.com/content/Insights/Telling_the_CEO_the_Baby_is_Ugly.pdf)
- Hall, Alice A. (1997). Tacit culture change: A model of change constructed from institutional assumptions and beliefs. Unpublished thesis from the digital library and Archives, the VTETD collection. Virginia State University. Retrieved 5 May, 2000. Available: <http://scholar.lib.VT.edu/theses/available/etd-5148142539751141>
- Harrison, M. I., & Shirom, A. (1999). Organizational diagnosis and assessment: Bridging theory and practice. California: Sage Publications, Inc.
- Herrero, J. (2000). La cultura de la Empresa en la Era Digital. [Hay-Group, España]. Retrieved March, 2001, from <http://haygroup.es/downloads/jh1.pdf>
- Hofstede, G., Neuijen, B., Ohayo, D., & Sanders, G. (1990, June). Measuring organizational cultures: A qualitative and quantitative study across twenty cases. *Administrative Science, quarterly*, 35(2), 286(31)
- Kanungo, S., Sadavarti, S., & Srinivas, Y. (2001). Relating IT strategy and organizacional cultura: An empirical study of public sector units in India. *Journal of Strategic Information systems*, 10. 29-57.
- Kotter, J. (1993, October). Culture impacts the bottom line. *Executive Excellence*, 10(10), 12-15.
- Küng-Shankleman, L. (2000b). Inside the BBC and CNN: Managing media organizations. Routledge: London.
- Levin, I., (2000, Spring). Five windows into organizacional cultura: An assessment framework and approach. *Organizational Development Journal*, 18(1), 83-94.
- McNamara, C. (1999) Strategic planning (in nonprofit or for-profit organizations. Retrieved April 12, 2001, from [http://www.mapnp.org/library/plan\\_dec/str\\_plan/str\\_plan.htm](http://www.mapnp.org/library/plan_dec/str_plan/str_plan.htm)
- Martin, J. (1992). Cultures in organizations: Three perspectives. New York: Oxford University Press.
- Nickols, Fred (2000). Three forms of strategy : Corporate, competitive, and strategy in general. Retrieved January 10, 2003, from [http://home.att.net/~nickols/three\\_forms\\_of\\_strategy.htm](http://home.att.net/~nickols/three_forms_of_strategy.htm)
- Organizational culture inventory (OCI). (2000). Human Synergistics/Center for Applied Research, Inc. Retrieved July 17, 2003, from <http://www.hscar.com/oci.htm>.
- Pino, Yesmin, A., (2001). Perspectiva metodológica para el diagnóstico de la cultura organizacional. Retrieved February 12, 2003, from <http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/RRhh/diagcultura.htm>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (1998, 2003). Metodología de la investigación. (2da Ed., 3a Ed.). Mexico: McGraw-Hill.
- Schein, E. H. (1985). Organizational culture and leadership. San Francisco: Jossey-Bass Inc., Publishers.
- Schein, E. H. (1999). The corporate culture survival guide: Sense and non sense about culture change. San Francisco: Jossey - Bass Inc., Publishers.

Schneider, B., Ed., (1990). *Organizational Climate and Culture*. San Francisco, California: Jossey.Bass, Inc.

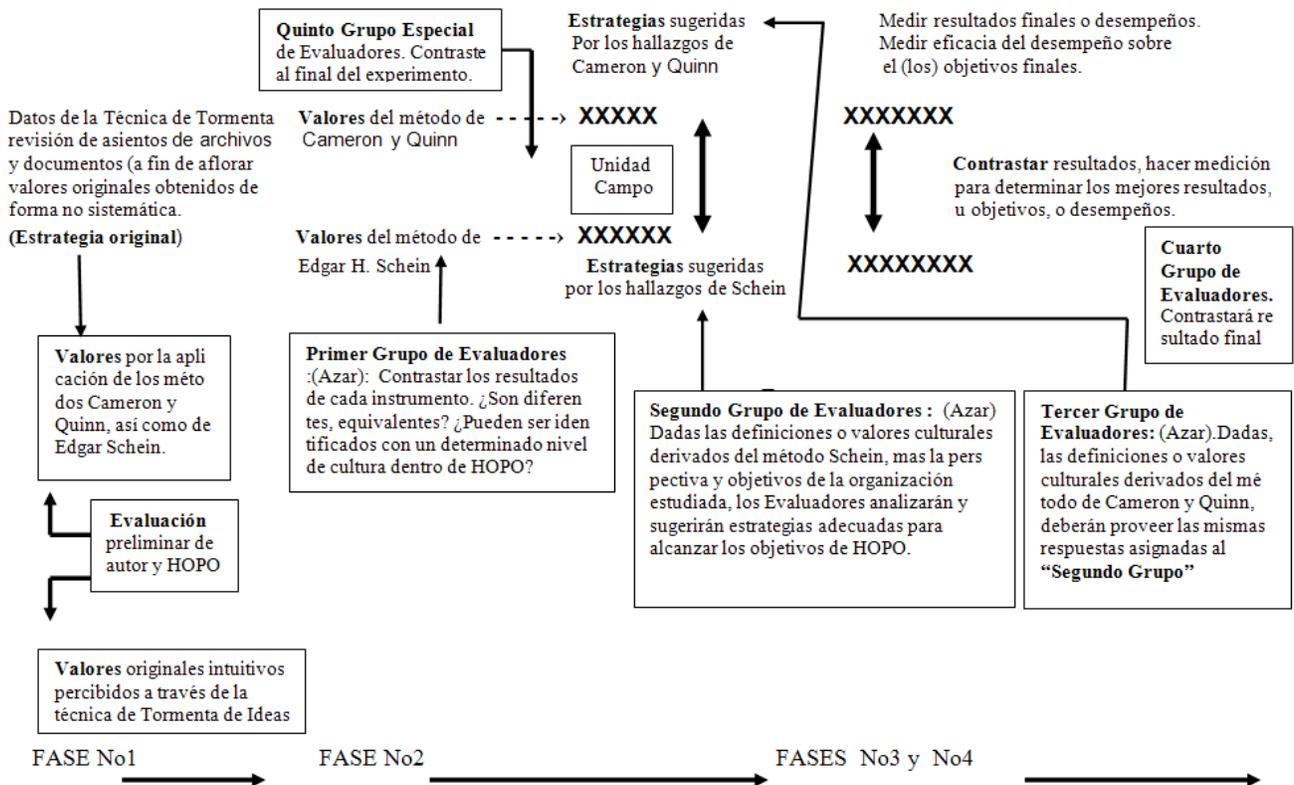
Siliceo, A., Casares, D., & González, J. (1999). *Liderazgo, valores y cultura organizacional: Hacia una organización competitiva*. Mexico: McGraw – Hill.

Taylor, C. (2002, March 4). HP's Fierce Face-Off. *Time*, 159(9), pp.46-48

Zwell, M. (2000). *Creating a culture of competence*. New York: John Wiley & Sons, Inc.



APÉNDICE 2



APÉNDICE 1

### Apéndice 3

---

Percepción y Evaluación Preliminar de los  
Evaluadores sobre los Valores Culturales  
Surgidos por Aplicación de los Instrumentos en  
la Fase 1

---

Instrumento de Medición y Nivel del Valor Cultural de los Temas Surgidos	Número de Veces que los Evaluadores Percibieron los Valores a Ellos Presentados ***
Nivel Superficial de Acuerdo a Schein*	81%
Nivel “Espoused” de Acuerdo a Scheni*	95%
Nivel de Asunción Subyacente de Acuerdo a Schein*	64%
Nivel de Asunción Subyacente de Acuerdo a Cameron y Quinn**	23%

\* El procedimiento recomendado por Schein condujo, directamente, a obtener valores culturales pertenecientes a (surgidos de) los tres niveles por él defendidos.

\*\* El procedimiento recomendado por Cameron y Quinn condujeron, solamente, a obtener valores culturales tipo básico, subyacentes, o verdaderos de la organización evaluada.

\*\*\* La correcta identificación, por parte de los evaluadores, de los “valores” a ellos presentados como pertenecientes a los respectivos niveles enfatizados por los respectivos autores.



# CÓDIGOS CONVOLUCIONALES DE PRODUCTO: Propiedades de Distancia, Codificación y Decodificación

Carlos A. Medina C., Ph. D.  
Universidad Tecnológica de Panamá  
[carlos.medina@utp.ac.pa](mailto:carlos.medina@utp.ac.pa)

Vladimir Sidorenko, Ph. D.  
Universidad de Ulm  
[vladimir.sidorenko@uni-ulm](mailto:vladimir.sidorenko@uni-ulm)

## RESUMEN

Existen multiplicidad de métodos bien conocidos para combinar códigos de bloque para corrección de errores. Sin embargo, no son tan diversos los métodos aplicados para la combinación de códigos convolucionales. Por esto, se propone la aplicación del método de producto directo, método tradicional para códigos de bloque, a la construcción de nuevos códigos convolucionales. En este estudio se define e investiga el producto directo aplicado a códigos convolucionales, considerando algunas de las propiedades de las matrices de generación y paridad resultantes, así como la definición de un nuevo concepto de distancia, la "distancia de bloque" para los códigos convolucionales componentes y el código de producto resultante. Además, se consideran algunos métodos para la codificación y decodificación de estos códigos de producto.

**Palabras claves:** códigos convolucionales, códigos de producto, distancia de bloque, decodificación iterativa.

## ABSTRACT

There are many well-known methods for combining block codes for error correction. However, they are not as different methods used for combining convolutional codes. Therefore, it is proposed the method of direct product, a traditional method for block codes, to the construction of new convolutional codes. This study defines and investigates the direct product applied to convolutional codes, considering some of the properties of the resulting generation and parity check matrices, and the definition of a new concept of distance, the block distance for components convolutional codes and the resulting product code. Moreover, some methods are considered for coding and decoding of these product codes.

**Key words:** convolutional codes, block distance, iterative decoding.

## 1. INTRODUCCIÓN

La combinación de códigos conocidos es un método poderoso para obtener nuevos códigos que presenten características ventajosas tales como: grandes distancias, capacidad para corrección de errores en ráfaga y aleatorios,

longitudes de bloque grandes, matrices de verificación de paridad de baja densidad, y además, que permitan la decodificación utilizando técnicas con baja complejidad incluyendo métodos iterativos.

Existen muchos métodos bien conocidos para combinar códigos de bloque (ver e.g. [1]). Uno de los primeros métodos para combinación, "el producto directo", fue propuesto por Elias [2] en 1954. Dados dos códigos de bloque lineales  $\bar{C}$  para codificación horizontal y  $C^{\downarrow}$  para codificación vertical, con longitudes  $\bar{n}$  y  $n^{\downarrow}$ , y distancias de Hamming  $\bar{d}$  y  $d^{\downarrow}$ , respectivamente, el código de producto directo  $C$  consiste en todas las matrices  $n^{\downarrow} \times \bar{n}$ , tales que cada fila pertenece al código horizontal  $\bar{C}$  y cada columna pertenece al código vertical  $C^{\downarrow}$ . La distancia del código  $C$  es  $\bar{d} d^{\downarrow}$ .

Para códigos convolucionales son muy pocos los métodos sugeridos para combinarlos. Tal vez uno de los más poderosos métodos, los códigos convolucionales "entretrejidos" ("woven convolutional codes") ha sido considerado en [3] y [4]. Métodos para combinar códigos convolucionales, similar al producto directo de códigos de bloque, se han sugerido y descrito en [5] y [6].

En este trabajo se brinda una definición algebraica del producto directo de códigos convolucionales y se investigan las propiedades de la codificación, la distancia de dichos códigos, y algunas técnicas para decodificación. La relación entre los códigos convolucionales de producto y los códigos convolucionales entretrejidos se discute en [7].

La publicación clásica de Fomey [8] muestra que los códigos convolucionales pueden tratarse como "códigos de bloque" sobre el campo  $F(D)$  de funciones racionales en el indeterminado  $D$  sobre cualquier campo finito  $F$ . Esto, nos permite definir el producto directo de códigos convolucionales y encontrar sus matrices generadora y de verificación de paridad, en forma similar a los códigos de bloque, de una manera sencilla. En contraste con los códigos de bloque, la distancia libre (*free distance*) de los códigos convolucionales de producto alcanza el producto de las distancias de los códigos componentes (i.e.,  $\bar{d} \cdot d^{\downarrow}$ ) solamente si algunas restricciones adicionales se satisfacen. Siguiendo las relaciones con los códigos de bloque, sugerimos el concepto de *distancia de bloque* para un código convolucional. Además, esta distancia resulta importante porque permite la estimación de la distancia libre  $d_f$  del código convolucional de producto en forma sencilla. Se estudia la forma de calcular la distancia libre  $d_f$  de un código de producto utilizando las distancias de bloque y se muestra que este método resulta en una estimación precisa y simple.

Un código convolucional de producto puede considerarse como una concatenación serial de los códigos componentes y de esta forma, el mismo puede decodificarse utilizando métodos iterativos. Entre ellos, consideramos la decodificación iterativa de códigos concatenados en serie y la decodificación iterativa de producto. En [5] y [6], este último método se denomina filtrado MAP o procesamiento iterativo.

Las siguientes secciones incluyen algunas definiciones importantes para comprender el desarrollo del código propuesto, la forma como codificar el código, las propiedades de las matrices de generación y paridad, la estimación de la distancia libre del código y algunos aspectos sobre la decodificación del mismo.

## 2. DEFINICIONES

Sea  $F$  un campo de Galois (GF),  $F = GF(q)$ . Así,  $F(D)$  denota el campo de funciones racionales sobre  $F$  en el indeterminado  $D$  (llamado operador de retardo). Cada elemento  $a(D)$  distinto de cero

de  $F(D)$  puede representarse en forma única por un elemento de  $F$  como una razón de polinomios en  $F$  (i.e.,  $a(D) = p(D)/q(D)$ , donde  $p(D)$  y  $q(D) \neq 0$  y relativamente primos), y cada elemento  $a(D)$  puede asociarse en forma única con una serie formal de Laurent de la forma [9]

$$a(D) = \sum_{i \geq m} a_i D^i \quad (1)$$

donde  $m$  puede ser cualquier entero, los coeficientes  $a_i$  pertenecen al campo  $F$ , y  $D$  es una variable formal (indeterminado).

En este estudio nos limitaremos a códigos binarios, i.e., GF(2) denotado  $F_2$ .

*Definición 1:* Un código  $(n,k)$  convolucional binario  $C$  es un sub-espacio  $k$ -dimensional de  $\{F(D)\}^n$ , donde  $F = GF(2)$ , i.e., un sub-espacio del espacio vectorial de  $n$ -tuplos en  $F_2(D)$ . La razón  $R$  del código convolucional  $C$  se define como  $R = k/n$ .

*Definición 2:* Una matriz  $k \times n$   $G(D)$  cuyas filas forman una base de un código  $(n,k)$  convolucional se denomina una matriz generadora del código.

*Definición 3:* Para cualquier código  $(n,k)$  convolucional  $C$ , sea  $H(D)$  una matriz  $r \times n$  en  $F(D)$  con rango  $r = n - k$  tal que  $v(D)$  es una palabra código de  $C$  si y sólo si

$$v(D)H^T(D) = 0$$

donde  $T$  denota el operador transposición. Cualquiera de tales matrices  $H(D)$  se denomina una matriz de verificación de paridad del código.

*Definición 4:* Sean  $C^{\bar{}}$  y  $C^{\downarrow}$  códigos  $(\bar{n}, \bar{k})$  y  $(n^{\downarrow}, k^{\downarrow})$  convolucionales, respectivamente; entonces, el producto directo  $C^{\bar{}} \otimes C^{\downarrow}$  se define como el código cuyas palabras código consisten de todos los arreglos  $\bar{n} \times n^{\downarrow}$ , en los cuales las filas pertenecen al código  $C^{\bar{}}$  y las columnas al código  $C^{\downarrow}$ .

*Lema 1:* El código de producto directo definido es un sub-espacio  $\bar{k} \cdot k^{\downarrow}$ -dimensional de  $F(D)^{\bar{n} \cdot n^{\downarrow}}$ .

### 3. CODIFICACIÓN

En esta sección se consideran la forma de codificar el código convolucional de producto y se estudian las características de las matrices generadora y de paridad del mismo.

#### 3.1 Matriz generadora

La codificación del producto directo  $\bar{C} \otimes C^l$  de códigos convolucionales puede realizarse de forma similar a la de los códigos de bloque como se indica:

Sean  $\bar{G}(D)$  y  $G^l(D)$  matrices generadoras del código  $(\bar{n}, \bar{k})$  horizontal  $\bar{C}$  y  $(n^l, k^l)$  vertical  $C^l$ , respectivamente. Denote por  $U(D)$  una matriz  $k^l \times k^-$  de información sobre  $F(D)$ . Ahora se puede aplicar una codificación "fila-columna" (FC); i.e., primero se codifica cada fila de  $U(D)$  usando la matriz generadora  $\bar{G}(D)$ , y se obtiene una matriz  $V(D) = U(D) \bar{G}(D)$ . Luego, cada columna de  $V(D)$  se codifica utilizando la matriz generadora  $G^l(D)$ . Después de esta codificación FC se obtiene

$$c(D) = G^{lT}(D) [U(D) \bar{G}(D)]. \quad (3)$$

También se puede aplicar una codificación "columna-fila" (CF) y obtener la misma multiplicación de matrices en otro orden:

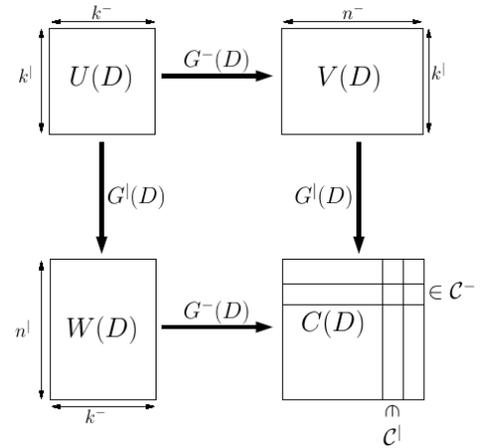
$$c(D) = [G^{lT}(D) U(D)] \bar{G}(D). \quad (4)$$

En cualquier caso, note que la matriz de la palabra código codificada de producto  $C(D)$  está dada por

$$C(D) = G^{lT}(D) U(D) \bar{G}(D). \quad (5)$$

De la ecuación (3) se sigue que cada columna de  $C(D)$  pertenece a  $C^l$ , y de la ecuación (4) que cada fila de  $C(D)$  pertenece a  $\bar{C}$ , de forma que por la *Definición 4* se obtiene una *palabra código*  $C(D) \in \bar{C} \otimes C^l$ . La Figura 1 muestra el proceso de codificación.

Ahora, considere  $C$  el conjunto de matrices  $C(D)$  obtenido por la codificación de todas las matrices



**Figura 1.** Codificación de un código convolucional de producto.

$U(D)$  usando la ecuación (5). A continuación se demuestra que  $C$  es un código  $(\bar{n} n^l, \bar{k} k^l)$  convolucional, y que  $C = \bar{C} \otimes C^l$ . Debemos mostrar que  $C$  satisface la *Definición 1*, y que todas las matrices  $C(D)$  que satisfacen la *Definición 4* están incluidas en  $C$ .

Para mostrar esto, reemplacemos las matrices  $C(D)$  por vectores  $c(D)$  como sigue. Sea  $row(A)$  un vector obtenido al escribir los elementos de la matriz  $A$  fila por fila. Así, reemplazando cada matriz  $C(D)$  por el vector  $c(D) = row[C(D)]$  obtenemos un código  $C$  de vectores. Usando la notación  $u(D) = row[U(D)]$  podemos reescribir el procedimiento de codificación dado por la expresión (3) para el código de producto en la forma vectorial tradicional:

$$c(D) = u(D) G(D) \quad (6)$$

donde la matriz generadora  $G(D)$  está dada por

$$G(D) = G^l(D) \otimes G^-(D). \quad (7)$$

La derivación de (7) está basada en la siguiente propiedad del producto de Kronecker [10]:

$$row(ABC) = row(B)(A^T \otimes C) \quad (8)$$

donde  $A$ ,  $B$  y  $C$  son matrices con las dimensiones adecuadas y  $\otimes$  indica el producto de Kronecker.

Ya que las matrices generadoras  $G^-(D)$  y  $G^+(D)$  tienen elementos de  $F(D)$ , i.e., son matrices racionales, de la expresión (7) se tiene que  $G(D)$  también es una matriz racional  $k^-k^+ \times n^-n^+$  de rango completo [10]. Así, el código  $C$  generado por  $G(D)$  es un sub-espacio  $k^-k^+$ -dimensional de  $F(D)^{n^-n^+}$ . Esto significa que todas las matrices  $C(D)$  que satisfacen en la Definición 3 están incluidas en  $C$  debido al Lema 1. Finalmente, se concluye que el código  $C$  generado por la expresiones (5) es

- el producto directo de los códigos convolucionales  $C^-$  y  $C^+$ ;
- un código convolucional  $(n^-n^+, k^-k^+)$ .

Este código  $C$  se denomina un *código convolucional de producto*.

### 3.2 Matriz de verificación de paridad

Asuma que  $H^-(D)$  y  $H^+(D)$  son matrices de verificación de paridad de los códigos componentes. De la Definición 3 del código de producto  $C$  se tiene que una matriz  $C(D)$   $n^+ \times n^-$ , pertenece a  $C$  si y sólo si las siguientes ecuaciones de verificación de paridad se satisfacen para las filas y columnas de la matriz  $C(D)$ :

$$\begin{aligned} C(D)H^-(D)^T &= 0, \\ H^+(D)C(D) &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

La ecuación de verificación de paridad (9) puede también describirse en forma vectorial usando la ecuación (8) como

$$c(D)H(D)^T = 0, \quad (10)$$

donde la matriz de verificación de paridad es

$$H(D) = \begin{pmatrix} I_{n^-} \otimes H^-(D) \\ H^+(D) \otimes I_{n^-} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

donde  $I_m$  corresponde a la matriz identidad  $m \times m$ . *Observación:* la matriz  $H(D)$  tiene filas redundantes y la misma puede reducirse. Si  $n^+$  o  $n^-$  es grande, la matriz  $H(D)$  es dispersa y se podrían aplicar entonces métodos de decodificación iterativa para códigos LDPC (*low*

*density parity check codes*) a la decodificación de estos códigos de producto.

### 3.3 Algunas propiedades de la matriz generadora

Utilizando las definiciones de [11] se pueden establecer las siguientes propiedades de la matriz generadora de los códigos convolucionales de producto.

*Teorema 2:* Sean  $G^-(D)$  y  $G^+(D)$  matrices generadoras polinomiales con memoria  $m^-$  y  $m^+$ , y longitudes de restricción totales  $v^-$  y  $v^+$ , respectivamente. La memoria  $m$  y la longitud de restricción total  $v$  de la matriz generadora  $G(D)$  del código convolucional de producto son

$$m = m^- + m^+ \quad \text{y} \quad v = k^+v^- + k^-v^+.$$

*Teorema 3:* Si  $G^-(D)$  y  $G^+(D)$  son matrices generadoras racionales sin retardo, entonces la matriz  $G(D)$  del código convolucional de producto es una matriz sin retardo *Teorema 4:* Si  $G^-(D)$  y  $G^+(D)$  son matrices generadoras sistemáticas, entonces la matriz  $G(D)$  del código convolucional de producto es sistemática.

*Teorema 5:* Si  $G^-(D)$  y  $G^+(D)$  son matrices de codificación básicas mínimas, entonces la matriz  $G(D)$  del código convolucional de producto es una matriz de codificación básica mínima.

La matriz generadora del código de producto hereda las propiedades de los códigos componentes. Por lo tanto, si se construye un código convolucional de producto con dos códigos componentes con matrices de codificación básicas mínimas, la matriz generadora resultante será una matriz de codificación no-catastrófica, la forma canónica de controlador de la matriz codificadora será un codificador mínimo y el trellis de Forney correspondiente del código será un trellis mínimo, ya que éstas son propiedades de las matrices de codificación básicas mínimas.

## 4. ESTIMACIÓN DE DISTANCIA

En esta sección se introduce el concepto de distancia de bloque y la forma como se puede

estimar la distancia libre del código convolucional de producto utilizando este concepto.

#### 4.1 Distancia de bloque

En contraste con los códigos de bloque, la distancia libre  $d_f$  de un código convolucional de producto puede resultar menor que el producto  $d_f^- d_f^|$  de las distancias libres de los códigos componentes. Para estimar  $d_f$  y derivar restricciones para garantizar la "distancia de producto"

$$d_f \geq d_f^- d_f^| \quad (12)$$

introducimos el concepto de distancia de bloque de un código convolucional.

Un código  $C$  convolucional  $(n,k)$  es un conjunto de  $n$ -vectores  $c$  sobre un campo de series de Laurent  $F(D)$ , i.e.,  $C$  puede considerarse como un código de bloque  $(n,k)$  sobre el campo  $F(D)$ . La distancia de Hamming  $D_{F(D)}(c_1, c_2)$  entre dos vectores  $c_1, c_2$  sobre  $F(D)$ , similar a los códigos de bloque, es igual a el número de posiciones en las que estos vectores difieren.

*Definición 4:* La distancia de bloque  $d_B$  de un código  $C$  convolucional  $(n,k)$  se define como

$$d_B(C) = \min_{\substack{c_1, c_2 \in C \\ c_1 \neq c_2}} D_{F(D)}(c_1, c_2) \quad (13)$$

Así,  $d_B$  es la distancia del código mínima del correspondiente código de bloque lineal  $C$  sobre el campo  $F(D)$ . Ya que el código es lineal,  $d_B$  también es igual al peso de Hamming mínimo para todas las palabras distintas de cero.

Para un código  $C$  convolucional  $(n,k)$  con distancia libre  $d_f$  (sobre el campo base  $F$ ) tenemos

$$d_B \leq n, \quad (14)$$

$$d_B \leq d_f. \quad (15)$$

#### 4.2 Estimación de la distancia libre

Volviendo al código convolucional de producto  $C = C^- \otimes C^|$ , de la teoría de los códigos de bloque y utilizando la ecuación (15) se obtiene para la distancia libre de  $C$  que

$$d_f \geq d_B = d_B^- \times d_B^| \quad (16)$$

donde  $d_B^- = d_B(C^-)$ ,  $d_B^| = d_B(C^|)$ . El siguiente teorema mejora esta estimación de la distancia libre.

*Teorema 6:* La distancia libre de  $C$  satisface

$$d_f \geq \max\{d_B^- d_f^|, d_B^| d_f^-\}. \quad (17)$$

Así, si la distancia de bloque de al menos uno de los códigos componentes, por ejemplo el vertical, es igual a su distancia libre, se garantiza la distancia de producto (12).

Sin embargo, la distancia de bloque de un código corto no puede alcanzar su distancia libre debido a (14). Una forma de superar este problema es utilizar un código convolucional *bloqueado*. Otra forma, no discutida aquí, es utilizar códigos componentes con, por ejemplo,  $n^| \geq d_f^|$  y  $d_B^| = d_f^|$ .

El procedimiento de bloqueo [3], [12] no cambia un código convolucional  $(n,k)$  como el conjunto de símbolos sobre el campo base  $F$ . Bloquear un código con un factor de bloqueo  $M$  sólo junta bloques de símbolos de longitud  $n$  en bloques de longitud  $Mn$ , resultando un código  $(Mn, Mk)$  que es esencialmente el mismo código denotado por  $C_{[M]}$ .

La distancia de bloque de un código convolucional típicamente crece con el factor de bloqueo  $M$  hasta que la distancia alcance  $d_f$ ; de forma que se puede establecer el siguiente teorema.

*Teorema 7:* El límite de la distancia de producto (10) se satisface para el código convolucional de producto  $C_{[M]}^- \otimes C^|$  si el factor de bloqueo  $M$  satisface

$$d_B(C) = \min_{\substack{c_1, c_2 \in C \\ c_1 \neq c_2}} D_{F(D)}(c_1, c_2) \quad (18)$$

*Ejemplo (bloqueo):* Sea  $C$  un código convolucional (2,1) codificado con la matriz generadora básica mínima  $G(D) = (1+D^2, 1+D+D^2)$ . Considere el factor de bloqueo  $M = 2$ . La descomposición polinomial de  $G(D)$  [12] es

$$G(D) = G_0 + G_1D + G_2D^2 = (1,1) + (0,1)D + (1,1)D^2.$$

La correspondiente matriz generadora  $G$  semi-infinita [11] es

$$G = \begin{pmatrix} 11 & 01 & 11 & & \\ & 11 & 01 & 11 & \\ & & 11 & 01 & 11 \\ & & & \ddots & \ddots \\ & & & & \ddots & \ddots \end{pmatrix}$$

Para bloquear la matriz  $G$ , considere  $M = 2$  filas de  $G$  y tome las sub-matrices  $2 \times 4$  en lugar de las matrices originales  $1 \times 2$ , esto es

$$G_{[2]} = \begin{pmatrix} 1101 & 1100 & & & \\ 0011 & 0111 & & & \\ & 1101 & 1100 & & \\ & 0011 & 0111 & & \\ & & & \ddots & \ddots \end{pmatrix}.$$

Entonces, la descomposición polinomial de  $G_{[2]}(D)$  corresponde a

$$G_{[2]}(D) = \begin{pmatrix} 1,1,0,1 \\ 0,0,1,1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1,1,0,0 \\ 0,1,1,1 \end{pmatrix} D,$$

de lo que se tiene

$$G_{[2]}(D) = \begin{pmatrix} 1+D & 1+D & 0 & 1 \\ 0 & D & 1+D & 1+D \end{pmatrix}.$$

Generalmente, para construir un código convolucional de producto, solamente se bloquea uno de los códigos componentes.

## 5. DECODIFICACIÓN

Del proceso de codificación, los códigos convolucionales de producto se pueden considerar como un tipo especial de códigos convolucionales concatenados en serie. Por lo tanto, resulta adecuado aplicar un esquema de decodificación iterativo.

Los métodos de decodificación iterativos se basan en algoritmos que utilizan información sobre la confiabilidad de los símbolos de entrada y generan información sobre la confiabilidad de los símbolos de salida [13]. Estos se denominan decodificadores *soft input - soft output* (SISO). La mayoría de estos procedimientos iterativos se basan en el algoritmo de decodificación S/S-APP (*symbol by symbol a posteriori probability*) conocido como BCJR.

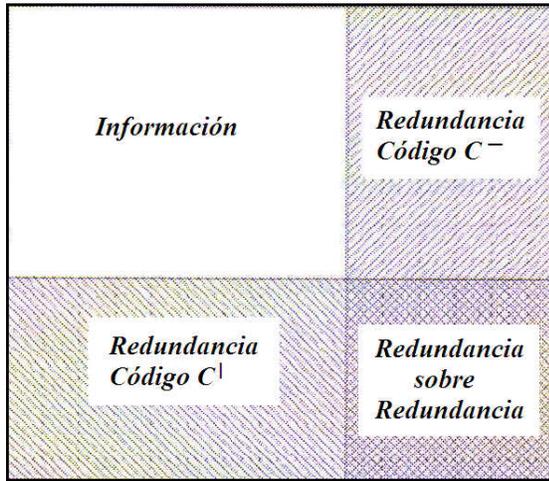
Para códigos concatenados el método de decodificación iterativo se adecua para reflejar la construcción del código [14]. En el caso de un esquema concatenado de dos códigos componentes, se usan dos decodificadores SISO para intercambiar información de confiabilidad correspondientes a los códigos componentes.

Como los códigos convolucionales de producto se pueden considerar como códigos convolucionales concatenados en serie con entrelazado (*interleaving*) de sus códigos componentes, se puede usar el método de decodificación iterativa para códigos concatenados en serie. Además, los códigos de producto permiten la decodificación iterativa de producto, método llamado procesamiento iterativo o filtrado MAP en [5] y [6].

La Figura 2 muestra la estructura de las palabras-código de un código convolucional de producto sistemático<sup>1</sup>. Esta se utiliza para ilustrar que información se pasa entre los decodificadores en los esquemas de decodificación serial y de producto que se muestran en las figuras 3 y 4, respectivamente.

Recuerde que las palabras-código de un código convolucional de producto se pueden separar en palabras-código válidas de los códigos componentes. De esta forma, independientemente del proceso de codificación, la decodificación iterativa puede realizarse decodificando los códigos componentes enen, uno primero y otro después, en forma iterativa.

<sup>1</sup> Un código sistemático contiene la palabra de información inalterada como parte de la palabra-código.



**Figura 2.** Estructura de palabra-código de un código convolucional de producto sistemático.

Las figuras 3 y 4 ilustran el proceso de decodificación iterativa serial y de producto, respectivamente. Note la diferencia en la información que se utiliza en el proceso de decodificación. En ambos casos se usa la palabra-código como entrada pero en cada método la información que se intercambia entre los decodificadores es diferente. En los diagramas de bloque,  $L_{ch}$  corresponde a la información de salida del demodulador después del canal, que se normaliza de acuerdo al canal. Estos valores  $L$  de canal recibidos se separan en secuencias correspondientes a los códigos constitutivos,  $L_{ch}^+$  de  $C^+$  y  $L_{ch}^-$  de  $C^-$ , que se usa en los decodificadores SISO del correspondiente código.  $L_{ext}$ , corresponde a los valores  $L$  extrínsecos producidos por los decodificadores y que junto con los valores  $L$  del canal,  $L_{ch} + L_{ext}$  corresponden a los valores de confiabilidad de los símbolos de información de las palabras código para cada código componente.  $L_a$  son valores *a priori* para los símbolos de información que están disponibles a la salida de los decodificadores SISO y que se utilizan en el proceso iterativo.

Finalmente, después de cierto número de iteraciones hasta alcanzar la convergencia o las iteraciones que permita la aplicación (por restricciones de tiempo de procesamiento), se entregan los  $L(u)$  que son los valores

correspondientes a la palabra de información decodificada.

Note que en la decodificación de producto se utilizan todos los valores de la palabra-código a diferencia de la decodificación serial que sólo intercambia valores de confiabilidad de alguno de los códigos componentes.

## 6. EJEMPLO

Sea  $C^{\otimes}$  un código convolucional de producto cuyos códigos convolucionales componentes  $C^+$  y  $C^-$  son códigos (2,1) generados por la matriz codificadora básica mínima  $G(D) = (1+D^2, 1+D+D^2)$  con  $m = v = 2$ ,  $d_B(C) = 2$  y  $d_f = 5$ .

Entonces, de la ecuación (7), se tiene que la matriz generadora  $G^{\otimes}(D)$  del código de producto  $C^{\otimes} = C^- \otimes C^+$ , esta dada por  $G^{\otimes}(D) = (1+D^4, 1+D+D^3+D^4, 1+D+D^3+D^4, 1+D^2+D^4)$ . Esta es una matriz de codificación básica mínima, que tiene  $m^{\otimes} = v^{\otimes} = 4$ . Estos resultados están acordes con los Teoremas 2 y 5. Del límite en la ecuación (15) se obtiene la estimación  $d_f^{\otimes} \geq 10$ , cuando la distancia real del código es 13. La matriz de verificación de paridad se puede obtener de la expresión (9)

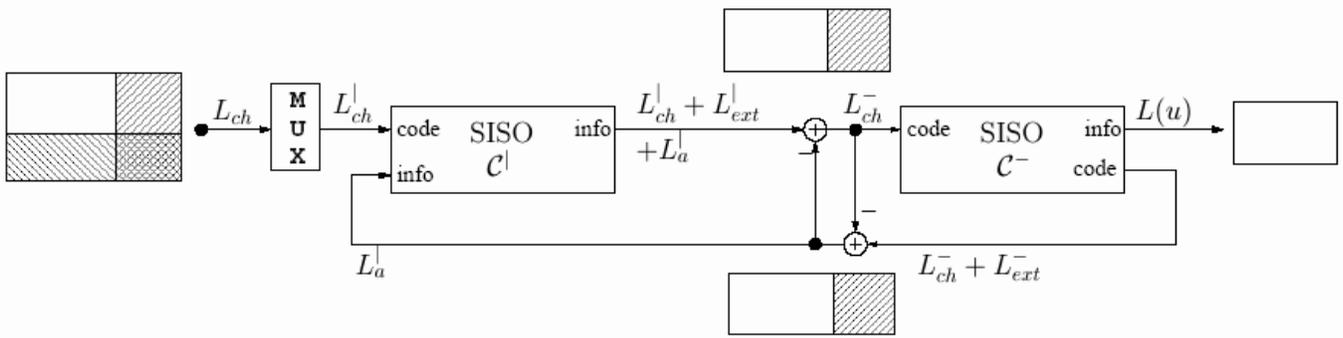
$$H^{\otimes}(D) = \begin{pmatrix} 1+D+D^2 & 1+D^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1+D+D^2 & 1+D^2 \\ 1+D+D^2 & 0 & 1+D^2 & 0 \\ 0 & 1+D+D^2 & 0 & 1+D^2 \end{pmatrix}$$

Esta matriz es redundante, y por ejemplo, se podría eliminar la última fila de la misma.

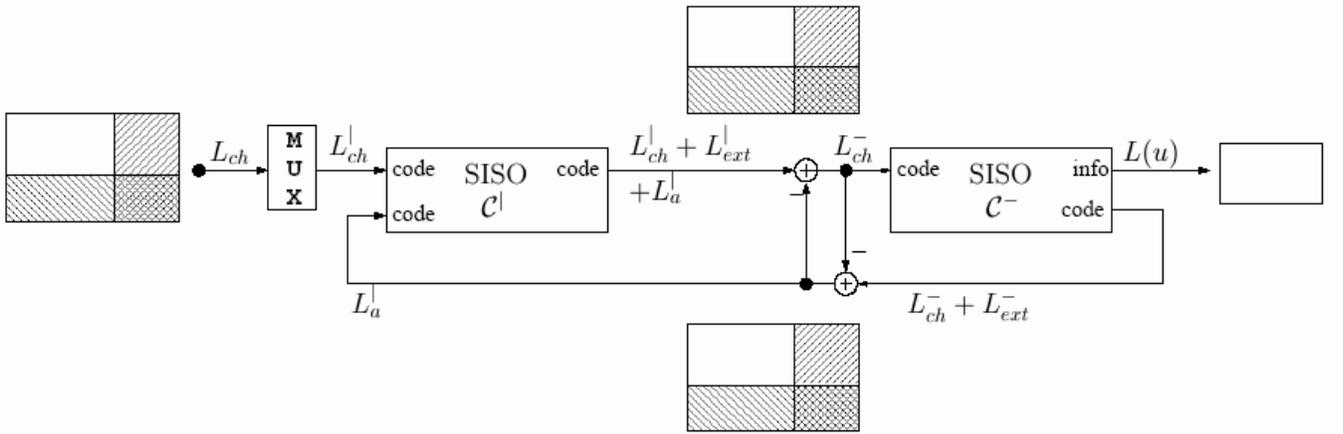
Para incrementar la distancia libre del código de producto se puede bloquear, por ejemplo, el código vertical  $C^+$  con un factor  $M$ . La siguiente tabla muestra la distancia libre del código de producto  $C^{\otimes} = C^- \otimes C^+_{[M]}$  y la distancia estimada como función de  $M$ .

$M$	1	2	3	4	5	6
$d_B(C^+_{[M]})$	2	3	4	4	5	5
Límite (15)	10	15	20	20	<b>25</b>	25
$d_f(C^{\otimes})$	13	16	22	22	<b>25</b>	25

**Tabla 1.** Distancia libre del código de producto como función del factor de bloqueo  $M$ .



**Figura 3:** Diagrama de bloques de un decodificador iterativo serial para un código convolucional de producto.

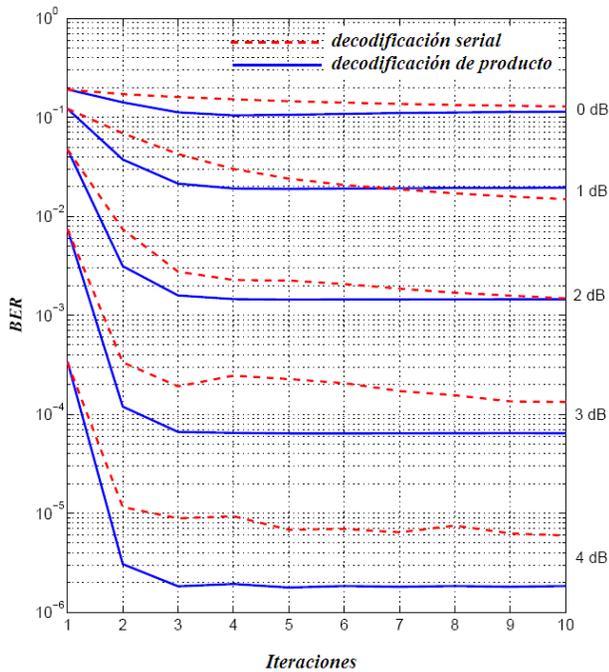


**Figura 4.** Diagrama de bloques de un decodificador iterativo de producto para un código convolucional de producto.

Este ejemplo muestra que la estimación de la distancia provista por la expresión (17) basada en la distancia de bloque es precisa. Como resultado, para garantizar la distancia de producto es suficiente tener un factor de bloqueo  $M = 5$  dado por el *Teorema 7*. Esta mejora concuerda con el *Teorema 10*.

En la siguiente figura se compara el desempeño de la decodificación serial y de producto para el código  $C$  utilizando un factor de bloqueo  $M = 10$ . Aunque es suficiente un valor de  $M = 5$  para alcanzar la distancia de producto, el factor  $M$  también juega el papel del tamaño del entrelazado lo cual mejora el desempeño de la decodificación iterativa. La gráfica se ha obtenido de la simulación de un sistema de comunicación que usa un código convolucional de producto con modulación BPSK a través de un canal AWGN sin memoria. Para cada razón

señal a ruido, se indica la razón de error de bit (BER) después de cada iteración usando la decodificación serial y de producto. De estas curvas puede observarse que la decodificación de producto converge rápidamente (sólo se necesitan tres iteraciones) y en algunos casos tiene un mejor desempeño que la decodificación serial.



**Figura 5.** Comparación de los métodos iterativos de decodificación serial y de producto.

## REFERENCIAS

[1] F. J. MacWilliams and N. J. Sloane, *The Theory of Error Correcting Codes*, North-Holland, Amsterdam, 1992.

[2] P. Elias, "Error Free Coding", IRE Trans. on Inf. Theory, Vol. PGIT-4, pp 29-37, September 1954.

[3] S. Höst, *On Woven Convolutional Codes*, Ph.D. Thesis, Lund University, 1999.

[4] S. Höst and R. Johannesson and Y. Zyablov, "Woven Convolutional Codes I: Encoder Properties", IEEE Trans. on Inf. Theory, Vol 48, pp. 194-161, January 2002,

[5] J. Lodge, P. Hoeher, H. Hagenauet, "The Decoding of Multidimensional Codes using Separable MAP Filters", Proceedings of the 6<sup>th</sup> Biennial Symposium on Communications, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, pp. 343-346, May 27 -29, 1992.

[6] J. Lodge, R. Young, P. Guinand, "Separable Concatenated Convolutional Codes: The Structure and Properties of a Class of Codes for Iterative Decoding", European Trans. on Telecom., Vol. 6, No.5, pp. 535-542, Sept./Oct. 1995.

[7] M. Bossert, C. Medina, V. Sidorenko , "Encoding and Distance Estimation of Product Convolutional Codes", Proc. 2005 IEEE Int. Sympos. on Information Theory ISIT'05), Adelaide, Australia, pp. 1063-1067, September 4-9, 2005.

[8] G. D. Forney, Jr., "Convolutional Codes I: Algebraic structure", IEEE Trans. on Inf. Theory, vol. 16, pp. 720-738, November 1970.

[9] J. L. Massey, Coding Theory, Chapter 16 in Vol. 5: *Combinatorics and Geometry*, Handbook of Applicable Mathematics, Eds. W. Ledermann and S. Vajda, Publ. Wiley, Chichester, UK, 1985.

[10] Willi-Hans Steeb, *Kronecker Product of Matrices and Applications*, Manheim; Wien; Zwicb: BI-Wissenschaftsverlag.-Ver., 1991.

[11] R. Johannesson and K. Sh. Zigangirov, *Fundamentals of Convolutional Coding*, IEEE Press, New York, 1999.

[12] R. J. McEliece, *The algebraic theory of convolutional codes*, Handbook of coding theory, Elsevier Science B.V., 1998.

[13] J. Hagenauer, E. Offer, and L. Papke, "Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes", IEEE Trans. on Inf. Theory, IT -42, pp.429 -445, 1996.

[14] M. Bossert, *Channel coding for Telecommunications*, John Wiley & Sons, INC. Chichester, UK, 1999.



# MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON ESCENARIOS DE CONTAMINACIÓN DIFUSA, PARA LA PLANIFICACIÓN AMBIENTAL EN LA CUENCA DEL RÍO DAVID

Viccelda María Domínguez, Ph. D.

Universidad Tecnológica de Panamá

[viccelda.dominguez@utp.ac.pa](mailto:viccelda.dominguez@utp.ac.pa)

## RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación es calibrar un modelo hidrológico que permita simular escenarios de contaminación difusa por plaguicidas utilizados en una cuenca agrícola, con el propósito de que sea aplicado en la Planificación de las mejores prácticas de manejo en la cuenca del Río David, una importante fuente de abastecimiento de agua potable. Los cultivos de arroz y café han sido identificados, entre las principales actividades antropogénicas, siendo necesario evaluar los impactos de los plaguicidas utilizados en el cultivo de arroz y café, en el sistema acuático. El propósito de este artículo es evaluar el fenómeno de transporte de plaguicidas utilizando el modelo "Herramienta de Evaluación para Suelo y Agua" (SWAT). Basados en los resultados del muestreo de agua, en tres meses diferentes (octubre, diciembre de 2006 y mayo de 2007), y la calibración del modelo hidrológico, que representa la principal ecuación utilizada por SWAT. Los compuestos encontrados en aguas del río, fueron Propanil, Pedimentalina, Endosulfán, Dieldrin y Lindano; estos plaguicidas fueron analizados utilizando tecnología de extracción "microconductividad eléctrica" con detección por cromatografía de gases con espectrofotómetro de masa (GC-MS). Diferentes escenarios críticos de máxima escorrentía fueron proyectados. Se obtuvo una  $R^2$  de 0.80 en la calibración del modelo hidrológico y en la simulación de plaguicidas se obtuvo la mayor afectación por Pendimetalina y 2,4-D. Se recomiendan realizar estudios a futuros, especialmente de distintos insecticidas y sus metabolitos que se pueden generar en dichas combinaciones.

**Palabras claves:** Modelo Hidrológicos, Plaguicidas, Metabolitos

## ABSTRACT

The overall objective of this work is to calibrate a hydrological model to allow the simulation of different scenarios of no point source pollution by pesticide in an agricultural watershed to create a methodology for a sustainable management of an important drinking water source in Panama, David River. Rice and coffee culture has been identified as the main anthropogenic activity, been necessary to evaluate the impacts of pesticides used in rice and coffee culture on the aquatic systems. The purpose of this paper is to evaluate pesticides transport phenomenon using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) software. Based on the results of water samples, in

three different months (October, December de 2006 and May 2007), and the calibration of the hydrological model, that represents the principal equation using by SWAT. Compounds found in river water, were Propanil, Pendimethalin, Endosulfan, Dieldrin y Lindano; these pesticide were analyzed using solid-phase "electrical micro conductivity" extraction technique with detection by gas chromatography with mass spectrometry (GC-MS). Different scenarios of critical runoff were projected. The results of the hydrological model calibration have a  $R^2$  of 0.80 and in the simulation of pesticide the principal impacts were generated by Pendimetaline and 2,4-D. Further monitoring studies are recommended, especially from different insecticides and their metabolites.

**Keywords:** Hydrological Model, Pesticides, Metabolites

## 1. INTRODUCCIÓN

La modelación de la contaminación no puntual, se compone de distintas ecuaciones matemáticas, de modo de representar los procesos de precipitación-escorrentía, erosión transporte disuelto y adsorbido de los compuestos (Maidment, 1993; Novotny & Olem, 1994). De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura.(FAO, 2006) entre los modelos de simulación de fuentes de contaminación no puntuales o difusas más reconocidos, por su importancia en la aplicación de procesos hidrológicos, sedimentos, plaguicidas y nutrientes, además de su nivel de precisión temporal y espacial; se encuentra el SWAT (Soil and Water Assessment Tool), Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua, desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Arnold et al., 2002). El SWAT integra un número considerable de submodelos; sin embargo, su fundamento es el balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, este balance se calcula con la ecuación (1):

$$SW_t = sw + \sum (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

Donde:  $SW_t$  es el contenido de agua en el suelo en el día  $t$ ,  $sw$  es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo a 0.1-bar menos el contenido de agua a 15-bar,  $t$  es el tiempo en días,  $R$  es la precipitación diaria,  $Q_i$  la cantidad de escorrentía diaria,  $ET_i$  la evapotranspiración diaria,  $P$  la percolación diaria y  $QR_i$  el flujo de retorno o flujo base; todas las unidades en mm.

La presente investigación se basa en Maidment (1993) y Legates and McCabe (1999); dividiendo la cuenca del Río David en Unidades de Respuesta Hidrológica (UHRs) y modela cada una de las UHRs, permitiendo conocer su respuesta al final de cada UHRs, al igual que la respuesta al final de la cuenca total (Domínguez et al, 2005). Utilizando las UHRs se puede realizar escenarios de plaguicidas aplicados en distintas áreas de cultivos y su comportamiento en suelo y su posterior llegada al río. Los compuestos encontrados en aguas del río y analizados por un Cromatógrafo de Gases Agilent Modelo 6890 con receptor de microconductividad eléctrica, fueron los plaguicidas Propanil, Endosulfan, Pendimetalina, Dieldrin, Lindano y 2,4 D (Olmos 2007).

Diferentes escenarios críticos de máxima escorrentía fueron proyectados. Entre los resultados de las simulaciones en los distintos escenarios, hay presencia de compuestos carcinogénicos, siendo estos el caso del Dieldrin y el 2,4-D. Se recomienda implementar el Sistema de Gestión de Cuencas en el río David, en el cual en la próxima fase se calibren los plaguicidas encontrados en la cuenca, y además se relacionen con datos epidemiológicos del Ministerio de Salud.

## 2. OBJETIVO

El objetivo principal de esta investigación es calibrar un modelo hidrológico que permita simular escenarios de contaminación difusa por plaguicidas utilizados en la cuenca alta, media y baja, con el propósito de que sea aplicado en la Planificación de las mejores prácticas de manejo

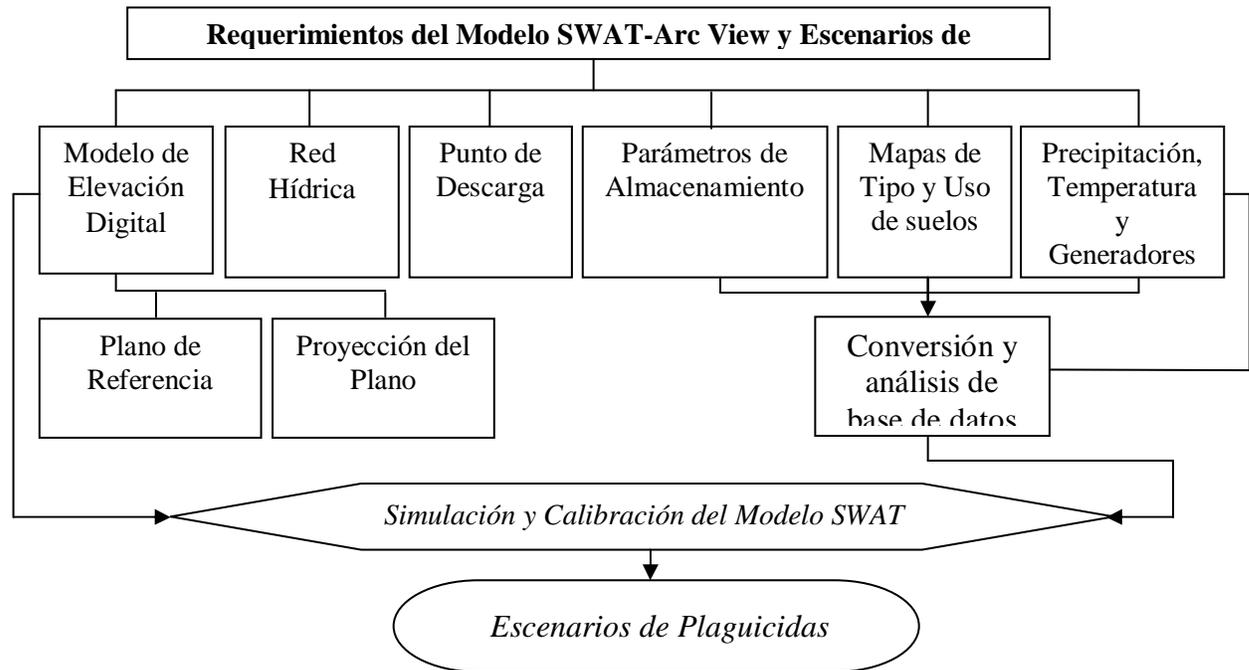
en la cuenca del río David, la cual es una importante fuente de agua potable en la República de Panamá.

## 3. METODOLOGÍA:

**Implementación de Arc View 3.2 en el Diagnóstico Físico de la Cuenca:** De acuerdo al Instituto de Investigación del Sistema Ambiental por sus siglas en inglés ESRI (Environmental System Research Intitute, 1997), el procedimiento para implementar los Sistemas de Información Geográfica (SIG); fase preliminar a la modelación hidrológica; se divide en cuatro etapas, las cuales se definen como sigue:

- Se referencia y digitaliza la red hídrica de la cuenca
- Se referencia geográficamente los mapas o cartas en Arc View 3.2 para así digitalizar, y obtener uso de suelo (agrícola, ganadería de pastoreo y otros), y tipo de suelo basado en la metodología abalada y descrita del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) mediante el método de Bouyoucos.
- Se referencia y digitaliza las curvas de nivel del área de estudio
- A partir de las curvas de nivel se genera el modelo de elevación digital (MDE), el cual se comprueba con los resultados de la red hídrica, observando la similitud entre las líneas de la red hídrica digitalizada y las depresiones observadas en el MDE en tres dimensiones.

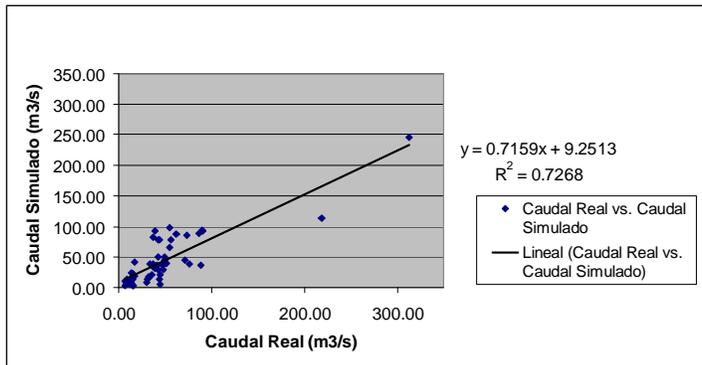
**Modelación Hidrológica:** Se realiza a través de la recopilación de datos generados a partir del SIG y de la base de datos de la estaciones de ETESA número 108-03-02 y Rovira, ubicadas en la parte cuenca del Río David en Unidades de Respuesta Hidrológica (UHRs) modelando cada una de las UHRs, lo que permite su respuesta al final de cada una, al igual que la respuesta al final de la cuenca total (Domínguez et al., 2005). La información se obtuvo y se introdujo de acuerdo al Diagrama de Flujo 1.



**Diagrama de flujo 1.** Requerimientos del Modelo SWAT - Arc View y Escenarios de Plaguicidas.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del modelo hidrológico SWAT, se obtiene una definición del área de la cuenca del Río David a partir de la dirección y el flujo representado según las pendientes del MDE. Como resultado se obtienen 46 UHRs que conforman la cuenca del río David.



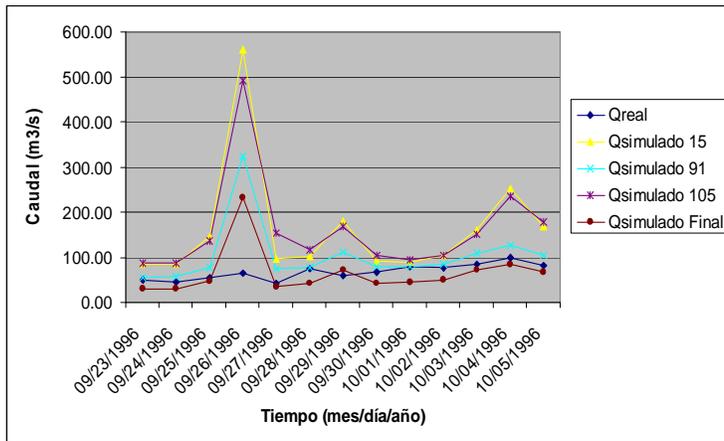
**Figura 1.** Correlación para los años 1994 – 1997.

De la calibración que se realiza específicamente para el año 1996 (288 simulaciones) se obtiene la Figura 1, la cual muestra la correlación para distintos eventos entre los años 1994 – 1997. Los eventos utilizados son aquellos que han sido poco intervenidos por rellenos de datos por el método de Pearson, debido a que datos rellenos generan un caudal diferente al real y

alejan la respuesta a la realidad y posterior correlación obtenida de la simulación del modelo hidrológico.

Como muestra la Figura 1, la correlación para los años 1994 hasta 1997, es de  $R^2 = 0.73$ , valor de correlación aceptable, considerando los datos faltantes y rellenos realizados en su mayoría para los años 1994, 1995, 1996 y 1997 según lo observado por Oñate (2003). A partir de estos resultados se trabaja en base al año 1996, el cual posee la mayor cantidad de datos reales. De los cambios realizados a los parámetros de curva número, surlag, tiempo de concentración, flujo base o flujo de recarga subterránea (GWQMN), coeficiente de evapotranspiración (ESCO); erivados del análisis de sensibilidad combinado  $2^k$ ; donde K es el número de parámetros de mayor influencia, siendo en total 4 los fundamentales en cuanto a la ecuación de escorrentía; en el año 1996 se obtiene los resultados mostrados en la figura 1.2 para los meses de mayor precipitación.

La Figura 2 muestra los cuatro escenarios más representativos de la calibración que permiten ir ajustando los parámetros de entrada al modelo SWAT para la cuenca del río David, la cual



**Figura 2.** Escenarios para la calibración.

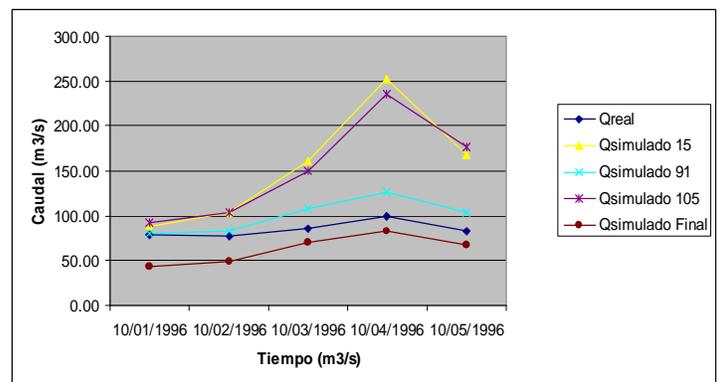
muestra una similitud entre  $Q_{real}$  (caudal real) y las diferentes simulaciones ( $Q_{simulado}$ ) hasta alcanzar una correlación  $R^2$  entre 0.7981 a 0.8005, los cuales se mantiene dentro de los sugeridos por Torres et al. (2005), Aitken, (1973), Karvonen et al., (1999). En la figura 2 se observa para el evento de precipitación-escorrentía superficial, que los primeros días del evento se mantienen cercano a los valores reales; sin embargo, el flujo de los valores pico presentes, no puede ser disminuido de mejor manera, sin pérdida en la correlación. La interpretación del modelo en cuanto a la diferencia del flujo pico, puede ser causada por la implementación de usos de suelo actuales (año 2005 – 2006), mientras se trabaja en base a comparaciones de caudales del año 1996.

Lo planteado sugiere una diferencia de 10 años de desarrollo económico y social, lo cual se refleja como mayor área pavimentada, crecimiento urbanístico, usos pecuarios en la región entre otros; que inciden en una menor permeabilidad del suelo, aumento en la escorrentía y subsiguiente aumento de caudal en la región. Lo que coincide con autores como Mays (1996). Aunando la inconsistencia de los valores de precipitación obtenidos de los datos de ETESA, lo cual disminuye el factor de correlación del modelo, que coincide con lo mencionado por Ndomba & Mtalo (2005), Arnold (2002) y Oñate (2003), el último sobre calibración del Modelo SWAT en la cuenca binacional del Río Catamayo entre Ecuador y Perú. Se observa sin embargo una correlación de

$0.7981 \approx 0.8$ , con un valor de flujo pico de mayor similitud con el valor real de caudal. Por otra parte, segregando de la Figura 2 el último evento de precipitación observado (el cual cubre 5 días de evento de lluvia entre el 1 al 5 de octubre de 1996) se obtiene una correlación de 0.8001 con respecto a lo medido en la estación limnométrica de ETESA (Figura 3).

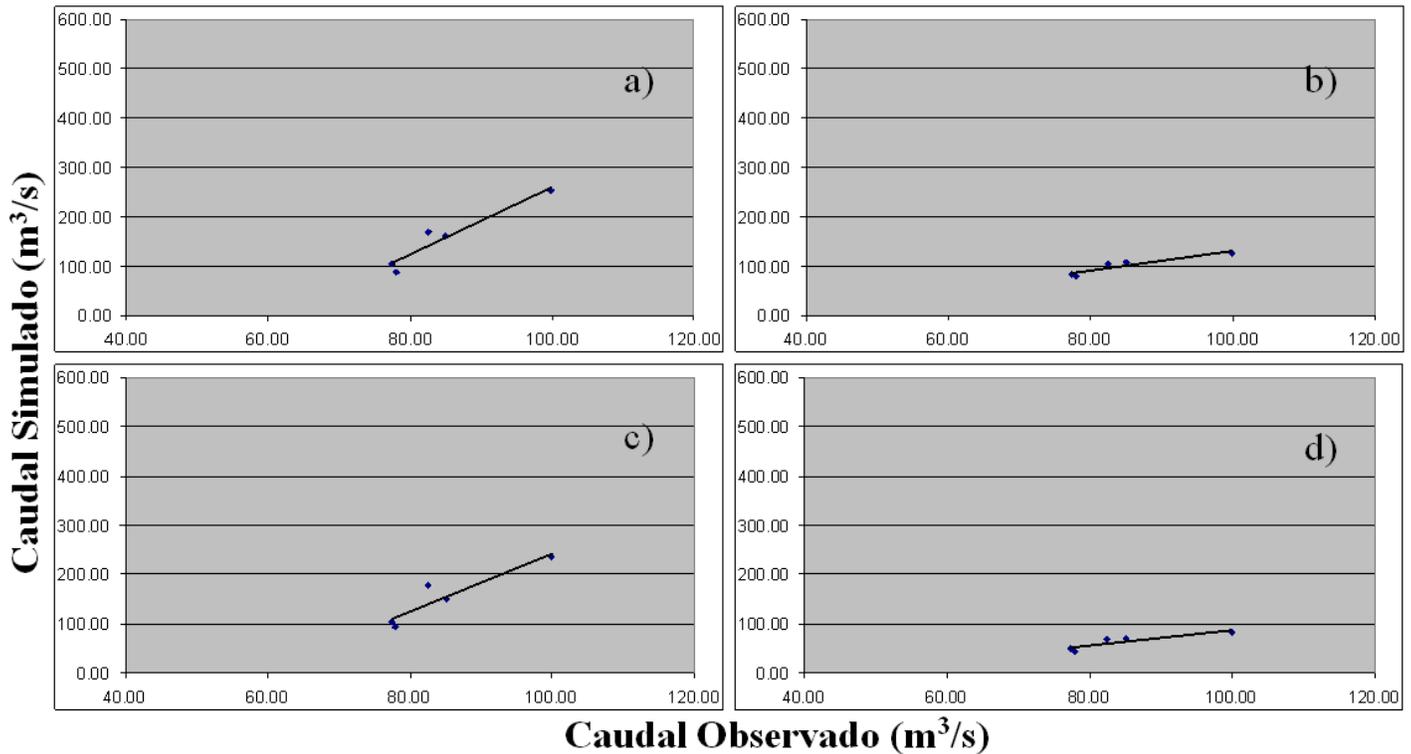
En la Figura 3 se observa que el flujo pico ocurre para el día 4 de octubre de 1996; y que los  $Q_{simulado91}$  y  $Q_{simuladofinal}$  se asemejan al  $Q_{real}$ . Observándose una tendencia de cercanía de valores simulados a valores reales. En la Figura 4 se observan las diferentes líneas de tendencia para las cinco simulaciones realizadas en la Figura 3.

**Figura 3.** Evento del 1 al 5 de octubre de 1996



El último evento de calibración ( $Q_{simuladoFinal}$ ) en la Figura 3 se encuentra representado en la correlación mostrada en la Figura 4 d). Observándose una correlación mayor a 0.8. Se observa en la Figura 4 que para a) se tiene valor de correlación de 0.9210, sin embargo existe un flujo pico superior al flujo real u observado. En cambio la d) de la misma Figura tiene una correlación de 0.8005, con un valor pico de flujo de mayor ajuste al valor real de caudal. Los valores de caudal para la gráfica d)  $Q_{simuladoFinal}$  son menores a los caudales reales presentes en la Figura 3.

El modelo SWAT muestra una correlación para ambos eventos escogidos para la calibración de  $R^2 \approx 0.8$ , esto sugiere que el modelo se ajusta a las condiciones de estudio y su calibración para el año 1996 se da por concluido este proceso.



**Figura 4.** Línea de Tendencia y Correlación por Simulación para el evento del 1 al 5 de octubre de 1996. a)  $R^2 = 0.9210$  para Qsimulado15 para el segundo evento; b)  $R^2 = 0.8573$  para Qsimulado91 para el ultimo evento; c)  $R^2 = 0.8558$  para Qsimulado105 para el ultimo evento; d)  $R^2 = 0.8005$  para QsimuladoFinal para el último evento.

A partir de los resultados de la calibración de los eventos de lluvia, se procede a realizar los escenarios de plaguicidas, con el valor obtenido en QsimuladoFinal. El objetivo de ejecutar estas corridas es encontrar valores que serian menores a los que pueden ser generados en la situación real, y nos sugirieran la llegada o no al río de plaguicidas en una situación similar.

Resultados preliminares de muestras tomadas en distintos sitios de la cuenca del Río David (medio agua en 6 puntos, y envase de mezcla de plaguicidas en cultivos), y analizados por un Cromatógrafo de Gases Agilent Modelo 6890 con receptor de microconductividad eléctrica, revelan la presencia de los plaguicidas Propanil, Endosulfan, Pendimetalina, Dieldrin, Lindano y 2,4 D Olmos, (2007). Se realiza la ejecución y análisis de los escenarios en base a estos plaguicidas de acuerdo a sus características físico-químicas.

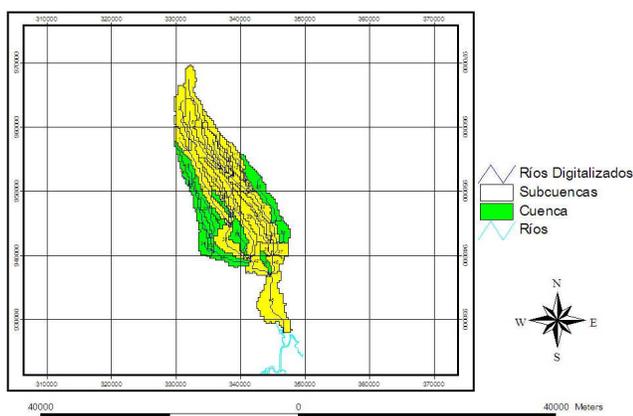
Plaguicida	Comportamiento en Suelo	Comportamiento en Agua	Cantidad que llega al Río (mg)
Endosulfan	Se adhiere al suelo	Poco soluble en agua	$0.7e-4$ a 8.48 mg
Propanil	Poca adherencia al suelo	Soluble en agua	3.76 a 27.85 mg
Pendimetalina	Se adhiere al suelo	Poco soluble en agua	1511 a 13360 mg
Dieldrin	Se adhiere al suelo	Poco soluble en agua	$5.2e-4$ a 246 mg
Lindano	Se adhiere al suelo	Soluble en agua	0.12 a 241.5 mg
2,4-D	Poca adherencia al suelo	Soluble en agua	137 a 619 mg

**Tabla 1.** Resultados de Escenarios de Plaguicidas y su Comportamiento en los Medios de Transporte.

Según los resultados obtenidos para simulaciones de escenarios de plaguicidas bajo condiciones establecidas de cantidad del mismo en follaje y enriquecimiento en suelo se obtiene los siguientes resultados descrita en la Tabla 1.

De acuerdo a lo observado en la tabla 1 se observa que los plaguicidas de menor llegada son

Endosulfan y Propanil, ambos tienen comportamiento parecidos en cuanto a llegada al río, teniendo similitud en las UHRs en la cual se obtiene llegada al río. El Endosulfan y el Propanil tienen comportamiento de transporte distinto, el primero depende del sedimento es un plaguicida que se adhiere fuertemente a suelos de partícula pequeña (textura de franco arcillosa). Christodoulatos y Mohiuddin, (1996), y el último una moderada a alta solubilidad en agua dependiendo de la escorrentía superficial. Un comportamiento parecido se observa para los plaguicidas Dieldrin y Lindano, ambos se adhieren al suelo, sin embargo el Lindano tiene mayor solubilidad en agua que el Dieldrin, observándose una parecida llegada al río en cantidades cercanas a 250 mg y un similar movimiento en UHRs debido principalmente a su moderada a fuerte adherencia en suelos. Son la Pendimetalina y el 2,4-D los plaguicidas de mayor presencia y llegada a las aguas del río David basándonos en las simulaciones, observándose una cantidad cercana a las 13360 para la Pendimetalina y 619 para el 2,4-D. El comportamiento y transporte de ambos plaguicidas es completamente distinto, la Pendimetalina se adhiere al suelo y por ende depende del sedimento para llegar al río, por su lado el 2,4-D es soluble en agua y por ende su transporte en la cuenca se debe a la escorrentía superficial.



**Figura 5.** Escenarios de transporte de Pendimetalina en la Cuenca del Río David.

Es la Pendimetalina el de mayor llegada al río, debido en gran parte a la parte baja de la cuenca del río David, la cual es de textura de suelo

Franco Arcillosa, aunque su llegada al río se da a lo largo y ancho de la cuenca la cual es de textura Franco Arenosa como se observa en la Figura 4.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se debe comprender claramente, que estos son escenarios posibles, no son escenarios calibrados en campo con datos reales. La intención es conocer como se proyectaría el transporte, y si son capaces de llegar los plaguicidas objeto de este estudio, bajo el escenario hidrológico calibrado, características fisicoquímicas del suelo y las condiciones de uso de suelo actuales.

Entre los plaguicidas simulados en los distintos escenarios, hay presencia de compuestos carcinogénicos, siendo estos el caso del Dieldrin y el 2,4-D. La presencia de estos plaguicidas en la cuenca ha sido comprobada por Olmos (2007), y su transporte es más que probable por medio de la escorrentía simulada por este estudio. Como otra fase de la investigación, se realizó una encuesta socioeconómica en la cuenca, que incluía, recabar información de tipo epidemiológica y de uso de plaguicidas. Los resultados mostrados en Mojica y Rodríguez, (2007), arrojaron una incidencia del 19 % de casos de cáncer en la cuenca del río David. Sin embargo, las evidencias no son suficientes para relacionar directamente los casos.

Se recomienda implementar el Sistema de Gestión de Cuencas en el río David, en el cual en la próxima fase se calibren los plaguicidas encontrados en la cuenca, y además se relacionen con datos epidemiológicos del Ministerio de Salud.

Con este proyecto se comprueba la posible implementación de diversos modelos hidrológicos en cuencas con características volcánicas montañosas con condiciones meteorológicas e hidrológicas similares o muy parecidas a las observadas en la cuenca del río David.

*Agradecimientos: A la Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por financiar esta investigación a través del Proyecto de Fomento a la Investigación y Desarrollo ID 147-2005.*

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aitken, A. (1973). Assessing Systematic Errors In Rainfall-Runoff Models. *Journal of Hydrology* 20:121-136.
- Arnold, J. et al., (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Texas Water Resources Institute College Station. Texas.
- Christodoulatos, C., Mohiuddin, M. (1996). Generalized models for prediction of pentachlorophenol adsorption by natural soils. *Water Environmental Research* 68:370-378.
- Domínguez, V.M., Franco, N., Mojica, V., Caballero, M., Santamaría, E., Rodríguez, X. (2005). Informes de Avance (1,2) proyecto Implementación de un Sistema de Gestión de Cuencas tomando como base de respuesta, la unidad ecosistémica del Río David. Proyecto presentado a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT). Panamá.
- Environmental System Research Institute. (ESRI). (1997). *Understanding GIS. The ARC/INFO Method.* John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Karvonen, T., Koivusalo, H., Jauhiainen, Palko, J., Weppling, K. (1999). A hydrological model for predicting runoff from different land use areas. *Journal of Hydrology* 217: 253 – 265.
- Legates, D., McCabe, G., (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hidrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35:233-241.
- Maidment, D. (1993). *Handbook of hydrology.* The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, U.S.A.
- Mays, L.W. (1996). *Water Resources Handbook.* McGraw-Hill. New York, U.S.A.
- Mojica, V., Rodríguez, X. (2007). Modelación hidrológica con escenarios de contaminación difusa, para la planificación ambiental en la cuenca del río David. Tesis para optar al grado de Licenciado en Ingeniero Ambiental. Universidad Tecnológica de Panamá.
- Ndomba, P., Mtaló, F. (2005). The Suitability of SWAT in Sediment Yield Modeling for Ungauged Catchments: A Case of Simiyu River Subcatchment, Tanzania. 3<sup>rd</sup> International SWAT Conference.
- Novotny, V., Ollem, V. (1994). *Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution.* Van Nostrand Reinhold. New York.
- Olmos, J. (2007). Avances de la Tesina, Determinación Analítica por Cromatografía de Gases de Compuestos Orgánicos clorados de Media a Larga vida media en Agua, Tomando como Caso de Estudio la Cuenca del Río David. Trabajo de Graduación para optar al Título de Magíster Profesional en Ingeniería Ambiental. Panamá, Panamá.
- Oñate, F., Aguilar, G., (2003). Aplicación del Modelo SWAT para la Estimación de Caudales y Sedimentos en la Cuenca Alta del Río Catamayo. Perú.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. (FAO). (2006). Sistema de Información Geográfica conexión con los modelos de simulación y aplicación a las materias relacionadas con la erosión Pág. 1-6
- Torres, E., Oropeza, J., Fernandez, D. (2005). Aplicación del Modelo SWAT en la Cuenca el Tejocote Altacamulco. México.



# LA EXPANSIÓN DEL CANAL DE PANAMÁ: Análisis utilizando un Modelo de Dinámica de Sistemas

**Humberto R. Álvarez A., Ph. D.**  
Universidad Tecnológica de Panamá  
[humberto.alvarez@utp.ac.pa](mailto:humberto.alvarez@utp.ac.pa)

**Luis Carlos Rabelo, Ph. D.**  
Universidad de la Florida Central  
[lrabelo@mail.ucf.edu](mailto:lrabelo@mail.ucf.edu)

**Darío Solís, Ph. D.**  
Universidad Tecnológica de Panamá  
[dario.solis@utp.ac.pa](mailto:dario.solis@utp.ac.pa)

## RESUMEN

*La expansión del Canal de Panamá pudiera ser el proyecto de inversión en infraestructura más grande desarrollado por la República de Panamá en sus 100 años de vida independiente. El objetivo de este estudio de simulación es el de utilizar el proyecto de expansión del Canal de Panamá para desarrollar y demostrar el proceso de decisión en un sistema complejo y desarrollar un modelo que ayude a entender el efecto de diferentes aspectos económicos, sociales y políticos relacionados con esta magna obra. Los mayores retos de este proyecto de investigación incluyen el desarrollo de las expresiones paramétricas que explican las relaciones que rigen el, así como la dinámica de dichas relaciones y la validación del modelo.*

**Palabras Clave:** *Dinámica de Sistemas, Canal de Panamá, Sistemas Complejos, Toma de Decisiones.*

## ABSTRACT

*The Panama Canal expansion is the greatest infrastructure investment project developed by the Republic of Panama in its more than 100 years of independent life. One objective of this study is to use the Panama Canal expansion project to develop and demonstrate the decision process for a complex system. An additional objective is to develop a model which helps to understand the effect of different economical, social and political aspects related to this huge construction work. The mayor challenges of this research project includes the development of the parametric expressions which explain the relationships that rule the system, as well as the dynamics of this relationships and the model validation.*

**Keywords:** *System Dynamics, Panama Canal, Complex Systems, Decision Making.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se aprecia en la figura 1 [1], el Canal de Panamá es un sistema de navegación de 80 km

de largo que permite que naves transiten de un océano a otro, a través del Istmo de Panamá, todo esto gracias a un conjunto compuesto por canales y esclusas, alimentados por el Lago Gatún, a 30 metros sobre el nivel del mar. El tránsito a través canal toma entre 8 y 10 horas sin tomar en cuenta el tiempo de espera en la entrada al mismo.

Desde su construcción en 1914, el Canal de Panamá ha sido un elemento clave en la industria marítima y de transporte mundial. En la actualidad maneja alrededor del 4% del comercio mundial [2], y es un importante competidor en algunas de las rutas de transporte de importancia.

Por ejemplo, el Canal actualmente maneja sobre el 15% del comercio marítimo de los Estados Unidos y más del 25% de la carga en contenedores entre el norte de Asia y la Costa Este de los Estados Unidos [2]. Para la República de Panamá, el canal ha generado, en especial, el crecimiento de las ciudades terminales de Panamá y de Colón, con el desarrollo de un conglomerado de servicios correlacionados y de industrias que rodean el canal, incluyendo puertos del trasbordo, ferrocarriles, venta y abastecimiento de combustible, reparaciones de naves, actividades bancarias, seguro y turismo, entre otros.

El Canal de Panamá ha estado sujeto a gran presión debido a los cambios en la industria marítima. Cambios en tendencias del transporte, incluyendo la utilización creciente de

contenedores y los servicios que envían con las rutas fijas y los itinerarios, han estado presionando el canal por más capacidad y servicios más confiable, reduciendo los tiempos de espera y tránsitos. Al mismo tiempo, el incremento en naves que no pueden transitar por el Canal, en especial en el segmento de contenedores, presionando por modernizar y expandir sus esclusas y facilidades para minimizar el número de tránsitos y la cantidad de carga a través del Canal de Panamá



**Figura1.** El Canal de Panamá

En la actualidad, el Canal de Panamá está operando en aproximadamente 90% de su capacidad sostenida [2, 3], lo que limita su habilidad y capacidad para proveer un servicio de calidad y a la vez captar la demanda creciente en los próximos 5 a 10 años. Adicionalmente, los operadores portuarios a ambos lados del Canal están invirtiendo grandes y millonarias sumas de dinero a fin de aumentar su capacidad de almacenamiento de carga y atención a barcos tipo Postpanamax, que no pueden transitar por el Canal.

Debido a esas presiones, la Autoridad del Canal de Panamá ha propuesto un proyecto de expansión, conocido como el Tercer Juego de Exclusas. El proyecto consistiría en dos juegos nuevos de esclusas paralelas a las existentes, una en el lado Atlántico y otra en el lado Pacífico, con capacidad para manejar buques de gran calado que en la actualidad no pueden transitar

por el Canal. Adicionalmente, la Autoridad del Canal de Panamá está considerando el uso de un sistema de tinajas de reutilización de agua, de tal manera que consumirían menos agua que las actuales.

Sin embargo, la decisión de expandir el Canal de Panamá depende, por mandato constitucional, de un referéndum nacional a fin de decidir el futuro de dicho proyecto. Debido a esto, han surgido diferentes grupos de interés. Los grupos que apoyan la ampliación del Canal de Panamá lo hacen apoyándose en la contribución que dicho canal tiene sobre la economía panameña. De acuerdo a la Contraloría General de la República [5], el canal ha estado creciendo en de manera significativa en los últimos diez años, haciendo una significativa contribución a la economía panameña. Por ejemplo, los aportes del Canal de Panamá al gobierno nacional han sido de sobre 1 billón de dólares. Adicionalmente, por cada dólar que el Canal genera, los sectores económicos que apoyan al Canal generan \$1.25. Debido a que el proyecto de expansión doblaría la capacidad del Canal, su impacto sobre la economía sería significativamente mayor. De igual manera, durante los 8 años estimados de construcción, la generación de empleos, además de otros impactos sociales, serían de gran importancia.

Por otro lado, grupos que se oponen al proyecto de ampliación, arguyen elementos que van desde un costo demasiado elevado del proyecto, el cual se estima en US\$ 5.25 billones, pero que grupos adversos estiman en hasta US\$ 25 billones, hasta problemas ambientales y de uso de agua, así como riesgos tecnológicos del proyecto.

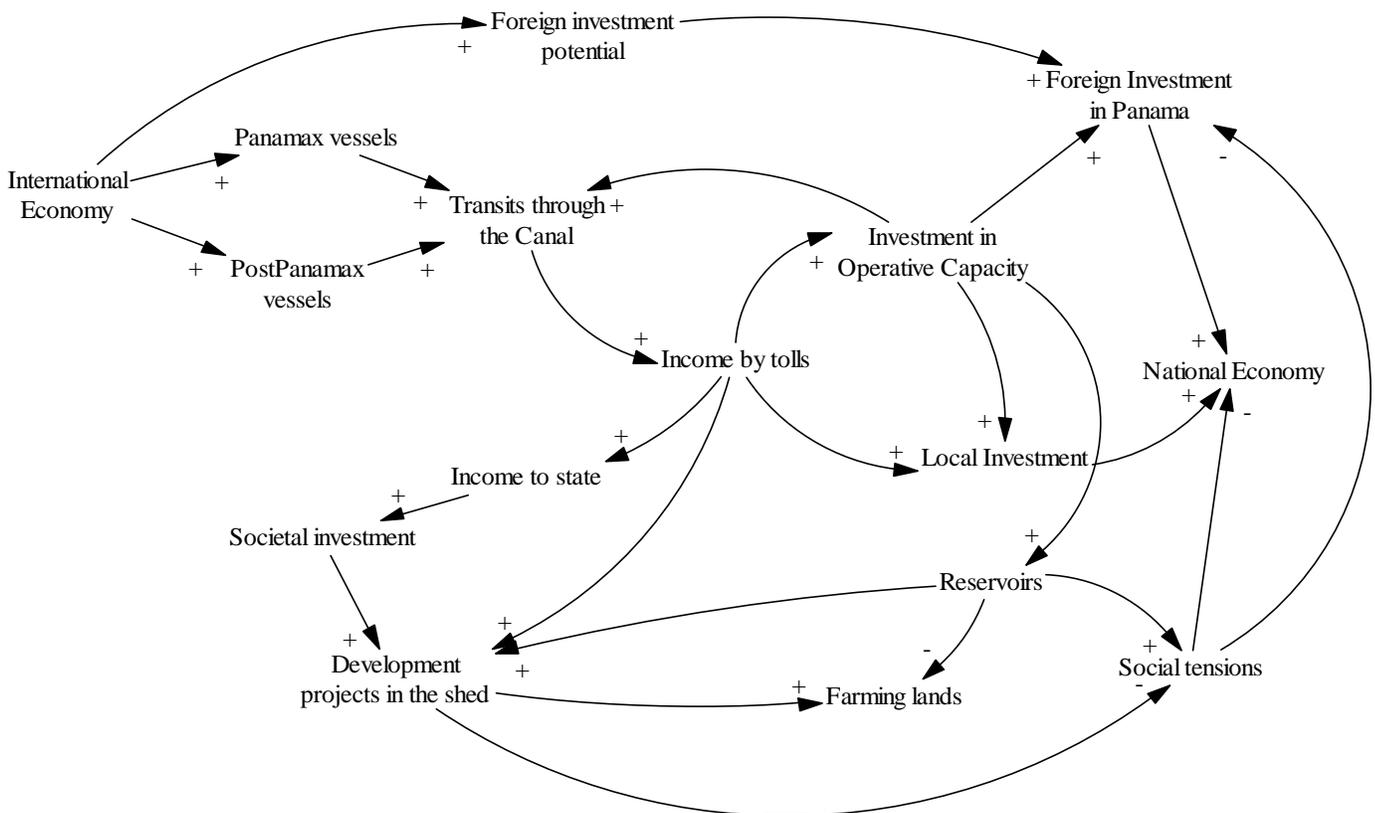
Dado que este proyecto de expansión sería una de las obras de infraestructuras desarrolladas en Panamá desde la construcción del propio canal, el objetivo de este proyecto fue el de desarrollar un modelo que permitiera entender el efecto que las diferentes variables involucradas en el proyecto de ampliación tienen en los elementos relacionados a un proyecto tan complejo. A fin de lograr dicho objetivo, se desarrolló un modelo sistémico mostrando diferentes relaciones y efectos del proyecto de ampliación, no solamente

desde un punto de vista económico, sino también desde un punto social y ambiental. La tarea inicial de este proyecto fue estudiar el impacto del proyecto de ampliación del Canal de Panamá en términos de teorías de sistemas complejos, y de desarrollar un modelo que explicara el impacto de las decisiones políticas, sociales, ambientales y económicas relacionadas a dicho mega proyecto.

Con el objetivo de cumplir con las metas deseadas, se utilizó la Dinámica de Sistemas como herramienta, a fin de describir dinámicamente las variables y relaciones de

dinámica de sistemas tiene que ver con dos criterios muy importantes [10, 11, 12, 13]. Primero, el modelo debe generar comportamientos que no difieran significativamente de aquellos del sistema real a modelar. Segundo, se dice que un modelo puede explicar el comportamiento de un sistema si refleja las relaciones causales del mismo. En consecuencia, el grado de utilidad del modelo dependerá más del usuario que de la persona que lo desarrolle.

A fin de desarrollar el modelo, se utilizó la metodología COMPRAM. Esta metodología se



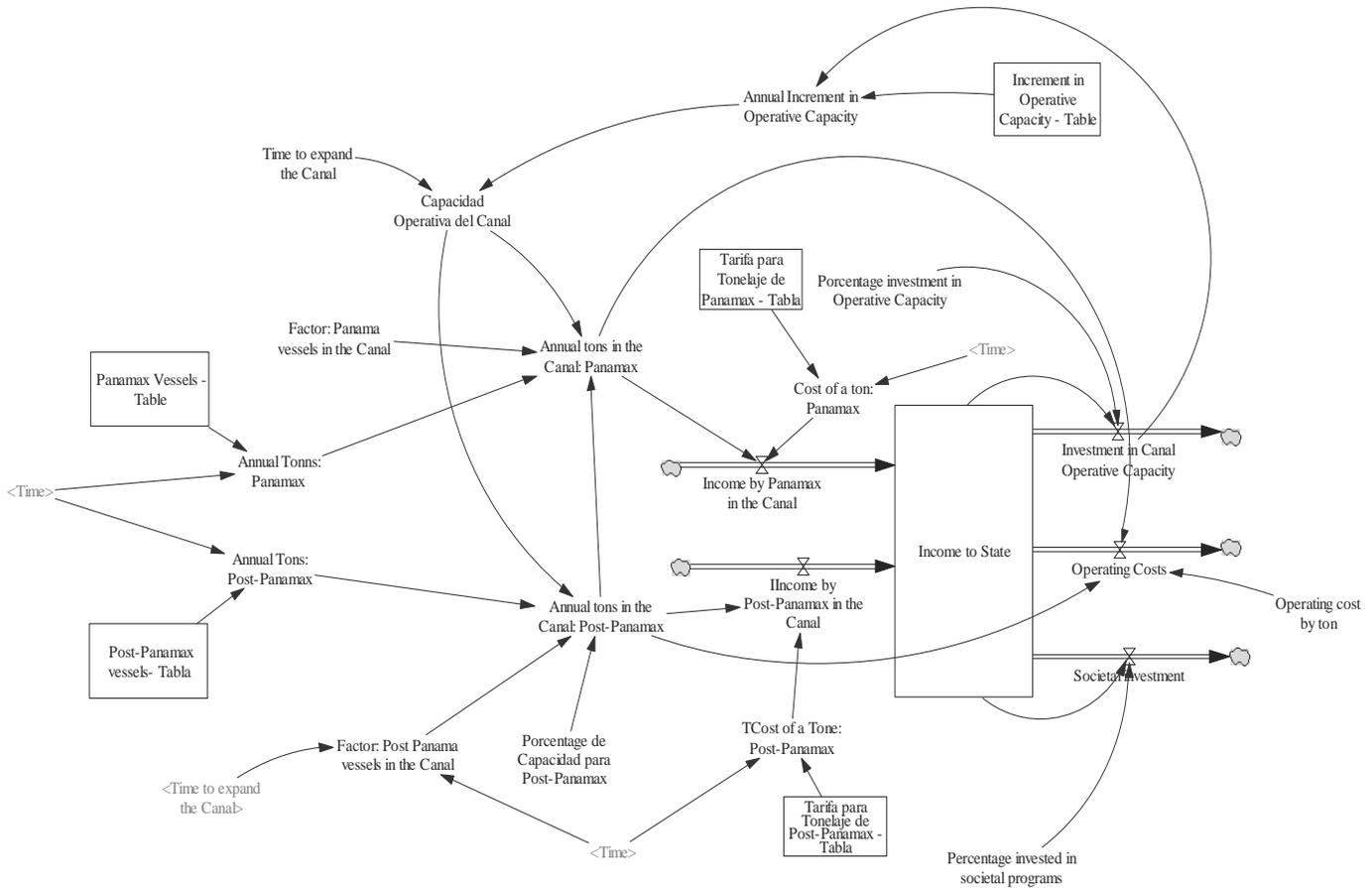
**Figura 2. Modelo Causal**

dicho sistema complejo. La Dinámica de Sistemas se ha identificado como un enfoque que permite introducir estructuras dinámicas a aspectos complejos del proceso de toma de decisiones [6, 7, 8, 9].

Como parte del desarrollo del modelo, se prestó especial atención al proceso de validación del modelo. La validación de un modelo de

	Escenarios	
	Expansión	No Expansión
Tiempo para la expansión	10 años	100 años
Porcentaje de inversión en capacidad operativa	15% del ingreso anual	5% del ingreso anual

desarrolló con el objetivo de manejar y modelar, de manera adecuada problemas sociales complejos. Un problema social complejo se puede definir como un problema de la vida real que presenta comportamientos dinámicos. La



**Figura 3.** Modelo Dinámico de las Operaciones

metodología define un marco prescriptivo que permite analizar, guiar y predecir problemas sociales complejos y comprende las meta-etapas a seguir por un equipo multidisciplinario con el objetivo de definir, describir y resolver problemas complejos de Dinámica de Sistemas. Mayor información puede encontrarse en [1].

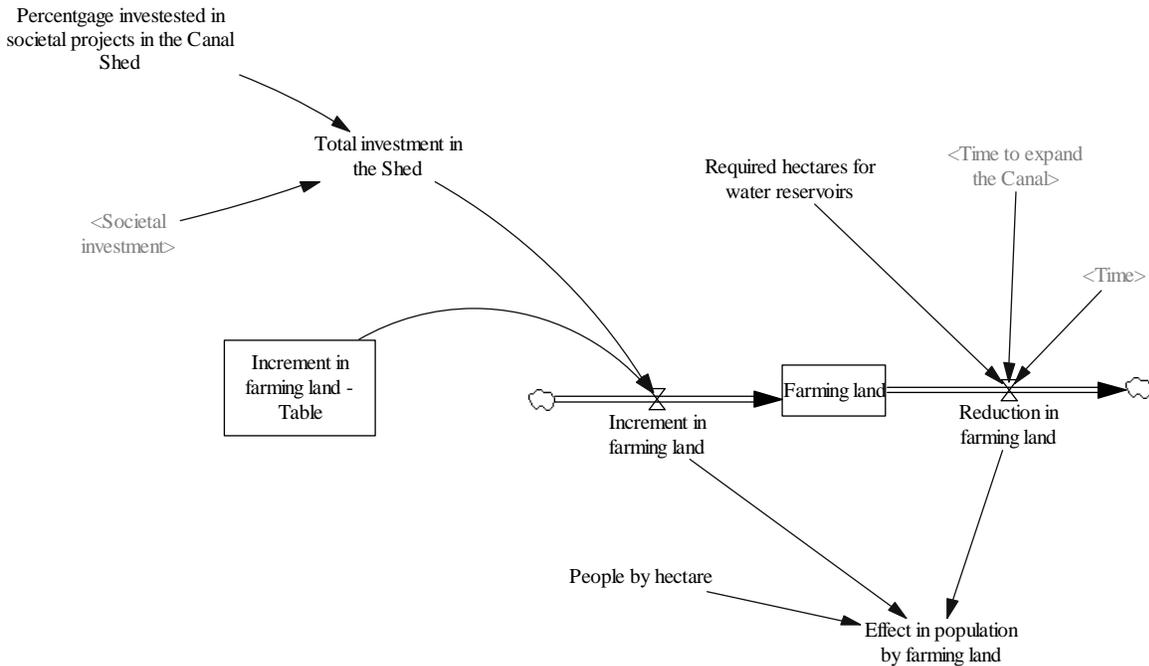
## 2. EL MODELO

Aunque este documento no entrará en detalles en el proceso de modelado, si es importante aclarar que a lo largo de este trabajo de investigación se realizaron reuniones con diferentes actores dentro de los sistemas que componen el Canal de Panamá: colaboradores de la Autoridad, usuarios, campesinos, economistas, sociólogos, etc. Debido a que mucha de la información necesaria era confidencial al momento de escribir el modelo original, se procuró aproximar la información presentada a fin de que permitiera describir los comportamientos esperados del modelo.

La figura 2 presenta el diagrama causal del modelo. Esta figura muestra que a medida que los tránsitos aumentan, las utilidades debido a los peajes aumentan. Por otro lado, un aumento en los tránsitos requiere un aumento en la capacidad operativa que requiere a su vez, inversiones de los ingresos del Canal, lo que a su vez disminuye el aporte social del mismo.

Adicionalmente, un aumento en la capacidad operativa del Canal, requerirá mayor cantidad de agua, lo que a su vez disminuye la disponibilidad de tierras existentes en las riveras del Canal disminuyendo las posibilidades de aumentar los cultivos locales, creando tensiones sociales en el área, lo que afecta la imagen del Panamá internacionalmente, afectando a su vez los tránsitos por el Canal.

A partir del modelo causal, se desarrollaron dos sub-modelos dinámicos. Así, la figura 3 muestra el modelo dinámico de la operación, donde se



**Figura 4.** Modelo Dinámico: Embalses

aprecian variables como ingresos netos en función al tipo de tránsitos, tonelaje que atraviesa el canal y costos operativos, así como la inversión social, que por ley no puede ser menor que el 10% de los ingresos netos del Canal.

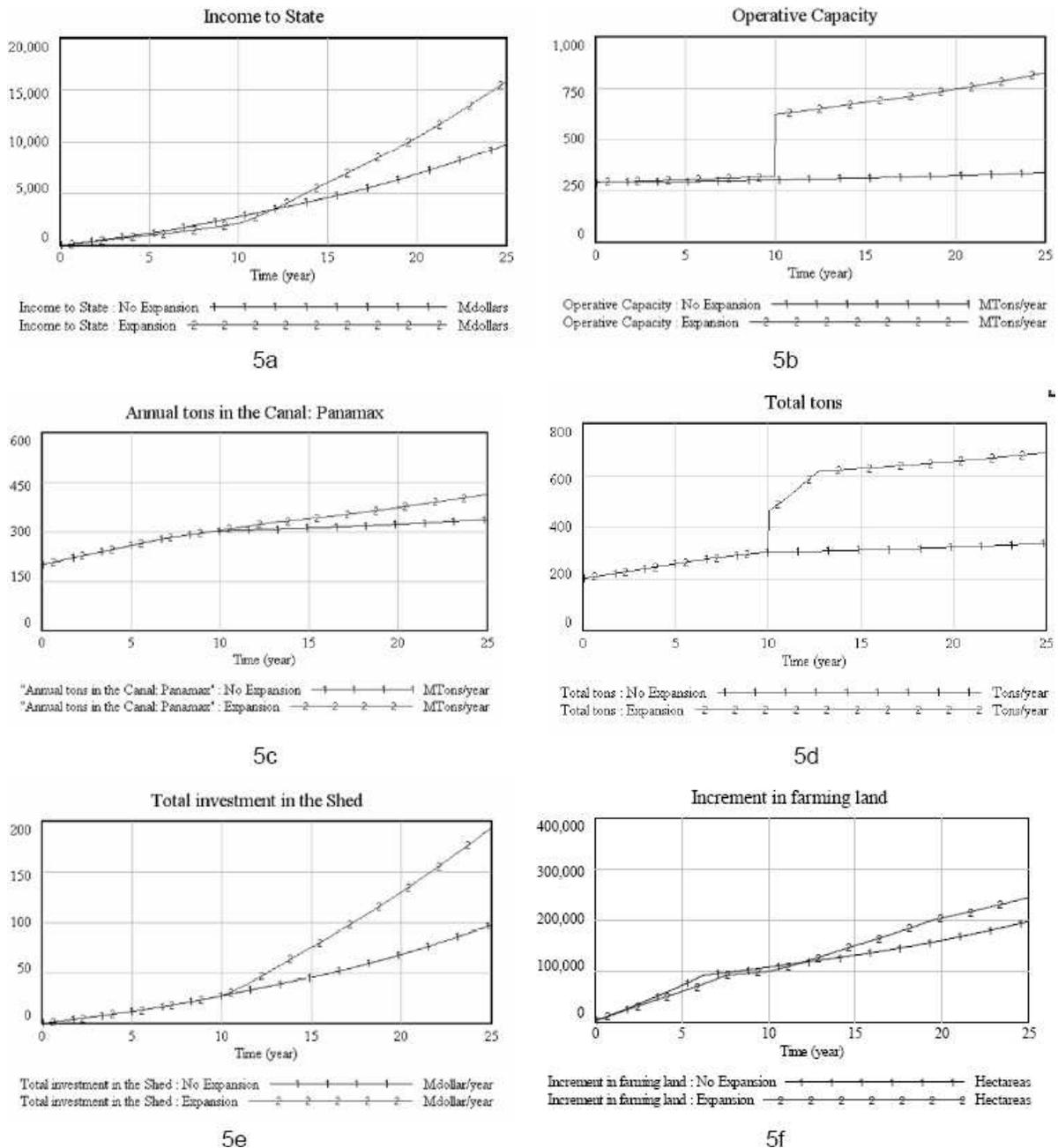
La figura 4 muestra el sub-modelo correspondiente a los embalses. Como se aprecia la cantidad de tierra disponible es función de la inversión social en la cuenca y de la cantidad de agua necesaria para la operación del canal, variable que depende a su vez del tiempo para la expansión. En este punto, es importante explicar que dicha variable es una variable de control para modelar los diferentes escenarios del modelo. Así, siendo el tiempo de simulación del modelo 25 años, se considerará entonces que tiempos menores de 25 años representarán un escenario con ampliación, mientras que mayores de esta cifra modelarán el escenario de no expansión. La tabla 1 muestra con mayor detalle los supuestos del modelo.

El 15% de inversión en capacidad operativa se supone en función a la necesidad del Canal de cubrir sus costos de ampliación. El 5% es en función de mejoras para aumentar de manera incremental y limitada la capacidad del Canal.

Se hicieron varias corridas del modelo a fin de poder corroborar los comportamientos en función a la experiencia de funcionarios de la Autoridad del Canal de Panamá y de otros actores relevantes en la investigación quedando de manifiesto que los comportamientos generados bajo información básica inicial eran similares a lo que la experiencia indicaba.

La figura 5 muestra resultados obtenidos para los escenarios modelados. La figura 5a muestra que durante los cinco primeros años de operación, el ingreso acumulado bajo el escenario de expansión será menor que bajo el de no expansión. Esto es de esperarse ya que durante este tiempo el Canal estará bajo el proyecto de expansión, que debe cubrirse con su propio flujo de caja, resultante de las operaciones del Canal actual. A través del tiempo, el incremento en tonelaje, tal y como lo muestra la figura 5b, generará suficientes ingresos para compensar, y superar los gastos iniciales.

Las figuras 5c y 5d muestran como las tendencias en los tránsitos serán función de los escenarios modelados. De ocurrir la expansión, habrá un incremento rápido de las toneladas transportadas



**Figura 5. Resultados del Modelo**

por buques Postpanamax, mientras que las toneladas transportadas por buques Panamax tiende a estabilizarse. Por el contrario, de no producirse la expansión, la cantidad de toneladas transportadas crecerá de manera limitada en función a la capacidad disponible del Canal.

Finalmente, las figuras 5e y 5f muestran que, contrario a lo que se pudiera creer, la inversión social en la cuenca del Canal incrementará la probabilidad de proyectos de desarrollo, lo que

requerirá de mayor cantidad de tierra cultivable que competirá con los embalses que se requerirían. Esta tierra sería tomada de otras áreas limítrofes a la cuenca y sería necesario generar políticas de conservación a fin de controlar la deforestación incontrolada.

En conclusión, bajo los escenarios, el contexto y suposiciones hechas, la expansión del Canal parece favorable, ya que lejos de provocar conflictos, parece que traería progreso, en

especial en la cuenca del Canal, que es la más sensible a tensiones sociales por estar directamente bajo el área de influencia operativa del Canal.

### 3. FUTUROS TRABAJOS

Aunque el modelo fue validado originalmente por personal de la Autoridad del Canal de Panamá y otros actores relevantes al proyecto, es necesario desarrollar varias actividades de seguimiento. Primero, es obligante correr el modelo con datos reales provenientes del Canal y otras fuentes importantes. Segundo, es necesario generar modelos relevantes sobre el impacto de otros factores en aspectos tales como la economía panameña y el comercio internacional. Finalmente, hay que profundizar más en el sub-modelo de impacto o tensión social a fin de poder predecir posibles comportamientos que afecten el proyecto en un futuro.

### 4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue presentado originalmente en el Industrial Engineering Research Conference celebrada en Orlando, Florida, en Mayo de 2006. El mismo fue desarrollado gracias al financiamiento parcial de la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación de la República de Panamá y al apoyo de la Universidad Tecnológica de Panamá, la Universidad de la Florida Central y la Autoridad del Canal de Panamá.

### 5. REFERENCIAS

- [1]El Canal de Panamá, [www.bbc.co.uk/spanish/panama/panama\\_main.stm](http://www.bbc.co.uk/spanish/panama/panama_main.stm), bajado el 16 de octubre de 2006
- [2]Panama Canal Authority, Maritime Authority of Panama, 2005, "Almost Full Capacity", Panama Maritime Handbook 2005/6, 7 – 13.
- [3]Lozano, L., 2005, "Still Going Strong", The Journal of Commerce, Vol. 6, Issue 48, November 28, p. 24.
- [4]Franzese, L. A., Abdenur, L. O., Starks, D., Botter, R. C., and Cano, A., 2004, "Simulating the Panama Canal, Present and Future," Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 1835 – 1838
- [5]Sandoval, Y., 2005, "The Dilemma of the Expansion Costs," Martes Financiero – La Prensa, n. 409, January 17, pp. 24-28.
- [6]Winch, G. 1998, "Dynamic visioning for Dynamic Environments," Journal of the Operational Research Society, 49(4), 354-361.
- [7]Forrester, J. W., 1961, Industrial Dynamics, The M. I. T. Press – Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc., U. S. A.
- [8]Giaglis, G. M., 2001 "A Taxonomy of Business Process Modeling and Information Systems Modeling Techniques," The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 13(2), 209-228.
- [9]Sterman, J. D., 2000, Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World, McGraw-Hill, New York.
- [10]Klabbers, J. H. G., 2000, "Learning as Acquisition and Learning as Interaction," Simulation & Gaming, 31(3), 380-406.
- [11]Dutta, A., and Roy, R., 2002, "System Dynamics," ORMS Today, 29(3), 30-35.
- [12]Wittenberg, J., 1992, "On the Very Idea of a System Dynamic Model of Kuhnian Science," System Dynamics Review, 8(1), 21-33.
- [13]Larsen, E. R., and A. Lomi, 1999 "Resetting the Clock: A Feedback Approach to the Dynamics of Organizational Inertia, Survival and Change," Journal of the Operational Research Society, 50(4), 406 – 221.
- [14]DeTombe, D. J. 2001. Compram, A Method for Handling Complex Societal Problems. European Journal of Operational Research 128(2): pp. 266-261.



# PLANIFICACIÓN DE MOVIMIENTO MEDIANTE CAMPO DE POTENCIAL CON RESTRICCIONES DINÁMICAS PARA ROBOTS MÓVILES

Humberto Rodríguez, Ph. D.  
Universidad Tecnológica de Panamá  
[humberto.rodriguez@utp.ac.pa](mailto:humberto.rodriguez@utp.ac.pa)

## RESUMEN

Se presenta en este trabajo una propuesta para considerar las restricciones dinámicas cuando se utiliza el método de Campo de Potencial, en la etapa de planificación de trayectorias para robot móviles. Con este método se genera un campo de potencial virtual compuesto de la suma de un campo repulsivo, obtenido a partir de la información sobre el contorno de los obstáculos y de un campo atractivo virtual, el cual se crea teniendo la posición de la meta o submeta como foco de atracción. En consecuencia, las trayectorias se obtienen al quedar el robot expuesto al efecto de las fuerzas generadas por estos campos. Generalmente, con el fin de conseguir velocidades constantes, sólo la dirección y no la magnitud de la fuerza es utilizada para guiar el vehículo.

Si bien en la literatura se han presentado diferentes alternativas para considerar las restricciones cinemáticas e inclusive se ha considerado la restricción que impone la desaceleración máxima, para evitar colisiones, otros tipos de restricciones dinámicas no han sido tratadas dentro de este tipo de planificación. La inclusión de restricciones dinámicas, tales como aceleración máxima, curvatura y deslizamiento cobra mayor importancia cuando los robots móviles se mueven a altas velocidades. De allí que, se presenta en este trabajo una formulación que permite filtrar los cambios bruscos de aceleración y generar consignas de velocidad que respetan las restricciones de aceleración máxima. Para lograr esto, las fuerzas generadas por el campo virtual son aplicadas, en una etapa previa, a un modelo dinámico del robot y de las fuerzas de tracción, cuyas velocidades de respuesta son entonces impuestas al robot real. El robot móvil, el entorno y la estrategia de planificación han sido simulados para probar su efectividad.

**Palabras claves:** robot móvil, planificación de trayectorias, campo de potencial, restricciones dinámicas, deslizamiento, aceleración.

## ABSTRACT

In this paper a technique for including dynamics constraints when using potential field based navigation, is proposed. For potential field path planning a virtual potential field is generated as the sum of a repulsive and an attractive field. The former is obtained from the contour of the robot obstacles, while the latter is created by taking either, a final or an intermediate goal as the focus of attraction. Thus, the trajectory naturally evolves once the mobile robot is exposed to the forces from the total potential field. Generally, only

the force direction, not its magnitude, is used to guide the vehicle.

In the literature on potential field path planning, different alternatives can be found to include kinematics constraints and even to consider the maximum deceleration to avoid collisions. However, dynamics constraints, such as maximum acceleration, curvature and slippage are rarely treated. Moreover, these constraints are of mayor importance when mobile robots move at high velocities. Thus, the formulation presented on this work allows for filtering sudden acceleration changes and generates wheel angular velocities which comply with the acceleration constraints. In order to achieve these outputs, in a previous stage, a robot dynamic model is exited with the virtual potential field forces and the resulting angular velocities are imposed to the real robot. The path planning strategy is simulated to test its effectiveness.

**Keywords:** mobile robots, path planning, potential field, dynamic constraints, slip, acceleration.

## 1. INTRODUCCIÓN

El problema básico de planificación de movimiento para robots móviles, en presencia de obstáculos, consiste en encontrar una ruta que le permita al vehículo ir de una posición inicial a una posición final o meta dentro de su *espacio de trabajo*, sin colisionar con objeto alguno. La información de distancia del robot al contorno de los objetos es captada continuamente por los sensores, lo cual le permite al robot reaccionar inclusive ante la presencia de objetos en movimiento.

A pesar de que, en general, los robots móviles exhiben restricciones dinámicas (por ejemplo, la aceleración máxima que se puede alcanzar, con un determinado motor y para una carga específica) la mayoría de los métodos de navegación reactivos no las consideran [1]. El no tomar en cuenta las restricciones puede conducir a rutas no factibles e inclusive originar colisiones. Esto es especialmente cierto cuando los robots se mueven a alta velocidad o bien cuando la dinámica del

robot es tan lenta que su respuesta a las fuerzas reactivas es pobre. Entre los métodos de planificación de movimiento reactivos más usados está el método de campo de potencial [2], el de histograma de campo vectorial [3] y de banda elástica [4].

En la literatura se encuentran algunos pocos trabajos sobre la incorporación de las restricciones dinámicas en la formulación de los métodos de planificación reactivos. Miguez *et al.* [1] construyeron una representación espacial (“Ego-Dynamic Space”) en donde las distancias del robot a los objetos, en el espacio de trabajo, son transformadas en distancias que dependen de la restricción de desaceleración y en el tiempo de muestreo. Moon *et al.* [5] mostraron que un robot móvil con tracción diferencial no es capaz de seguir una trayectoria recta con exactitud, debido a las restricciones de aceleración de los controladores, por lo que propusieron un método de corrección de trayectorias. Esta nueva trayectoria, sin embargo, no fue integrada como parte del método de planificación de movimiento global. Por otro lado, Adams e Ibáñez [6] trataron el problema de mantener las velocidades y aceleraciones acotadas usando un controlador con retroalimentación de posición y aceleración, derivado a partir de métodos de energía y considerando sólo un campo atractivo lineal. Su propuesta se centra en el control de *bajo nivel* de los controladores de velocidad sin integrarla con ningún método de planificación en particular.

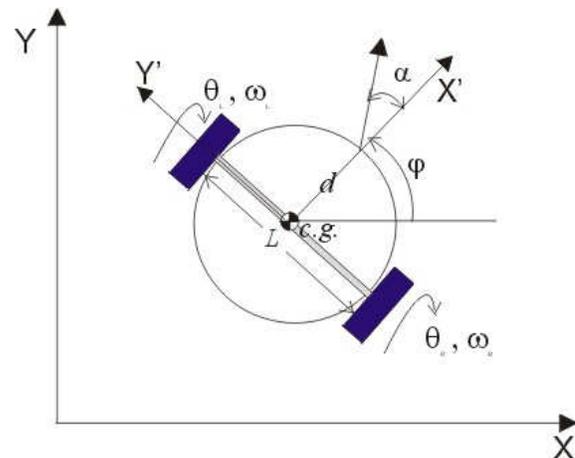
La contribución de este trabajo consiste en la incorporación de restricciones de deslizamiento, a parte de las de aceleración y velocidad, como una última etapa dentro del método de planificación mediante campo de potencial. Para ello se utiliza un modelo dinámico del robot que incluye las fuerzas de fricción entre las ruedas y el suelo, por lo que se relaja la restricción generalmente asumida de que las ruedas giran sin deslizarse. Esto trae como consecuencia que el número de grados de libertad del vehículo sea de tres (3) en lugar de los dos grados que se utilizan comúnmente. Además, el hecho de aplicar las fuerzas generadas por el campo de potencial primero al modelo del robot y luego las velocidades resultantes al robot real, trae como consecuencia que se filtren los

cambios bruscos de aceleración que pudieran resultar.

En la sección 2 se presenta el modelo dinámico del robot utilizado en las simulaciones del método de planificación. En la sección 3 se detalla la implementación realizada del método de campo de potencial y el entorno de simulación. En la sección 4 se presentan los resultados, mientras que la siguiente sección se discuten los mismos y se

## 2. MODELO DINÁMICO DEL ROBOT DE TRACCIÓN DIFERENCIAL

El modelo dinámico que se presenta en esta sección será excitado por las fuerzas generadas a partir del campo de potencial, las cuales son función sólo de la posición del punto específico del campo que se considere. Así, existe sólo una fuerza y ningún momento asociado a cada punto del campo. Por lo tanto, con el fin de orientar el robot en una dirección perpendicular a las líneas iso-potenciales, para cualquier posición dentro su espacio de trabajo, la fuerza virtual ( $F$ ) obtenida del campo se aplica al punto medio del semicírculo frontal del robot [7], como se muestra en la figura 1. En esta figura aparecen también los parámetros geométricos del robot de tracción diferencial.



**Figura 1.** Parámetros geométricos del robot de tracción diferencial.

En donde,  $\alpha$  y  $\varphi$  son el ángulo de aplicación de la fuerza del campo y el de rotación del robot con respecto al sistema de referencia global o *del mundo*. Nótese que el centro de gravedad del robot se ha hecho coincidir con el punto medio del

eje de las ruedas, esto simplifica las ecuaciones diferenciales que de otra manera serían no lineales [7]. De hecho con el diseño mecánico de los robots de tracción diferencial, en términos generales, se asegura que esta condición se cumpla.

La práctica usual para obtener las velocidades y aceleraciones del centro de gravedad en función de las velocidades angulares de las ruedas,  $\dot{\theta}_R$  y  $\dot{\theta}_L$ , y de  $\dot{\varphi}$ , es asumir que las ruedas giran sin deslizar. De allí, que se obtenga la conocida ecuación de restricción [7]:

$$\dot{\varphi}L = (\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L)r$$

Por lo tanto, se tendrían entonces dos grados de libertad y podríamos utilizar cualesquiera dos de los ángulos, por ejemplo,  $\theta_R$  y  $\varphi$ , para describir el movimiento del sistema. Sin embargo, se ha demostrado que, en general, las restricciones laterales y longitudinales (de giro sin deslizamiento) no pueden ser preservadas por robots móviles con ruedas ya sea, fijas, centradas u omnidireccionales [8]. Además, si lo que se quiere es conseguir que el movimiento generado por el campo de potencial satisfaga inclusive restricciones de deslizamiento, se debe incluir este fenómeno en el modelo. Por lo tanto, sólo se puede establecer la siguiente relación cinemática entre la velocidad angular,  $\dot{\varphi}$ , la velocidad lineal del centro de gravedad,  $v_C$ , y las velocidades lineales de las ruedas,  $v_R$  y  $v_L$ , estas tres últimas con dirección X', [9]:

$$\begin{bmatrix} 1 & L/2 \\ 1 & -L/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_C \\ \dot{\varphi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_R \\ v_L \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Por otro lado, el análisis dinámico considerando deslizamiento conduce al siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} m\dot{v}_c + c_a &= F_R + F_L \\ I_{ZZ}\ddot{\varphi} + c_a L^2 \dot{\varphi} &= L/2(F_R - F_L) \quad (2) \\ I_W \dot{\omega}_R + B\omega_R &= \tau_R - rF_R \\ I_W \dot{\omega}_L + B\omega_L &= \tau_L - rF_L, \end{aligned}$$

en donde,  $\omega_R$  y  $\omega_L$  son las velocidades angulares de las ruedas,  $I_{ZZ}$  e  $I_W$ , son los momentos de inercia del robot en dirección z con respecto al centro de gravedad y el momento de inercia de cada rueda incluyendo su eje.  $c_a$ ,  $B$  y  $r$  son el coeficiente de fricción viscosa equivalente del vehículo, el coeficiente de fricción viscosa asociado a la rotación de la rueda y el radio de la rueda respectivamente. Además,  $F_R$  y  $F_L$ , son las fuerzas de fricción en las ruedas, mientras que  $\tau_R$  y  $\tau_L$  son los torques aplicados a cada rueda y que se obtienen de la fuerza generada por el campo. La fuerza  $F$  aplicada con un ángulo  $\alpha$ , se puede descomponer en dos fuerzas aplicadas a cada una de las ruedas y estas a su vez se multiplican por el radio de la rueda para obtener los torques de excitación.

### 3. GENERACIÓN DEL CAMPO DE POTENCIAL

El campo de potencial se consigue con la superposición de un campo atractivo originado por la posición de final deseada y de campo repulsivo creado por los obstáculos. El campo atractivo más común calcula el potencial como si entre el robot y la meta existiera un resorte virtual, de allí que se obtenga la expresión [2]:

$$U_A(q) = 1/2k_{arc}[(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2]. \quad (3)$$

Sin embargo, el inconveniente con este tipo de potencial atractivo es que, como ocurre con un resorte, la fuerza va disminuyendo según el robot se acerca a la meta. Es por ello que algunos autores sólo utilizan la dirección de la fuerza que origina el campo y asumen la magnitud constante. Una forma de potencial que produce fuerzas de magnitud constante y que se ha utilizado también en este trabajo, es la siguiente:

$$U_A(q) = k_{arc}[|x - x_g| + |y - y_g|]. \quad (4)$$

Las componentes de la fuerza atractiva se obtienen, entonces, como:

$$F_{arc}(q) = -\nabla U_A, \text{ en donde } q = (x, y).$$

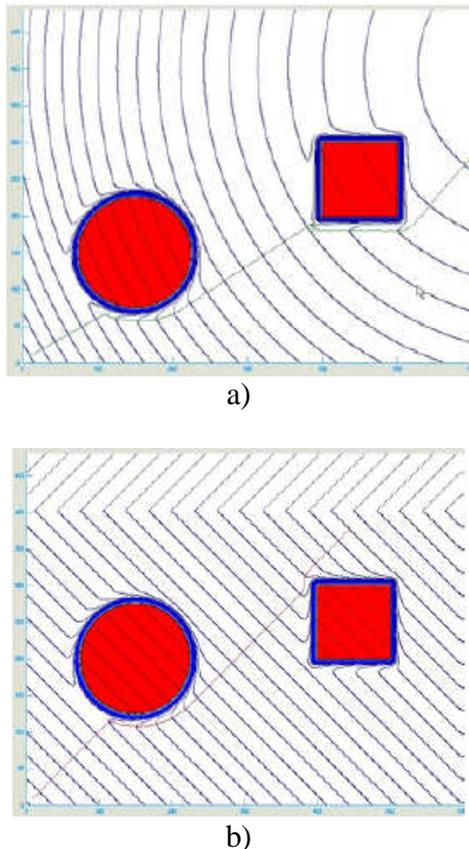
En cuanto al potencial repulsivo, la idea es generar una fuerza más fuerte cuanto más cercano esté el

robot al obstáculo, de manera que esta se desvanezca a cierta distancia del mismo. De allí que, se ha utilizado la siguiente expresión [2]:

$$U_R = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \text{si, } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{si, } \rho(q) > \rho_0 \end{cases}$$

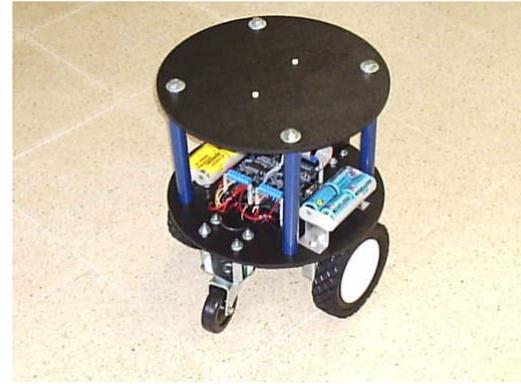
Los componentes de fuerza repulsiva se obtienen, entonces, como:

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_R$$



**Figura 2.** a) Campo resultante cuando el potencial atractivo es cuadrático, b) Campo resultante cuando el potencial atractivo es lineal.

En la figura 2 se muestran las líneas equipotenciales para un espacio de trabajo con algunos obstáculos. En la parte (a) de la figura se ha utilizado el potencial atractivo cuadrático de la ecuación 3, mientras que en la parte (b) el potencial de la ecuación 4. Se ve también en la figura 2 los caminos generados mediante la estrategia, que llamaremos, *clásica* es decir,



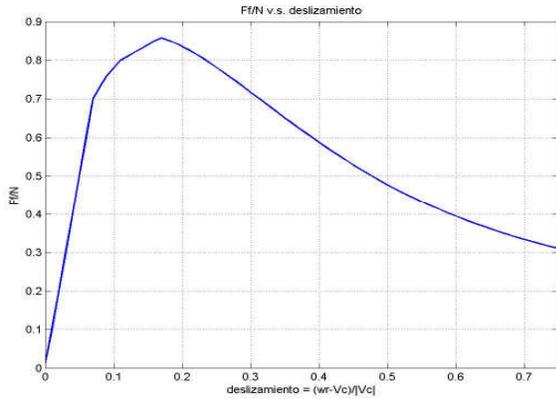
**Figura 3.** Robot móvil CIARBOT

tomando sólo la dirección de la fuerza virtual generada por el campo de potencial e imponiendo una velocidad constante al robot sin importar las restricciones dinámicas. El entorno de simulación utilizado para generar estos gráficos fue desarrollado con el interfaz gráfico para usuarios de MATLAB.

#### 4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Los parámetros geométricos y dinámicos utilizados para el modelo han sido los del robot móvil CIARBOT del Laboratorio Especializado de Análisis, Diseño y Simulación, que se aprecia en la figura 3. Además, la curva utilizada para describir la relación *Fuerza de fricción/Fuerza Normal* como función del *deslizamiento*, para cada rueda, se presenta en la figura 4. Se utilizaron valores típicos para la pendiente y para el valor máximo de esta función, pero se necesitaría ajustar estos parámetros para las condiciones del contacto específico entre las ruedas de CIARBOT y el piso sobre el que maniobra, si se desea un modelo aún más preciso.

Se ha ejecutado la simulación de la estrategia de planificación propuesta para los dos tipos de campos atractivos y se ha comparado la trayectoria resultante con aquella que resulta de aplicar la *estrategia clásica*. Igualmente, se han comparado las aceleraciones angulares de las ruedas que resultan de la aplicación de ambas estrategias. Para todas las simulaciones se ha tomado un periodo de actualización de las fuerzas virtuales de 50 ms y se han considerado dos velocidades medias de avance, diferentes de 1 m/seg y de 15 cm/seg. A continuación se muestran, en la figura 5 una



**Figura 4.** Curva de Fuerza de fricción/Fuerza Normal como función del deslizamiento.

comparación de las trayectorias en las zonas de mayor diferencia.

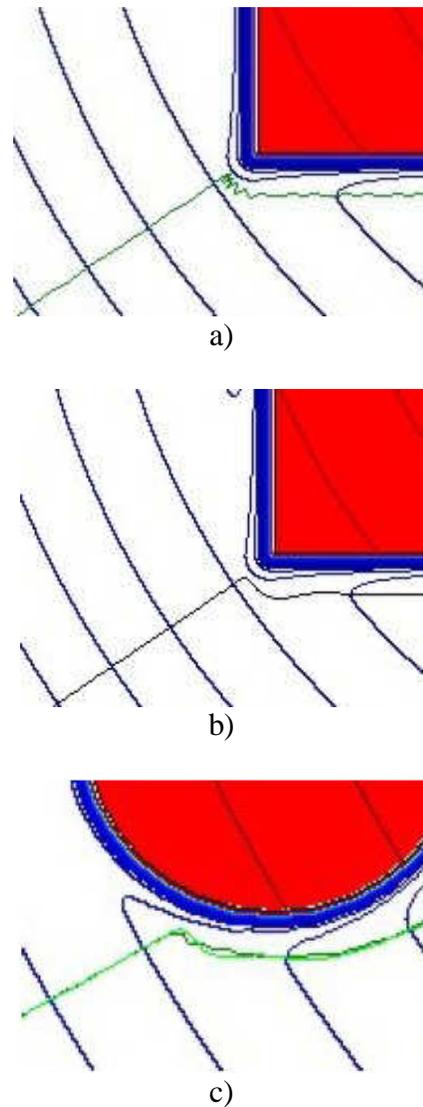
Comparando la figura 5a y 5b se observa cómo se han filtrado las oscilaciones producto, tanto de la aproximación directa con la esquina, como del movimiento paralelo al contorno. En la figura 5c, a pesar de que el obstáculo tiene un contorno más suave, también se producen oscilaciones, que son igualmente filtradas por la estrategia propuesta.

En la figura 6, se comparan las aceleraciones angulares resultantes en la rueda derecha con ambas estrategias de planificación, la *clásica* y la propuesta, para una velocidad lineal media del robot de 15 cm/seg, la cual es una velocidad baja. Se aprecia una gran diferencia no sólo en la amplitud de las aceleraciones angulares, sino también en la frecuencia de las oscilaciones.

Por otro lado, el deslizamiento registrado para las trayectorias simuladas con la estrategia propuesta fue en todo momento menor al 0.5%.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Resulta notable, por una parte, que algunas de los problemas con frecuencia señalados del método de campo de potencial queden resueltas con el método de filtrado propuesto. Es el caso de las oscilaciones cuando el robot viaja paralelo a un contorno y el de los mínimos locales. Estos últimos se salvan con facilidad a gracias a que el momento generado por la ubicación de la fuerza virtual está presente, en general, por pequeño que sea el ángulo,  $\alpha$ , de la fuerza, lo cual se convierte en un mecanismo de escape de los mínimos.

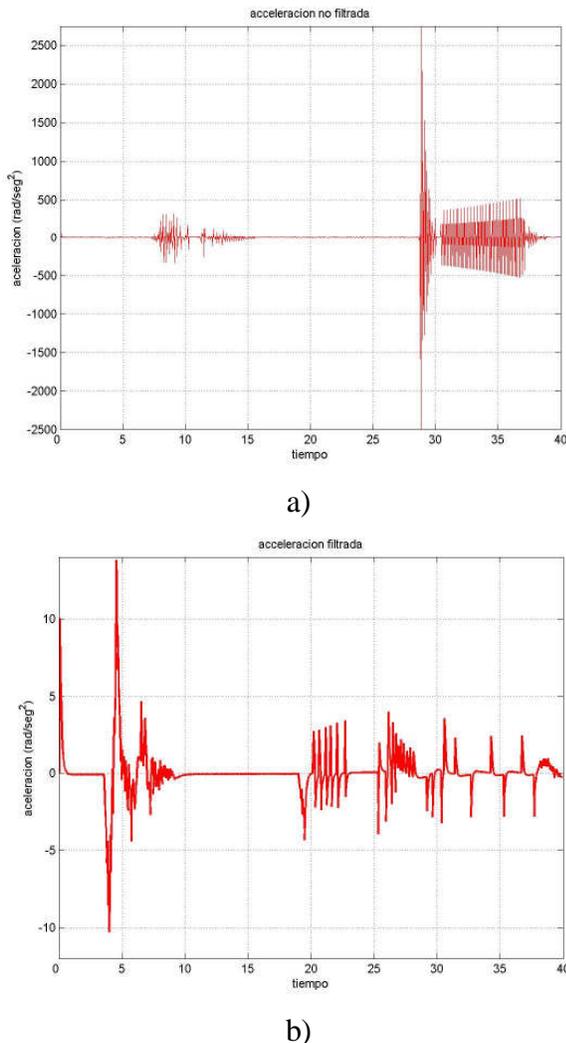


**Figura 5.** a) Trayectoria con la estrategia clásica 1 m/seg, b) trayectoria con la estrategia compuesta a 1m/seg, c) ambas trayectorias para la zona cercana a otro objeto.

Se comprobó también que las aceleraciones angulares de las ruedas, que serán eventualmente suplidas por los motores, son de uno y hasta de dos órdenes de magnitud menores cuando se utiliza la estrategia propuesta. A su vez, los cambios de aceleración son mucho menos bruscos en este último caso.

Por último, vale la pena notar que aún cuando no se hayan ajustado los parámetros de la curva de fuerza de fricción para nuestro robot en particular, los resultados de las simulaciones, realizadas con diferentes valores de la pendiente de esta función y del coeficiente de fricción para deslizamiento cero,

mostraron una baja sensibilidad a dichos valores. Esperamos confirmar estas observaciones con futuros trabajos.



**Figura 6.** Aceleraciones angulares de la rueda derecha cuando se utilizan la estrategia clásica (a) y la estrategia propuesta (b), para un velocidad lineal media de 15 cm/seg.

A nuestro juicio, la principal ventaja de esta estrategia es que permite acotar tanto las aceleraciones, como el deslizamiento antes de enviar los valores de consigna final a los motores. Resta aplicar esta estrategia al robot real para valorar, en su justa dimensión, las ventajas de la aplicación de la estrategia propuesta, desde el punto de vista de la controlabilidad y consumo de potencia del sistema resultante.

## 6. REFERENCIAS

- [1] J. Minguez, L. Montano y O. Khatib, “Reactive Collision Avoidance for Navigation with Dynamic Constraints”, Proceedings IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, pp. 588-594, Lausanne, Suiza, Octubre 2002.
- [2] O. Khatib, “Real Time Obstacle Avoidance for Manipulation and Mobile Robots”, The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 90-98, 1986.
- [3] J. Borestein, y Y. Koren, “The Vector Field Histogram –Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots”, IEEE Journal of Robotics and Automation, 7, pp. 278-288, 1991.
- [4] O. Khatib y S. Quinlan, “Elastic Bands: Connecting, Path Planning and Control”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, Nuevo México, Abril, 1997.
- [5] J. Moon, C. Park y F. Harashima, “Kinematic Correction for a Differential Drive Mobile Robot and a Design for Velocity Trajectory with Acceleration Constraints on Motors Controllers”, IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 930-935, 1999.
- [6] M. Adams y J. Ibañez, “Safe Path Planning and Control Constraints for Autonomous Goal Seeking”, Proceedings IEEE Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems pp. 2377-82, Lausanne, Suiza, Octubre 2002.
- [7] L. Montano, J. Asensio, “Real-Time Robot Navigation in Unstructured Environments Using a 3D Laser Rangefinder”, IEEE Proceedings of IROS, pp. 526-532, 1997.
- [8] S. Shekhar, “Wheel Rolling Constraints and Slip in Mobile Robot”, Technical Report of the Robotics and Process System Revision, Oak Ridge National Laboratory, Julio 1996.
- [9] R. Siegwart y I. Nourbakhsh, “Introduction to Autonomous Mobile Robots”, The MIT Press, Capitulo 3, Cambridge, Massachusetts, Londres, 2004.

# MECANISMOS DE AUTODEPURACIÓN DE CLOROFENOLES EN RÍOS

Viccelda Domínguez, Ph. D.  
Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Tecnológica de Panamá  
[viccelda.dominguez@utp.ac.pa](mailto:viccelda.dominguez@utp.ac.pa)

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación es determinar los mecanismos de autodepuración de PCP y 2,4,6-TCP en el río Biobío entre Negrete y Laja, considerando, dos subtramos con características hidrodinámicas y físico-químicas distintas y condiciones críticas de descarga. Los subtramos de Coihue y Laja, con características de un río en rítrón y potamón (respectivamente). Se investigaron básicamente como mecanismos de transformación la biodegradación y fotólisis, mientras que como mecanismos de transferencia de masa la adsorción/desorción y volatilización. Por otro lado, en el subtramo de Coihue se realizaron pruebas hidráulicas en terreno, con la finalidad de determinar la constante de dispersión transversal, mediante la aplicación de un programa de calidad de aguas elaborado por el Grupo de Modelación Matemática de Calidad del Agua y Resolución Numérica (GMMCARN 2002) de la Universidad de Concepción y el método de análisis de cambio de momentos. Concluyendo, los mecanismos de autodepuración en el subtramo estudiado (Laja), son en orden de importancia: biodegradación, fotólisis, volatilización y adsorción al sedimento. La dispersión transversal en el subtramo de Coihue es  $1,11 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Aplicando las constantes cinéticas y de transporte evaluadas en laboratorio, terreno y teóricamente al programa de calidad de agua (GMMCARN, 2002) para descargas críticas de rodamina ( $20 \mu\text{g/L}$  de 2,4,6-TCP y  $40 \mu\text{g/L}$  de 2,4,6-TCP) con un caudal mínimo (7Q10), en los subtramos estudiados se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se cumple con el valor guía para el 2,4,6-TCP de la OMS ( $10 \mu\text{g/L}$ ).
- En el caso del PCP, el valor recomendado es  $0,5 \mu\text{g/L}$  (CONAMA, 1997) no se cumple tomando en cuenta la capacidad de dilución del río solamente. Tomando en cuenta el poder autodepurativo del río se cumple con la clase 3 ( $0,7 \mu\text{g/L}$ ).
- En los escenarios planteados para las zonas adyacentes a la de mezcla, tanto para el PCP como el 2,4,6-TCP, no cumplen con ninguno de los criterios (OMS, CONAMA).

**Palabras Claves:** Autodepuración, biodegradación, fotólisis, adsorción, volatilización

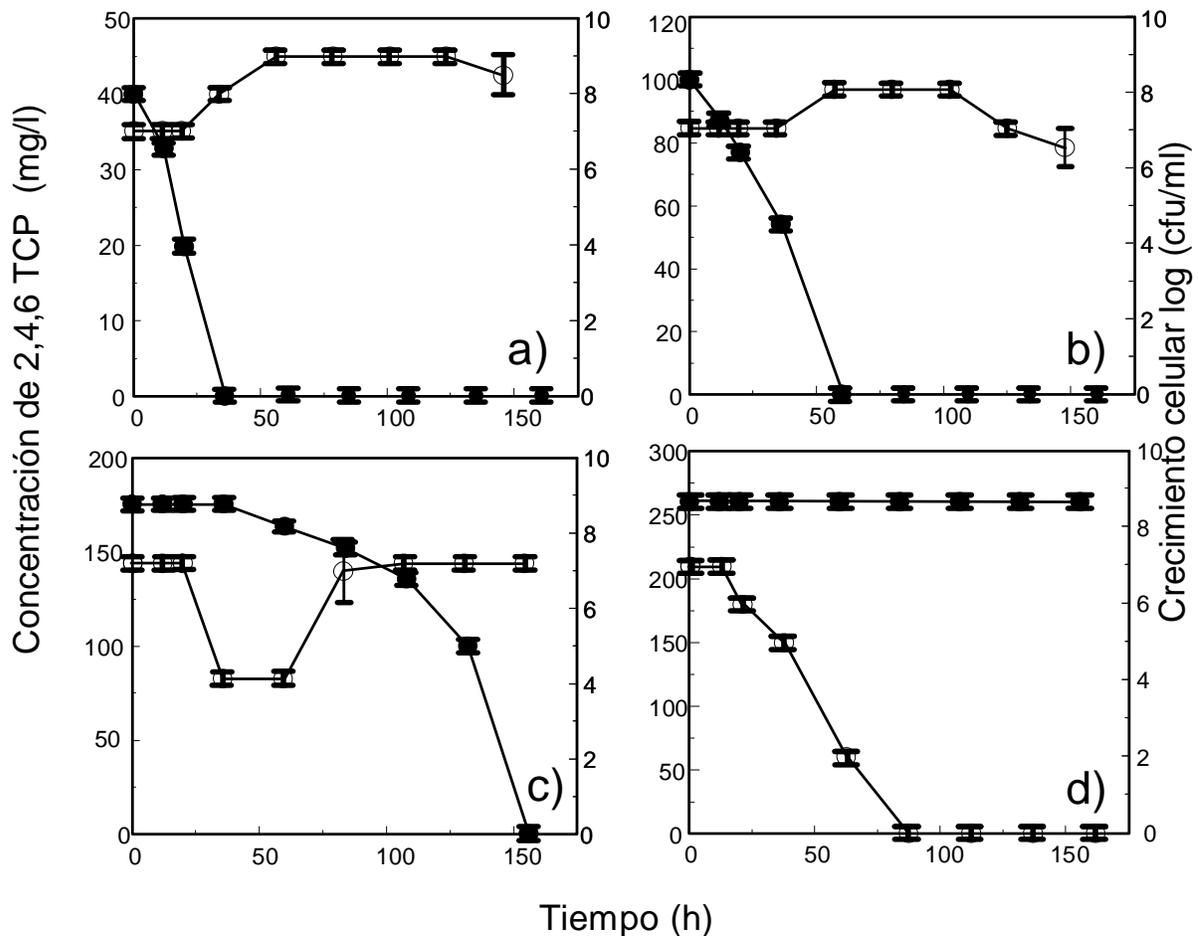
## ABSTRACT

The objective of this research is to determine the self-depuration mechanism of PCP and 2,4,6-TCP in river BioBio, which is between Negrete and Laja Communities, considering two segments with different hydrodynamics, physical and chemical characteristics, in critical discharge conditions, the segments of Coihue and Laja with characteristics of a river at rítrón and potamón respectively. The Biodegradation and Photolysis were investigated as mechanism for transformation and the absorption/desorption and volatilization as mechanism for mass transfer. In addition, at the segment of Coihue some hydraulic testing of soil was conducted with the goal of determine the lateral dispersion constant. For that purpose the method of moment and a program developed by the group of Mathematic Modeling of Water Quality and Numerical Solution (GMMCARN 2002) of the Universidad de Concepción were applied.

**Keywords:** Auto depuration, biodegradation, absorption, photolysis, volatilization.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la cuenca del río Biobío (Octava Región-Chile) y en el área marina adyacente se concentra aproximadamente un 50% de las plantaciones forestales de la República de Chile, un 90% de la producción nacional de celulosa, 100% de papel periódico y 90% de madera. La situación actual y futura, implica una creciente presión sobre la calidad del agua del río Biobío, debido a que ésta es usada para abastecimiento de agua potable (uso doméstico), industrial, riego y como receptor de las descargas de los residuos líquidos tratados (industriales y domésticos). La industria de celulosa kraft produce una variada gama de compuestos específicos que son descargados a través de sus efluentes. Debido a las tecnologías empleadas en el blanqueo de la pulpa de celulosa kraft, esta industria puede descargar pentaclorofenol (PCP) y 2,4,6-triclorofenol (2,4,6-TCP) al medio. En efecto, estos compuestos han sido encontrados en el río Biobío y en particular en los subtramos estudiados.



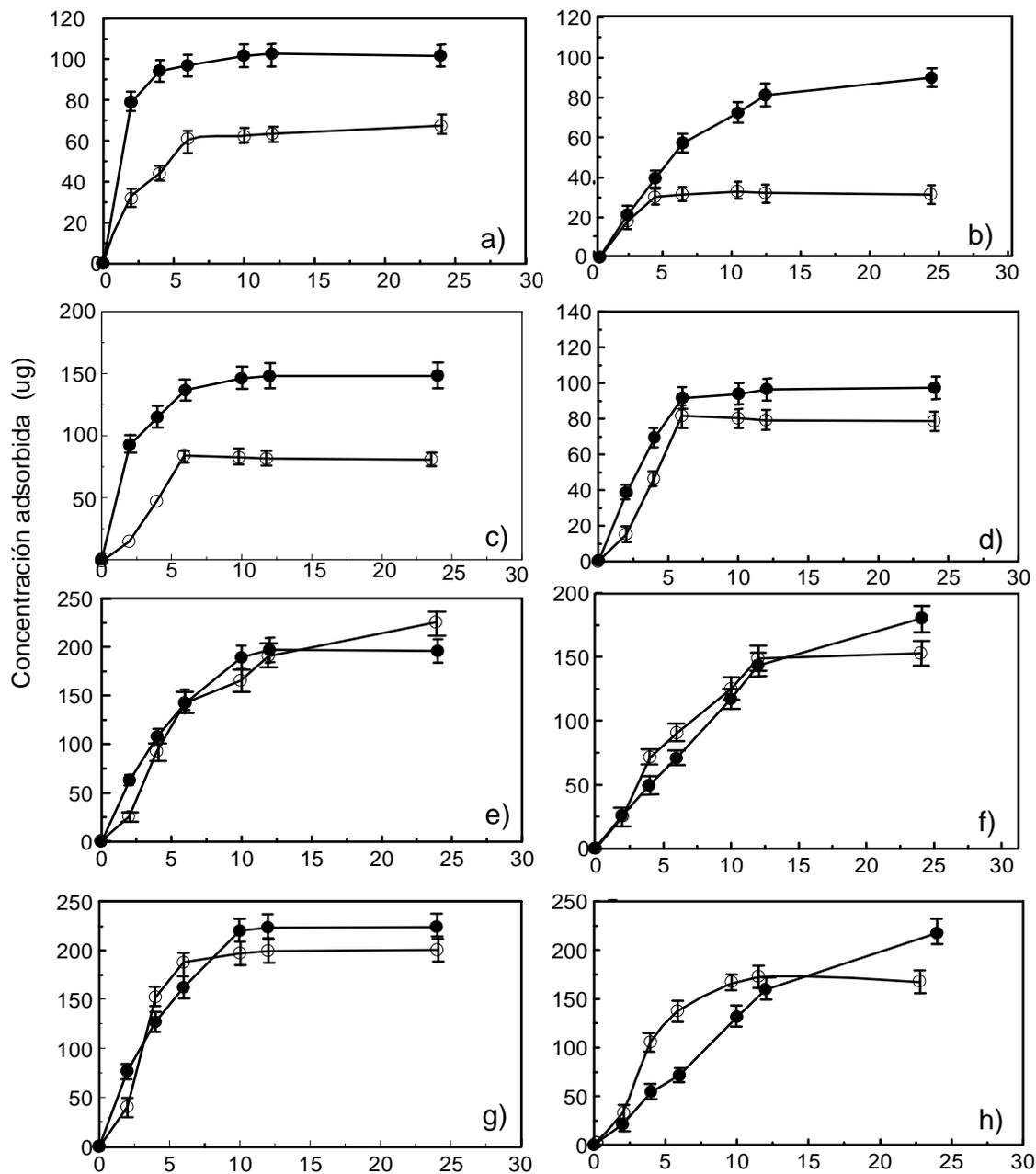
**Figura 1.** Degradación de 2,4,6-TCP en MM (●) y crecimiento bacteriano (○). Concentración inicial de 2,4,6-TCP en cada ensayo: a) 40 mg/L b) 100 mg/L, c) 175 mg/L y d) 260 mg/L.

Dichos compuestos son tóxicos y ampliamente reconocidos como agentes carcinogénicos. El objetivo de este trabajo es investigar los mecanismos de autodepuración de PCP y 2,4,6-TCP en el río Biobío entre Negrete y Laja, considerando, dos subtramos con características hidrodinámicas y físico-químicas distintas y condiciones críticas de descarga.

## 2. METODOLOGÍA

Se investigaron básicamente como mecanismos de transformación la biodegradación y fotólisis, mientras que como mecanismos de transferencia de masa la adsorción/desorción y volatilización. Para la determinación de las cinéticas de biodegradación y adsorción/desorción se tomaron muestras de agua y sedimento en el subtramo Laja y se realizaron ensayos en batch a nivel de laboratorio (Domínguez et al., 2002;

Domínguez et al., 2004). Considerando las características físico-químicas del agua del río y las características del PCP y 2,4,6-TCP se determinaron teóricamente las constantes cinéticas de fotólisis y volatilización. Por otro lado, en el subtramo de Coihue se realizaron pruebas hidráulicas en terreno (con trazador rodamina), con la finalidad de determinar la constante de dispersión transversal, mediante la aplicación de un programa de calidad de aguas elaborado por el Grupo de Modelación Matemática de Calidad del Agua y Resolución Numérica (GMMCARN 2002) de la Universidad de Concepción de Chile, y también se utilizó el método de análisis de cambio de momentos, para la determinación de la dispersión transversal. Para determinar cuál es el parámetro más sensible del programa de calidad de agua, se realizaron análisis de sensibilidad simples y combinados.



**Figura 2.** Cinética de adsorción del PCP (O) y 2,4,6-TCP (●) a: a) concentración inicial de 5 mg/L, SS = 0,2; b) concentración inicial de 5 mg/L, SS = 0,042; c) concentración inicial de 10 mg/L, SS= 0,2; d) concentración inicial 10 mg/L, SS = 0,042; e) concentración inicial de 20 mg/L, SS = 0,2; f) concentración inicial de 20 mg/L, SS = 0,042; g) concentraciones iniciales de 25 mg/L, SS = 0,2; h) concentraciones iniciales de 25 mg/L, SS = 0,042.

### 3. RESULTADOS

Se pudo determinar que en tramos donde hay una elevada carga ambiental debido a descargas de PCP y 2,4,6-TCP existen bacterias adaptadas que son capaces de degradar concentraciones de 2,4,6-TCP hasta 260 mg/L de 2,4,6-TCP (Figura1). Para este tipo de microcosmo, se

determinó un valor para la constante de saturación ( $K_s$ ) de 112,4 Mg/L de 2,4,6-TCP, mientras que la constante de inhibición ( $K_i$ ) fue de 243,9 mg/L de 2,4,6-TCP. Sin embargo, estas mismas cepas no presentaron la habilidad degradar PCP. Para efectos de modelación se consideró como constante debido a la biodegradación de 2,4,6-TCP el valor de  $4,2 \cdot 10^{-5}$  1/s.

En el caso de la fotólisis, se consideró un valor para el PCP y 2,4,6-TCP de  $1,6 \cdot 10^{-6}$  1/s cada uno.

El sedimento del subtramo Laja del río Biobío, presenta baja adsorción e irreversibilidad debido principalmente a su granulometría, arena gruesa (escala de Wentworth), mínimo porcentaje de finos (0,12), bajo contenido de carbono orgánico (0,22 %) y pH cercano a 7. La constante cinética de adsorción del 2,4,6-TCP y PCP (Figura 2)  $2,9 \cdot 10^{-7}$  1/s  $10^{-7}$  1/s y  $4,3 \cdot 10^{-7}$  1/s, respectivamente.

Por otra parte, la cinética de volatilización calculada en condiciones críticas (época de estiaje: 20 °C y velocidad del agua de 0,5 m/s) fue de  $2 \cdot 10^{-6}$  1/s para el PCP y  $2,2 \cdot 10^{-6}$  1/s para el 2,4,6-TCP.

Además de determinar los coeficientes hidráulicos de dispersión transversal y advección (Tabla 1), se aplicó la condición de caudal más crítica (7Q10) para predecir localidad del agua, de acuerdo al programa GMMCARN(2002).

Como se puede observar en la Tabla 1, el río Biobío en el sector de Coihue presenta un significativo valor de dispersión transversal ( $1,1 \text{ m}^2/\text{s}$ ) que concuerda con la afirmación teórica de autores tales como: Holley et al. (1972), Lau and Krishnappan (1981) y Boxall et al. (2003); los cuales sugieren que entre los factores que mayormente afectan la magnitud de la dispersión se encuentran las variaciones en la forma de la sección transversal, y que estas variaciones deben tener relación con el cambio de velocidad producto de la fricción del fondo. Además, la presencia de curvas también influencia la resistencia del flujo.

Por otra parte, la estimación de parámetros por medio del programa GMMCARN (2002), coincidió con las estimaciones realizadas por el método de momento; sin embargo para la última sección de control las concentraciones en campo variaron un poco a las calculadas por el modelo.

Canal	Geometría	Ancho Promedio b (m)	Profundidad promedio del flujo h (m)	(a) Velocidad		Coeficiente de dispersión transversal $E_v$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Referencia
				Media $\bar{u}$ (m/s)	del fondo $u^*$ (m/s)		
Río Missouri cerca de Blair Nebraska	Río con meandros	200	2,70	1,75	0,074	0,12	Yotsukura et al. (1970)
Río Mackenzie, desde el fuerte Simpson hasta el Río Norman	Recto, con pequeñas curvaturas; numerosas islas y barreras de arena	1240	6,70	1,77	0,152	0,67	Mackay (1970)
Río Missouri cerca de la estación nuclear de Cooper, Nebraska	El tramo incluye una curva de $90^\circ$ y otra de $180^\circ$	234	4,00	1,98	0,085	1,1	Yotzukura and Sayre (1976)
<b>Río Biobío de sector de Coihue</b>	<b>Tres cambios de dirección de <math>40^\circ</math>, <math>20^\circ</math> y <math>20^\circ</math>. Y cambios en la sección transversal</b>	<b>220</b>	<b>2,20</b>	<b>0,37</b>	<b>0,208</b>	<b>1,1</b>	<b>Este estudio</b>
Grand River	N.E.	59,2	0,50	0,35	0,069	0,009	Lau and Krishnappan (1981)
Grand River	N.E.	59,2	0,50	0,35	0,069	0,01	Demetracopoulos (1994)

N.E. No evaluada

Este comportamiento se probablemente está relacionado con los mismos problemas al aplicar el método de análisis de cambio de momentos. Esto quiere decir, en el caso del ajuste de los coeficientes del modelo, que es necesario una mayor cantidad de puntos o secciones de control.

En el caso del subtramo de Laja (5,3 km de longitud), el mismo representa una zona advectiva; esto se confirma por el comportamiento de la pluma en las simulaciones del programa, y características del flujo y el cauce. Esto sustenta el hecho de que en las simulaciones no se observa que el contaminante llegue a la longitud de cruce, menos a la mezcla completa.

La constante de biodegradación es el fenómeno cinético que mayormente repercute sobre la concentración máxima, en el caso específico del 2,4,6-TCP en Laja. Este efecto de las constantes cinéticas sobre la variable, no se observa en el caso del PCP, debido a que el valor de  $k$  es un orden de magnitud menor que el 2,4,6-TCP.

En este estudio, la suma de los fenómenos cinéticos de adsorción, biodegradación, volatilización y fotólisis, son despreciables en comparación con los fenómenos de transporte: dispersión transversal y advección.

Para el caso de descargas críticas de 2,4,6-TCP y PCP (efluente de proceso ECF, sin tratamiento antes de la descarga al río), en condiciones hidrológicas promedio en estiaje, se concluye que el PCP no cumpliría con las clases 1 y 2 de la futura norma de calidad de agua en cuerpos receptores. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que estos escenarios han sido ejecutados en una primera aproximación con datos de laboratorio, y sin calibración ni validación *in situ* para los contaminantes específicos. Este estudio ayudado a comprender los procesos que pueden ocurrir en un volumen de control para autodepurar las aguas de un río, se recomienda complementar este tipo de estudios con la calibración y validación para el compuesto que se esté investigando. Por otra parte es necesario simular escenarios en los que se consideren los efectos sinérgicos de los distintos

contaminantes que se encuentran en la descargas de las industrias de blanqueo de celulosa y papel.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados indican, que bajo el escenario crítico (época de estiaje), en el subtramo de Laja, se cumpliría con el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud, para concentraciones de 2,4,6-TCP en el agua (10 µg/L). Sin embargo, en la zona adyacente a la mezcla (lugar de descarga de la industria de celulosa kraft blanqueada) esto no ocurre. Más aún, para el caso del PCP en ninguna de las secciones simuladas, se cumpliría con la futura norma secundaria de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales (CONAMA 1997), considerando calidades de agua clases 1 (Muy buena calidad: indica un agua apta para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para el riego irrestricto y para los usos comprendidos en las clases 2 y 3) y 2 (Buena calidad: indica un agua apta para el desarrollo de la acuicultura, de la pesca deportiva y recreativa, y para los usos comprendidos en la clase 3). Considerando las constantes cinéticas de transformación y transferencia de masa, determinadas en este estudio, sólo se podría alcanzar a cumplir con calidad de agua clase 3 (indica un agua adecuada para bebida de animales y para riego restringido).

Se recomienda seguir realizando estudios que consideren los efectos sinérgicos de la mezcla de contaminantes, y además realizar campañas en terreno de calibración y validación de modelos para contaminantes específicos, que permitan predecir con mayor precisión la calidad del agua y así mejorar la gestión de ésta.

**AGRADECIMIENTOS A LOS PROYECTOS: ID-147 DEL AÑO 2005 DE LA SECRETARÍA NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LA REPÚBLICA DE PANAMÁ (SENACYT) Y EL PROYECTO 200.091.028-1.0 DE LA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN-REPÚBLICA DE CHILE.**

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Boxall JB, Guymer I, Marion A (2003) Transverse mixing in sinuous natural open channel flows. *J Hydraul Res* 41:153-165.
2. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) (1997). Proyecto: Instructivo de calidad para la protección de las aguas continentales superficiales. Santiago, Chile.
3. Demetracopoulos AC (1994) Computation transverse mixing in streams. *J Environ Eng.* 120:699-706.
4. Domínguez VM, Correa J, Vidal G, López A, Martínez M (2002) 2,4,6-Trichlorophenol Degradation by River Sediment Exposed to Bleached Kraft Mill Discharge. *Bull Environ Contam Toxicol* 69:463-470.
5. Domínguez VM, Vidal G, Martínez M (2004) Sorptive behavior of chlorophenols on river volcanic sediment. *Bull Environ Contam Toxicol* 73:519-526.
6. Grupo de Modelación Matemática y Resolución Numérica (GMMCARN) (2002) Programa de Calidad de Agua. Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
7. Holley ER, Siemons J, Abraham G (1972) Some aspects of analyzing transverse diffusion in rivers. *J Hydraul Res* 10:27-57.
8. Lau YL, Krishnappan BG (1981) Modeling transverse mixing in natural streams. *J Hydraul Div, Am Soc Civ Eng* 107: 209 –226.
9. Mackay JR (1970) Lateral mixing of the Liard and Mackenzie rivers downstream from their confluence. *Can J Earth Sci* 7:111-124.
10. Yotzokura N, Fischer HB, Sayre WW (1970) Measurement of mixing characteristics of the Missouri river between Sioux city, Iowa and Plattsmouth, Nebraska. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1899-G.
11. Yotzokura N, Sayre WW (1976) Transverse Mixing in Natural Channels. *Water Resour Res* 12: 695-704.

# EVALUACIÓN PRELIMINAR DE 20 VARIEDADES DE AMARANTO EN PANAMÁ

**Leopoldo Manso, Licenciado en Alimentos**

Universidad Tecnológica de Panamá

[leopoldo.manso@utp.ac.pa](mailto:leopoldo.manso@utp.ac.pa)

**Félix Pineda, Ingeniero Agrónomo**

Universidad de Panamá

[fpineda@cwpanama.net](mailto:fpineda@cwpanama.net)

## RESUMEN

Los amarantos son plantas de hoja ancha, caracterizadas por ser de los pocos "no-pastos" que producen cantidades significativas de grano con características de cereal comestible, por lo que se clasifica como "pseudocereal".

La proteína del amaranto es excepcional en cuanto a su calidad, por su alto contenido de lisina y triptófano.

En Panamá, la Encuesta Nacional de Consumo de Alimentos, de 1992, demostró que el arroz es el alimento de mayor consumo y el que más contribuye a las calorías totales de la dieta, especialmente en el área urbana. Las proteínas, tanto del arroz, como de otros cereales, como el maíz y el trigo, carecen de algunos aminoácidos esenciales, tales como lisina, metionina y triptofano, los que pueden ser suministrados por el amaranto.

El material utilizado para las pruebas procede de la Estación Regional de Introducción de Plantas, de la Universidad Estatal de Iowa.

El material utilizado para las pruebas procede de la Estación Regional de Introducción de Plantas, de la Universidad Estatal de Iowa, consistente en dieciseis variedades de *A. cruentus*, tres de *A. hybridus*, y una de *A. hypocondriacus*.

Se midió el desarrollo vegetativo, anthesis, emergencia de la panícula y el rendimiento de cada grupo varietal.

Se obtuvo una data que orienta las variedades que deben ser estudiadas mas detalladamente en ensayos posteriores para determinar las especies industrializables en Panamá.

**Palabras Claves:** Amaranto, rendimiento, pseudocereal, lisina, triptófano.

## ABSTRACT

The amaranths are one of the few non-grass plants which produce significant amounts of eatable pseudo-cereal grains. The quality of amaranth's protein is exceptional due to its high content of lysine, methionine and tryptophan.

In Panama, the 1992 National Food Survey showed that rice is the food of highest consumption. It is the main contributor to the total daily calories in Panamanians diet, especially in the urban area. The proteins of the rice and other cereals, such as corn and wheat lack some essentials amino acids like lysine and tryptophan, which can be supply by amaranth.

The material used for the tests in this work was provided by Regional Plant Introduction Station of Iowa State University.

*It comprised sixteen varieties of A. cruentus, three of A. hybridus and one of A. hypocondriacus.*

*The vegetative development, anthesis, panicle emergence and the yield of each variety group were measured. The resulting data give a direction for future studies which will be focused on finding what species could be industrialized in Panama.*

**Key Words:** Amaranth, yield, pseudo-cereal, lysine, tryptophan.

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1. Características botánicas.

El amaranto pertenece a la familia *Amaranthaceae*, plantas anuales, de las cuales existen alrededor de 60 géneros y 800 especies.

Tres especies de amaranto se cultivan por el valor de sus semillas comestibles; *A. hypocondriacus*, *A. cruentus* y *A. caudatus* (1)(2)

*Amaranthus caudatus* es cultivado en los países andinos, y en Argentina; *A. cruentus* se localiza en el este de Norteamérica, las tierras altas tropicales de México, Centroamérica y Sudamérica y *A. hypocondriacus* puede encontrarse en el oeste de la sierra madre en México. Otras especies de Asia, como *A. tricolor* y *A. lividis* no tienen utilización como comestible por lo pequeño de sus inflorescencias y lo escaso de sus rendimiento (2).

Los amarantos son plantas de hoja ancha, caracterizadas por ser de los pocos "no-pastos" que producen cantidades significativas de grano con características de cereal comestible, por lo que se clasifica como "pseudocereal" (3).

El amaranto es una de las pocas dicotiledóneas que posee el ciclo fotosintético C-4, de alta eficiencia, por lo que crece vigorosamente, resiste sequías,

alta radiación, calor y plagas y se adapta fácilmente a nuevas tierras y ambientes (1)(4).

La planta posee hojas brillantemente coloreadas y flores violetas, anaranjadas, rojas y doradas. Las panojas, algunas de hasta 50 cm de largo, se parecen a las del sorgo. Las semillas, aunque apenas más grandes que una semilla de mostaza (0.9 - 1.7 mm de diámetro), se producen en cantidades masivas (3). La mayoría de las especies son monóicas, pero algunas son dióicas (7).

### 1.2. Aspectos agronómicos.

Las mayores experiencias se tienen en Nebraska, U.S.A, donde se ha obtenido un rendimiento promedio de tres años de 700-800 kg/Ha. Entre las variedades cultivadas se encuentran la **Amont** y la **Plainsman**.

La Amont procede de *A. cruentus*, seleccionada por la uniformidad de la flor y el color de la semilla; la Plainsman es una selección de la hibridación entre *A. hypocondriacus* con *A. hybridus*. Este último tiene una maduración más temprana y fue logrado conjuntamente por la Universidad de Nebraska y el Rodale Research Institute.

Es importante sembrar una fuente que tenga poco contenido de semillas oscuras, ya que las semillas claras son las que poseen mejores características industriales. Las semillas certificadas deben contener menos de 0.02 % de semillas negras.

La profundidad de la siembra depende del tipo de suelo, pero puede ser de 0.5 a 2.5 cm de profundidad. Amaranto requiere de un buen contacto suelo/semilla, para la rápida germinación y brote; también requiere de el mantenimiento de una buena humedad para el implante inicial. La fecha normal de siembra es de mayo a inicios de junio, similar al sorgo.

La semilla de amaranto es pequeña, están contenidas, aproximadamente, 385,000 semillas en un kilogramo. La mayoría de los productores usa de 0.5 a 2.5 kg de semilla por hectárea. Corrientemente se usa muy poco o ningún fertilizante. El nitrógeno debe ser aplicado en

pequeña cantidad, alrededor de 22.7 a 45 kg por hectárea.

No se utilizan herbicidas, sino que se siembra en filas unidas, el amaranto es el que primero emerge y domina (4).

### 1.3. Cosecha y almacenaje.

El amaranto puede ser mecanizado si su grano es separado luego que los tallos y hojas se secan. Si se cosecha antes de que la planta se seque, el grano se pega al material húmedo y se pierde o se hace inservible para el almacenaje. Para almacenarse, la humedad del grano debe estar entre 10 y 12 %. La mezcla de follaje con el grano puede resultar en el desarrollo de mohos (4).

### 1.3. Aspectos nutricionales.

Con un contenido de proteína de 16%, con el de 35% de ella en el endospermo y 65% en la cáscara y el germen, la semilla de amaranto se compara muy favorablemente con las otras variedades convencionales de trigo (12 a 14 por ciento), arroz (7 a 10 por ciento), maíz (9 a 10 por ciento) y otros cereales de consumo común (1)(5), para datos más precisos, véase Tabla 3.

La proteína del amaranto es también sobresaliente y excepcional en cuanto a su calidad, por su alto contenido de lisina y triptófano. Los cereales (maíz, trigo, avena, etc.) son considerados no balanceados en términos de su composición de aminoácidos, ya que precisamente les hace falta mayor cantidad de lisina para dar una alimentación óptima. Las proteínas del amaranto, sin embargo, tienen casi el doble del contenido de lisina que el trigo, tres veces más que el maíz y tanta como se encuentra en la leche, el estándar de excelencia nutricional (3).

Con respecto a la composición de las grasas, el amaranto contiene alrededor de un 6% de grasas, de las cuales un 35% es ácido linoléico y un 38 a 40% es ácido linolénico, dos ácidos grasos esenciales e importantes en la fijación del calcio y la síntesis de prostaglandinas. El amaranto es, por lo tanto, un complemento nutricional óptimo para los cereales convencionales (4).

En las zonas tropicales de Perú y México, el amaranto es conocido como "kiwicha" y se consume la hoja como hortaliza y las semillas en forma de turrón o de una harina, "mashka" en Perú y "pinole" en México (5).

En las épocas precolombinas el grano de amaranto era uno de los alimentos básicos del nuevo mundo, casi tan importante como el maíz y el frijol. Antes de la conquista, 17 provincias mandaban más de 20,000 toneladas de grano de amaranto a la antigua Tenochtitlán (hoy la Ciudad de México), en tributo anual al emperador azteca Moctezuma.

Un estudio de la Academia Nacional de Ciencias de los EE.UU., publicado en 1975, titulado "Plantas tropicales subexplotadas con valor económico prometedor", seleccionó al amaranto de entre 36 de los cultivos más prometedores del mundo y lo calificó como "el mejor alimento de origen vegetal para consumo humano"(3).

El amaranto mejora la calidad nutricional a formulaciones de pan, galletas, cereales, platillos típicos, alimentos naturistas, pastas, sopas, botanas y otros productos. Mejora los sistemas de sabor tiene alta capacidad de absorción de agua e incrementa la capacidad de inflado, además provee de alta viscosidad de gelatinización mejora lo crocante en productos que lo requieran.

Debido a su bajo contenido en gluten, el amaranto es una excelente opción para personas que padecen alergia a esta proteína, ya que pertenece a una familia de alimentos no relacionada al trigo ni a otros cereales.

El follaje de la planta es también comestible, tanto para humanos como para animales, constituyendo una excelente fuente de hierro biodisponible, hasta de 57 ppm y vitamina A, hasta 250 ppm, sin contar su contenido de proteínas, de aproximadamente 15 % (7).

Tratamientos aplicados a poblaciones desnutridas en México, han resultado en altos índices de recuperación, existiendo una relación significativa entre el suministro de concentrado amiloprotéico de amaranto y el porcentaje de recuperación de niños con desnutrición leve y moderada (8).

Actualmente, E.U. lideriza las siembras, con alrededor de 200 Ha en producción, con rendimientos hasta de 3,000 kg/ha en Nebraska y consumido en cereales para el desayuno, productos multigrano y snacks. Es comercializado en supermercados, en secciones de alimentos para la salud o en pedidos directos de derivados (9). México marcha a la vanguardia en el procesamiento; la empresa San Miguel de Proyectos Agropecuarios elabora varios derivados industriales bajo la marca NUTRISOL y comercializa varios productos para el consumo de la población (3).

**Tabla 1.** Material recibido de la Universidad del Estado de Iowa, U.S.A.

No.	ACCESO	PAÍS FUENTE	NOMBRE DE LA PLANTA
<i>Amaranthus cruentus</i>			
1	Ames 2244	México	RRC 1027
2	Ames 2217	México	RRC 1012
3	Ames 2264	U.S.A., Pennsylvania	K 112
4	Ames 5189	México, Morelos	RRC 434
5	Ames 5656	México	RRC 1157
6	Ames 8272		K 277
7	Ames 15198	Argentina	RRC 1386
8	Ames 15673	U.S.A. , Illinois	A200D
9	PI 477913	México	RRC 1011
10	PI 477914	México	RRC 1041
<i>Amaranthus hypocondriacus</i>			
11	PI 481134	India	IC 42255-5
<i>Amaranthus cruentus</i>			
12	PI 511719	Guatemala	Niqua, Alegria
13	PI515959	U.S.A., Montana	Montana-3
14	PI 525498	U.S.A., Montana	Montana-5
15	PI 538319	U.S.A., Pennsylvania	K 266
16	PI 538320	U.S.A., Pennsylvania	K 283
17	PI 538321	U.S.A., Pennsylvania	K 436
<i>Amaranthus hybrid</i>			
18	PI 538322	U.S.A., Pennsylvania	K 343
19	PI 538323	U.S.A., Pennsylvania	K 432
20	PI 538326	U.S.A., Pennsylvania	D70-1

En Panamá, la Encuesta Nacional de Consumo de Alimentos, de 1992, demostró que el arroz es el alimento de mayor consumo y el que más contribuye a las calorías totales de la dieta, especialmente en el área urbana (6). Las proteínas, tanto del arroz, como de otros cereales, como el maíz y el trigo, carecen de algunos aminoácidos esenciales, tales como lisina, metionina y

triptófano, los que pueden ser suministrados por el amaranto (Anexo I).

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Material agronómico.

El material utilizado para las pruebas procede de la Estación Regional de Introducción de Plantas, de la Universidad Estatal de Iowa, remitido por el Dr. David Brenner. Se utilizaron 16 cultivares de *Amaranthus cruentus*, dos de *Amaranthus hybridus* y una de *Amaranthus hypocondriacus*. La descripción del material aparece en la Tabla 1.

### 2.2. Localización del terreno.

La siembra se realizó en los terrenos del Centro Experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Panamá, en Tocumen en condiciones de cero labranza, acondicionando el terreno para la siembra con herramientas manuales de cultivo, al igual que el resto de las labores de la parcela. El pH del terreno es de 6.7.

### 2.3. Procedimiento de siembra.

Se realizó una siembra en vivero en sustrato de aluvial mejorado en bolsas de polietileno, se sembraron 20 semillas por variedad, dos semillas de cada variedad en cada bolsa. Este paso se aprovechó para calcular el porcentaje de germinación de cada variedad. A la semana, se trasladaron las bolsas a umbráculo.

La siembra de las semillas en bolsa de polietileno se realizó el 25 de febrero de 1999 y a los veintitrés días de la siembra se realizó el trasplante a campo, tomando las mejores diez plantas de cada variedad y se sembraron dos en cada hoyo, con el fin de hacer el raleo y dejar cinco en cada hilera.

La siembra en campo se realizó en hileras, con una separación de 50 cm entre planta y 70 cm entre surcos, con la finalidad de permitir un desarrollo de las plantas libre de competencia. A las dos semanas se realizó la primera limpia para evitar competencia de la maleza. No hubo necesidad de una segunda debido a que las plantas alcanzan suficiente altura y las malezas no compiten con el amaranto.

A las tres semanas se realizó la ralea, eliminando

la planta más débil de cada plantón. A los 10 días después del trasplante, se aplicó fertilizante de la fórmula 10-30-10, a razón de 4 qq/ha.

Se midió el tiempo de emergencia de la panícula, el tiempo de la iniciación de la antesis y la altura de la planta del suelo al extremo de la panícula en el momento de la cosecha.

Fue necesaria la aplicación de aspersiones de insecticidas para el control de insectos chupadores y masticadores y además la aplicación de cebos para insectos cortadores.

La cosecha se realizó a los 70 y 90 días, para las variedades precoces y tardías, respectivamente. Las panículas se cortaron, se secaron en invernadero y se desgranaron, los restos de las inflorescencias se eliminaron por soplado.

Las semillas se pesaron y se dividió el peso total entre el número de plantas cosechadas para calcular el rendimiento por planta. Los resultados se reflejan en la Tabla 3.

No.	% de germinación	No. de cultivar	% de germinación
1	70	11	90
2	55	12	90
3	95	13	60
4	80	14	90
5	60	15	90
6	85	16	30
7	90	17	45
8	35	18	90
9	90	19	50
10	90	20	20

**Tabla 2.** Porcentaje de germinación de los 20 cultivares de *Amaranthus sp.*

## 3. RESULTADOS.

La mayoría del material recibido mostró altos porcentajes de germinación. Los resultados de las ruebas de germinación se aprecian en la Tabla 2.

Como se aprecia en la Tabla3, se observa una emergencia temprana de la panícula en los tres cultivares de *A.hybridus* y la de *A. hypocondriacus*, las panículas de *A.hypocondriacus* no tuvieron un desarrollo normal y no maduraron, mientras que las de *A.hybridus* fructificaron abundantemente, en

No	ESPECIE	GENOTIPO O CULTIVAR	PAÍS	EMERGENCIA DE LA PANÍCULA(días)	INICIACIÓN DE LA ANTESIS (días)	ALTURA EN LA COSECHA (cm)	RENDIMIENTO (g/planta)
1	A. cruentus	Ames 2244	México	83	95	190	2
2	A. cruentus	Ames 2277	México	69	80	180	13.5
3	A. cruentus	Ames 2264	E.U., Pennsylv	69	82	200	5
4	A. cruentus	Ames 5189	México, Morelos	67	80	240	10.5
5	A. cruentus	Ames 5656	México	78	90	250	3.8
6	A. cruentus	Ames 8272	E.U., Pennsylv	69	82	300	5.1
7	A. cruentus	Ames15198	Argentina	69	82	270	7.3
8	A. cruentus	Ames 15673	E.U. Ill.	69	82	220	9.9
9	A. cruentus	PI 477913	México	62	73	240	2.1
10	A. cruentus	PI 477914	México	71	84	210	0.6
11	A.hypocondriacus	PI 481134	India	40	55	60	--
12	A. cruentus	PI 511719	Guatemala	67	80	230	15.16
13	A. cruentus	PI 515959	E.U., Montana	67	77	230	6.25
14	A. cruentus	PI 525498	E.U., Montana	64	77	220	4
15	A. cruentus	PI 538319	E.U., Pennsylv.	66	78	240	4
16	A. cruentus	PI 538320	E.U.Pennsylv	61	71	190	1.3
17	A. cruentus	PI 538321	E.U., Pennsylv	61	71	220	14.7
18	A. hybrid	PI 538322	E.U., Pennsylv	40	56	100	14.6
19	A. hybrid	PI 538323	E.U., Pennsylv	34	46	60	14.7
20	A. hybrid	PI 538326	E.U., Pennsylv	20	46	100	--

**Tabla 3.** ENSAYO AGRONÓMICO DE *Amaranthus* sp.

Lugar: Facultad de Agronomía, Tocumen.

Fecha de siembra en vivero: 25 de Febrero de 1999

Fecha de trasplante a campo: 18 de Marzo de 1999

forma decumbente, la PI538326 tuvo buen rendimiento, pero no pudo medirse, pues sufrió caída de los granos por las lluvias repentinas.

Durante el período de crecimiento de las plantas en campo, no se observó presencia en el follaje de síntomas de algún tipo de enfermedad. Las plantas se desarrollaron libres de enfermedades durante todo del ciclo.

Las variedades con mayor desarrollo vegetativo, con alturas mayores de 240 cm, fueron las numeradas con 4, 5, 6, 9 y 15, correspondientes a *A. cruentus*. La de desarrollo medio, de más de 180 cm y menos de 240 cm, fueron las de números 1,2, 3, 8, 10, 12, 13, 14, 16 y 17 y las de menos de 180 cm son las números 11, 18, 19 y 20.

Las variedades de mayor rendimiento en grano son las correspondientes a los números 2, 10, 12, 7, 18 y 19. Esto coincide en parte con comunicación personal de D.Brenner, que

reporta la número 2 como de alto rendimiento, sin embargo, la PI481134 (número 11) calificada como de alto rendimiento, no tuvo buen desarrollo en nuestras condiciones.

Consideramos que la altura excesiva de algunas plantas es el producto del aprovechamiento de las condiciones ambientales por el amaranto por sembrarse fuera de época de cultivo.

Se espera investigar estos mismos materiales en meses que permitan la cosecha en época seca, con el objetivo de conseguir mejores rendimientos del grano y facilidades de cosecha.

#### 4. REFERENCIAS

1-Barrales, J.S.. 1992. Influencia de la distribución de la precipitación pluvial sobre el desarrollo del Amaranto. (*A. hypocondriacus* L.)

**Chapingo.** Año XVI. Num.77 Ene-Mar.1992

2-Gepts, P. The crop of the day: Amaranth  
(*Amaranthus spp.*)

INTERNET:

<http://agronomy.ucdavis.edu/gepts/pb143/crop/amaranth/amaranth.htm>

3-San Miguel de Proyectos Agropecuarios.

INTERNET:

<http://sac.org.org.mx/sanMiguel/sp/index.html>

4-Baltensperger, D.; Lyon, D.; Nelson, L.  
Amaranth Grain Production in Nebraska.

University of Nebraska Cooperative Extension

INTERNET:

<http://ianrwww.unl.edu/ianr/pubs/nebfacts/nf91-35>

5-Walton Feed, INC .Nutrition content of  
amaranth, buckwheat, millet, oats and quinoa.

INTERNET:

<http://www.lis.ab.ca/walton/self/ntr2.html>

6-MINSA/INCAP/OMS. 1992. Encuesta Nacional  
de Consumo de Alimentos.

7-Amaranth.

INTERNET:

<http://www.ars.grin.gov/ars/MidWest/Ames/crop/amaranth.htm>

8-Grey, S. y Leos, Martha . 1997. El amaranto en  
la disminución de la nutrición

Evaluación final, Servicios de Salud de Potosí  
Proyecto de Investigación Operativa. México.

9-Stallknecht, J. y Schulz-Schaeffer, J. 1993.

Amaranth rediscovered. New Crops. New

York. J.Janick and J.Simon (eds). p. 211-218

# ANALYSIS AND PREDICTION OF HEAT INDUCED DEFORMATION PRODUCED BY THE LINE HEATING PROCESS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Adán Vega Sáenz, Ph. D.  
Universidad Tecnológica de Panamá  
[adan.vega@utp.ac.pa](mailto:adan.vega@utp.ac.pa)

## ABSTRACT

To get an insight into the relationship between heating conditions and inherent deformation, the key to automate the plate forming by line heating, a series of experiments and/or numerical analyses is required. To replace costly experimental work, the finite element method (FEM), which is considered the most effective tool, is used in analysis. Two different analyses are required, namely heat conduction and thermal-elastic-plastic deformation analyses. In both of them a mesh model is need. In order to choose the most appropriate mesh model, the relationship between degree of freedom (DOF) and the computational time plays a key role. It is a fact that the usage of small element in the heating area increases the accuracy of the predictive model increasing the DOF. As is well known, a large number of DOF may result in an unrealistic computing time even if faster computer are used. Therefore, it is necessary to find the most appropriate mesh model that can be used to simulate different plate size under acceptable time.

In this paper, a study on the best practices for analysis and prediction of the inherent deformation produced by line heating is first given. Then to a procedure that can be used to select the most appropriate mesh model for analysis of the line heating process is presented. The discussion includes: the influence of the model size, the number of elements through the thickness and the size of the elements. The analysis also considers the case of multiple heating lines. Finally, recommendations about selection of mesh model are presented.

**Key words:** Line heating, Plate Forming, Meshing, Numerical Simulation, Finite Elements Methods.

## RESUMEN

Para comprender la relación entre las condiciones de calentamiento y las definiciones inherentes, que es la clave para automatizar el formado de placas mediante calentamiento en línea, se requiere una serie de análisis numéricos y/o experimentos. Para reemplazar costosos trabajos experimentales, el método de Elementos Finitos, el cual es considerado la herramienta más efectiva, es usado en análisis. Dos tipos de análisis diferentes son necesarios, conducción de calor y análisis de deformaciones termo-elásticas- plásticas. En ambos casos se necesita un modelo de malla. En la selección del modelo de malla más apropiado la relación entre el grado de libertad y el tiempo de computación juega un papel clave.

Es un hecho que el uso de elementos pequeños en la zona de calentamiento incrementa la exactitud del modelo predictivo, incrementando el número de grados de libertad. También como es sabido, el uso de un gran número de grados de libertad puede resultar en tiempos de ejecución no realistas aún con computadoras más rápidas. Por lo tanto hay que encontrar el modelo de malla más apropiado para simular diferentes tamaños de placas con tiempos de ejecución aceptables.

En este artículo, se presenta primero un estudio sobre las mejores prácticas para el análisis y predicción de las deformaciones inherentes producidas por el calentamiento en línea. Luego, un procedimiento para seleccionar un modelo de malla más apropiado para el análisis del proceso de calentamiento en línea es presentado. La discusión incluye: la influencia del tamaño del modelo, el número y el tamaño de los elementos a través del espesor. El análisis también considera el caso de múltiples líneas de calentamiento. Finalmente, la redomendaciones sobre la selección del tamaño del modelo son pesentadas.

**Palabras claves:** Calentamiento en línea, formado de placas, mallado, simulación numérica, Método de Elementos Finitos.

## 1. INTRODUCTION

Forming by line heating has been an active research topic in manufacturing, especially in shipbuilding. The problem of forming by line heating can be divided into two sub-problems: the heat transmission problem and the elasto-plastic deformation problem. The first problem has been widely studied and efficient techniques have been presented (Moshaiov and Latorre (1985), Tsuji and Okumura (1989), Terasaki, Kitamura and Nakai (1999), Chang, Liu, and Chang (2005), Ling and Atluri (2006), Liu (2006), Liu, Liu, and Hong (2007), Osawa, Hashimoto, Sawamura, Kikuchi, Deguchi, and Yamaura (2007)). The elasto-plastic deformation problem has been also widely studied. Theoretical researches on the mechanism of line heating process aimed to predict the final shape of a metal plate when given the heating

conditions and mechanical properties of the plate material exists (e.g. Moshaiov and Vorus (1987), Moshaiov and Shin (1991), Jang, Seo and Ko (1997), Kyrsanidi, Kermandis and Pantelakis (1999)). However, most of these investigations have focused on the deformation produced by single heating lines on small plates, no empirical method or inherent strain database has been developed for actual size plates and considering multiples heating lines.

The author has developed a practical and accurate method to predict deformation of actual size plates such as those used in shipbuilding, aerospace, cars, etc.. As a fundamental component of this method, a line heating inherent deformation database was created. This inherent deformation database besides being mainly dependent on primary factors such as the plate thickness, the heat source speed and the heat input, it also takes into account secondary factors such as the geometry of the plate, the cooling condition, the location of the heating line, multi-heating lines, heat-induced curvature, residual stresses and inter-heating temperature. Here, it is to be noted that the influences of these secondary factors are not so simple that they can be linearly related to primary factors. Also, it was difficult to obtain these influences by experiments because of the large scatter in test results. Therefore, to clarify the influence of these secondary factors on inherent deformation 3D thermal-elastic-plastic FEM was utilized.

In this report, a numerical study is performed to evaluate the influence of the finite elements mesh model on the accuracy of the results obtained through numerical analysis. First, a finite element analysis (FEA) is established. Then, through experiments of line heating and comparison with commercial software, the accuracy of this FEA is evaluated. After that, using the FEA previously developed, a series of computation are carried out to evaluate the influence of meshing on inherent deformation. Finally, through the analysis of the results, conclusions of the influence of meshing on inherent deformation of plates undergoing line heating are presented and

recommendations about mesh selection are given.

## 2. LINE HEATING PROCESS

When a plate is being thermo-mechanically formed, plastic deformations are produced by the thermal stresses generated during heating and subsequent cooling of the plate. During this process, one side of the plate is heated while the other side is kept cooler. The temperature gradient in the material across the thickness causes thermal strains that, in turn, cause the plate to bend downwards (convex heated surface). In the meantime, the expanding metal is constrained by the surrounding cooler metal, and compressive stresses result. As the yield stress decreases with heating, the heated metal yields and plastic compressive strains are produced. When the heat is removed, the plate cools down and the metal recovers its strength and contracts. The plate will then deform and assume an equilibrium state in the direction opposite to that when it was heated. That is bending upwards (concave heated surface). The curvature generated is mainly governed by the surface temperature and the temperature gradient between the top and bottom surfaces of the plate.

An ideal thermo-mechanical forming system would be able to heat a whole steel plate instantly with desired temperature gradients at all point of the plate. This system cannot be realized because of two reasons. First, it involves a very large heating pad that should be able to heat the whole plate at one time. Second, the heat flux distribution should be adjusted according to the desired temperature gradients at all points of the plate. This system is presently prohibited by economic and processing constraints. Instead, line heating forming processes using gas torch, induction heating or more recently laser heating have been widely used in various industries, such as shipbuilding, aerospace, and automotives. In these processes, basically, the principle is to apply a combination of heating lines in different direction until attaining the desired shape.

### 3. NUMERICAL ANALYSIS OF THE LINE HEATING PROCESS

In this section a brief resume of the main components of the numerical analysis is presented.

#### 3.1 Finite Element Software used in numerical simulation

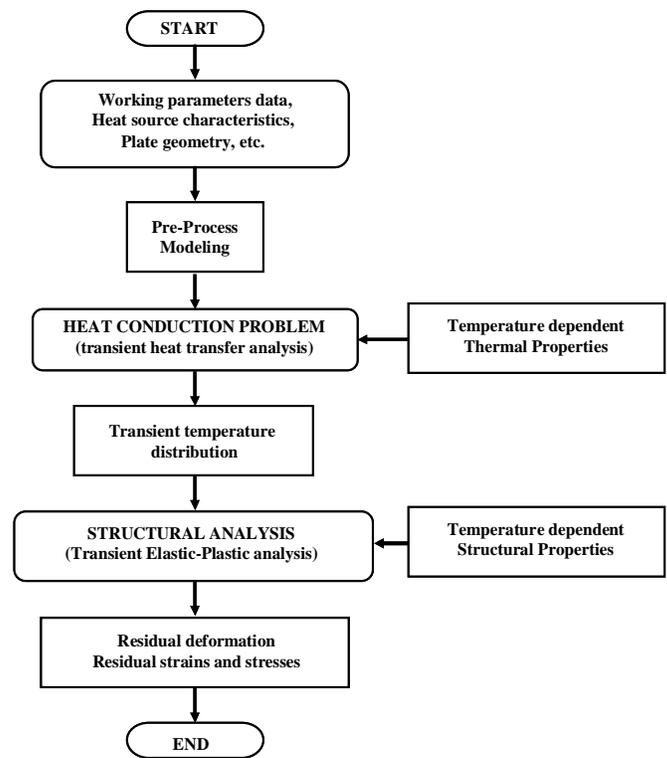
The process of plate forming by line heating is a coupled nonlinear thermo-mechanical process, which makes numerical modeling difficult. However, numerical simulation is a very effective alternative to experiments, and in case of line heating, computed results obtained through well-designed serial computations yield information that is otherwise unavailable. Although numerical simulation of line heating process such as FEM analysis has achieved considerable success in predicting plate deformation, the computational time is typically very long which makes FEM analysis not suitable for real-time analysis.

The thermo elastic-plastic analysis used in simulating the line heating process is similar to that of the welding process. The basic procedure followed in the analysis is outlined in the schematic diagram shown in Figure 1. The differences between welding and line heating are mostly due to the higher temperatures produced during welding. In addition, the welding processes includes other factors such as melting and solidification of the material, phenomena inexistent during plate forming by line heating. However, with the appropriate usage, the same FEM programs can be used for both analyses. In this paper a program based on the ISM method, which was developed in our laboratory [See Nishikawa et al.], is used to simulate plate.

#### 3.2 Thermal analysis

In thermal analysis by the FEM, an idealized heat source model is introduced. In this idealized heat source model the heat input is given to a hexagonal volume of dimensions 40 mm (length) x 80 mm (width) x  $h/4$  (depth). In all the studied cases, the highest temperature on the heated surface in the heating zone is kept at about 800 °C. Thermal boundary conditions are such that

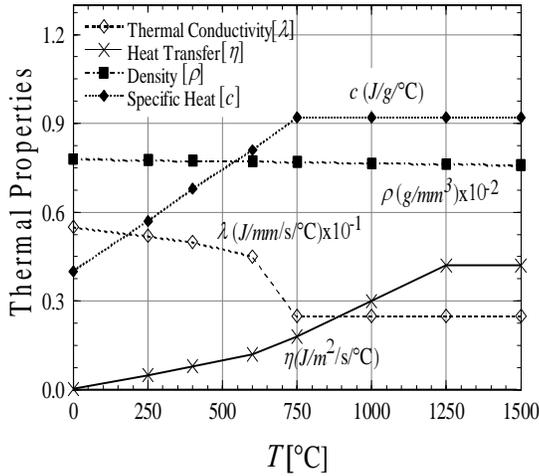
heat transfer by convection and radiation is permitted at the plate surfaces. Temperature dependent thermal properties of mild steel as shown in Fig. 2 are used in this research. Figure 3 shows a typical distribution of temperature along the heating line (a) and through the plate thickness (b) obtained for the simulation of a single heating line. A straight heating line applied from edge to edge along the center of the plate is analyzed. This heat source is assumed to move with a constant speed of 3 mm/sec. The net heat input is equal to 5 kJ/mm. As may be seen in Fig. 3 (b), only the region close to the heating surface is under high temperature (equal or close to 800 °C).



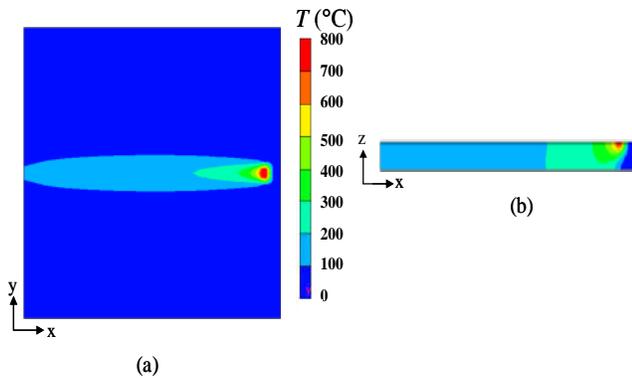
**Figure 1.** Schematic of the 3D thermo elastic-plastic analysis using FEM

#### 3.3 Mechanical Analysis

The transient temperature distribution obtained from the heat transfer analysis is employed as a thermal load in the subsequent mechanical analysis. Stresses, strains and displacements are then computed. Temperature dependent material properties of mild steel shown in Figure 4 are used in this research. Figure 5 shows a plate model with the mechanical boundary condition.



**Figure 2.** Temperature dependent thermal properties of Mild steel



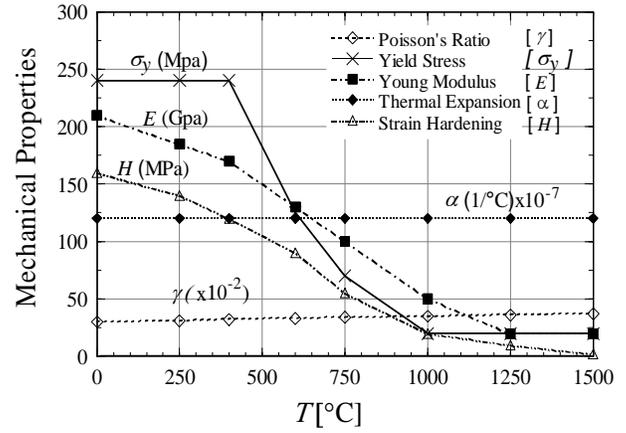
**Figure 3.** Typical temperature distributions (a) Along the heating, (b) Through the thickness

The same finite element model used in the thermal analysis is employed in mechanical analysis. Figure 6 shows the distribution of residual stresses along the heating line and through the plate thickness as typical example of the mechanical analysis.

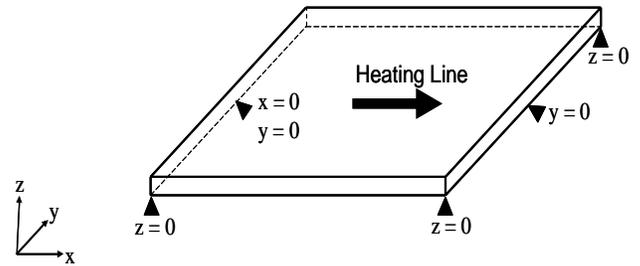
### 3.4 Representation of the results

In the case where a plate has a large length/thickness ratio, such as a ship hull plate, only two of the six components of inherent strain;  $\epsilon_x^*$  (in the line heating direction) and  $\epsilon_y^*$  (in the transverse direction) are dominant. Based on this assumption, plate deformation produced by line heating can be described by four deformation components as is shows in Figure 6.

These deformation components (inherent deformation) named as: inherent longitudinal



**Figure 4.** Temperature dependent mechanical properties of Mild steel



**Figure 5.** Typical mechanical boundary conditions

shrinkage ( $\delta_x^i$ ), inherent transverse shrinkage ( $\delta_y^i$ ), inherent longitudinal bending ( $\theta_x^i$ ) and inherent transverse bending ( $\theta_y^i$ ) are defined as the integration of inherent strain over the cross section normal to the heating line as follows;

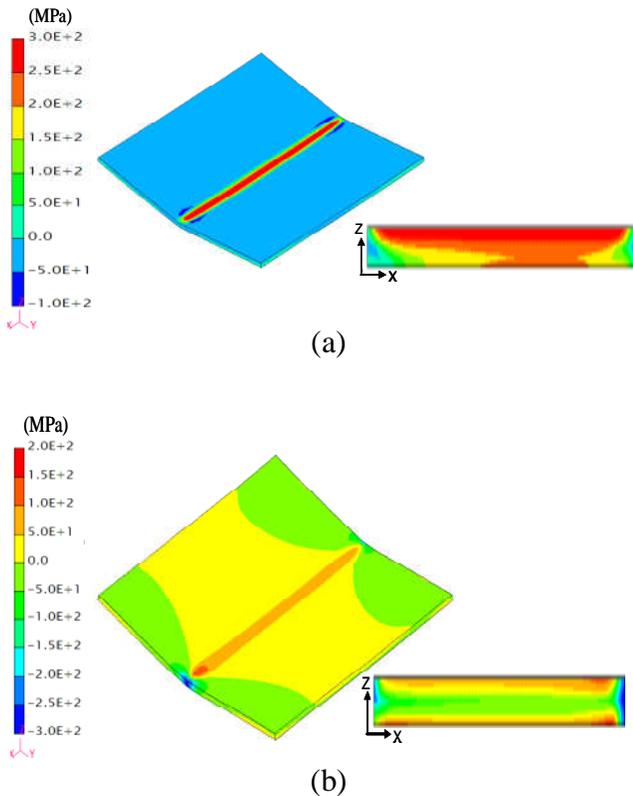
$$\delta_x^i = \int \epsilon_x^* dydz / h \tag{1}$$

$$\delta_y^i = \int \epsilon_y^* dydz / h \tag{2}$$

$$\theta_x^i = \int \epsilon_x^* (z - h/2) / (h^3 / 12) dydz \tag{3}$$

$$\theta_y^i = \int \epsilon_y^* (z - h/2) / (h^3 / 12) dydz \tag{4}$$

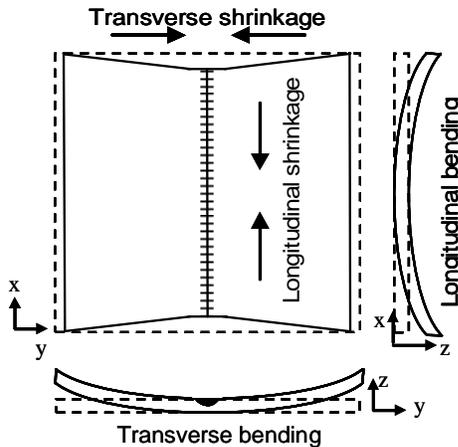
Where,  $x$  and  $y$  are the coordinates in the directions of the heating line and transverse to the heating line, respectively, and  $h$  is the thickness of the plate.



**Figure 5.** Typical distributions of residual stresses (a)  $\sigma_x$  and (b)  $\sigma_y$

### 3.5 Validation of the numerical results through Comparison with experiments of line heating and with commercial codes

In order to validate our numerical results two different studies were performed, first, comparison with line heating experiments were carried out, then comparison with commercial codes were performed. In this section a brief introduction to these comparisons is presented.



**Figure 6.** Types of line heating deformation

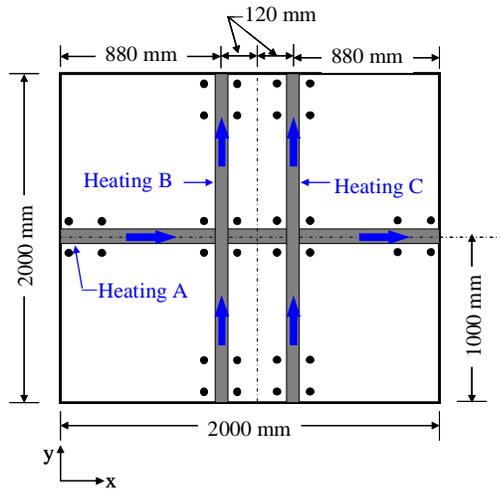
### 3.5.1 Comparison with line heating experiments

Experiments of multiple heating lines using the automatic induction heating system IHI- $\alpha$  (Tango et al.,) were performed aiming to corroborate the numerical results. Figure 7 shows the plate model used in the experiment. Where, three heating lines, named as heating A, B and C are applied. The heating sequence is as follows: B  $\rightarrow$  C  $\rightarrow$  A. During the experiment, before applying heat, the plate was cooled down to room temperature. In this way, the influences of parallel and crossed heating lines were evaluated for the same experiment avoiding influences of inter-heating temperature. The heating and cooling conditions, as well the geometry of the heating source, are the same for all the heating lines.

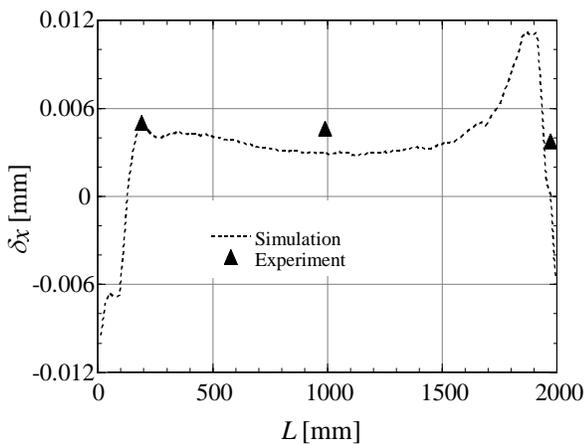
At the beginning, small holes were drilled at the point of measurements on the top and bottom surface. To evaluate the plate deformation, distances between these measuring points located along the heating line are measured before and after each heating. Shrinkage and bending produced by each heating line is subsequently evaluated. Figure 8 shows a comparison of the distribution of the longitudinal shrinkage obtained from experiments and that obtained by simulation of a straight heating line (Alone heating B, before applying heating C and A). Where, simulation results agree quite well with experimental results. Both, the longitudinal shrinkage and its variation along the heating line are well captured by the numerical model.

### Comparison with Commercial Codes

In order to validate our FEM results, the transient temperature field for TIG melt process was computed and the results were compared with those computed using different commercial FEM codes. Numerical analyses were conducted separately at the University Of Bristol (UOB), Rolls Royce plc (RR), Insa-Lyon / Areva energy (INSA/AREVA) and our research group (Joining and Welding Research Institute). The detail of the modeling was left to the discretion of the individual analysts. In all the cases, due to the symmetry of the plates and welds, half-plate models were used. Temperature dependent



**Figure 7.** Plate model used to estimate deformations produced by experiments of line heating



**Figure 8.** Comparison between results obtained from experiments and by simulation of multiple heating (Plotted along heating B)

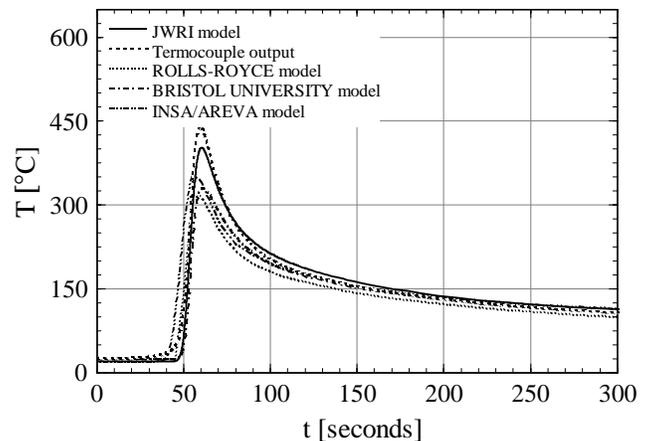
material properties of a 316L stainless steel were used by all the analysts. The analysis performed by the University of Bristol was using ABAQUS 6.61 while Rolls-Royce plc used CTSP-solid, which is part of the Virtual Fabrication Tool (VTF) software package and Insa-Lyon / Areva Energy used the Code-Aster finite element code.

The characteristics of the plate model, the welding conditions and the position of the measurement points are given in Table 1. The recorded thermocouple temperature is compared with those predicted by the thermal FE analysis. Figure 9 shows the comparison. A good agreement is observed among the temperatures

predicted by using the FEM employed in this research, others thermal models and experimental measurements. Similar tendency is observed in Figure 10 where the distribution of residual stress along the welding line is compared (See Lewis et al. for more details).

**Table 1.** Plate model and welding conditions used to validate the FEA

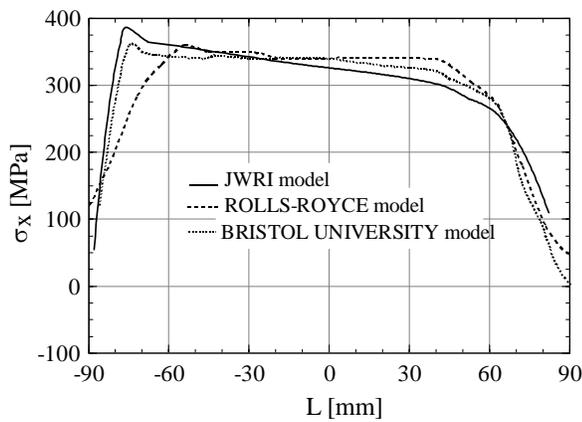
Arc Time	Current	Voltage	Travel rate	Heat Input ( $\eta = 100\%$ )
100 sec	156 A	12.4 V	108 mm/min	1.075 KJ/mm
Plate geometry		Material		Location of the thermocouples
Length = 180 mm Width = 130 mm Thickness = 20 mm		AISI Type 316L austenitic steel		T1 X = 90; Y = 53 mm; Z = 20 mm



**Figure 9.** Temperature histories (heated surface)

#### 4. Results and discussions

During forming by line heating, the heat source moves and only the area that is very near to the heat source undergoes high temperature and plastic deformation. The remaining area of the plate has small changes of temperature and small amount of stresses and no plastic strains. This implies that the FEA can be done by using dense mesh only in these areas, while in the remaining area, sparse meshes can be used. In this way, the computational time is greatly reduced. However, when the plate to be analyzed is large, computational time greatly increases limiting the computation using available commercial codes



**Figure 10.** Residual stress distribution (Top surface)

even in a modern strong computer environment. In addition, in analyzing the line heating process, many influential factors need to be taken into account. In real forming practice, plate size and the final shape vary from case to case. The variation of geometrical shapes of plate to be formed can be infinite. Therefore, to deal with forming of specific shapes is ineffective from the engineering point of view. In addition, it is well known that usage of small plates does not yield accurate predictions of plate deformation due to line heating (Vega et al, 2008). On the other hand, usage of large models requires large computational time. Aiming to find the most appropriate FEM model to be used, we studied the influence of meshing on computed plate deformation. A resume of the result of these studies is presented in this section.

#### 4.1 Influence of the model size on inherent deformation

Various investigations of the effect of plate size (size effect) on heat-induced deformation have been presented. Most of them have focused on the effect of plate thickness and no research can be found that has considered plates larger than one (1) meter. In this section, the influence of plate size, including variation of plate length and plate width on inherent deformation is investigated.

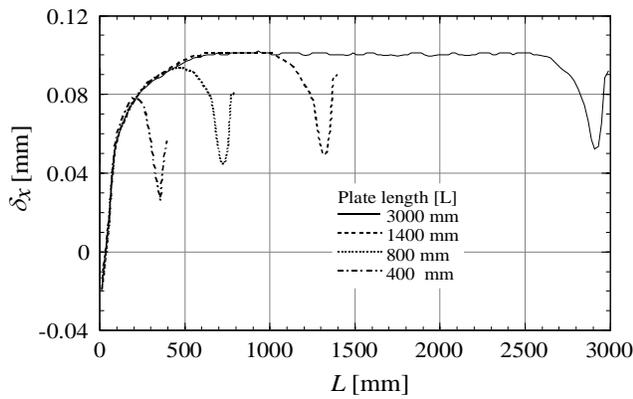
Figure 11 shows the variation of longitudinal shrinkage with plate length while plate width and thickness are kept constant. Heat input and speed

of the heat source are also kept constant in all cases. It may be seen that, maximum inherent longitudinal shrinkage in small plates changes with plate length. However, for plates larger than approximately 800 mm, maximum inherent longitudinal shrinkage is almost the same.

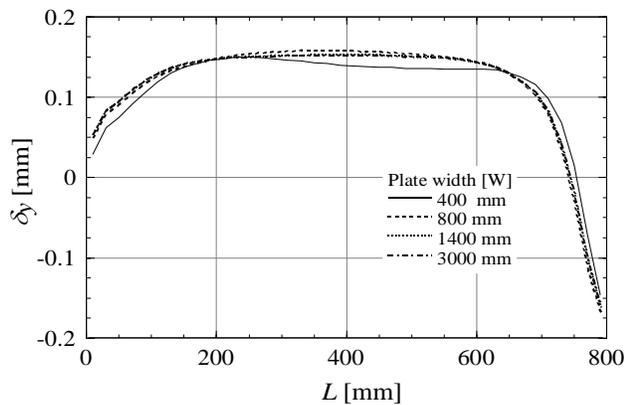
As may be observed in Figure 11, the distribution of longitudinal shrinkage for large plates is mostly uniform at the central region of the plate while toward the edges of the plate is not. This suggests that if small plates model are used (600 mm for example) the results will be underestimated. It is also observed that the region at the plate edges with complex distribution of residual stress extends more or less 400 mm toward the plate center. Thus, it is necessary to use plate models larger than 800 mm to avoid the underestimation of inherent deformation.

Figure 12 shows the variation of transverse shrinkage with plate width while plate length and thickness are kept constant. It may be observed that in the case of narrow plates (400 mm), there is a small reduction of the maximum inherent transverse shrinkage compared with that obtained in wide plates. From this figure, it may be seen that only in narrow plates, an appreciable variation of inherent deformation is observed. Similar behavior is seen after analyzing the variation of other components of inherent deformation.

Despite the fact that inherent deformation is influenced by plate size, as is demonstrated, this influence is only observed in small plates. For large plates, the inherent deformation at the central region of the plate does not significantly depend on plate size. It is also important to note that the distribution of inherent deformation at the beginning of the heating line (entrance edge) does not vary with plate size. Similar tendency is observed at the end of the heating line (exit edge). The variation of inherent deformation at both plate edges is well known as edge effect and it has been clarified by the author (See Vega, 2009).



**Figure 11.** Variation of longitudinal shrinkage with plate length



**Figure 12.** Variation of transverse shrinkage with plate width

From the results of these two analysis it is clearly observed that the size of the plate model play a key role in predicting inherent deformation. Thus, contrary to most of the existing studies, in simulating the line heating process, such small model may not be used. Instead, model larger than 800 mm are recommended.

#### 4.2 Influence of element size on prediction of inherent deformation

To obtain accurate prediction of the deformation, the distribution of temperature at the heating area obtained by FEM need to be similar to that of the heating source. In order to attain the most accurate temperature distribution, the element size in the heating area needs to be as small as

possible. However, small elements increase the DOF and therefore the computational time.

Aiming to investigate the influence of element size on prediction of inherent deformation, we evaluate four (4) different mesh densities as shown in Table 2. In all the cases the plate size, the heating and the cooling condition are the same. The heat input is introduced in an area of 80 mm width, 40 mm of length and 10 mm thick from the plate surface. The characteristics of each mesh model are shown in the table.

Figure 13 shows the comparison of longitudinal and transverse shrinkage obtained by each case. As it may be observed, the usage of element sizes equal to 20 x 20 x 10 mm underestimates the inherent deformation in about 15% compared with that of an element size equal to 5 x 5 x 2.5 mm.

**Table 2** Models used to study the influence of element size on prediction of inherent deformation

Model No.	Elements Size (mm)	Degree of Freedom	Computational Time (Seconds)	
			Thermal Analyses	Mechanical Analyses
Model 1	20x20x10	$2.7 \times 10^4$	420.3	456
Model 2	10x10x10	$6.5 \times 10^4$	958	739.7
Model 3	5x5x5	$5 \times 10^5$	13159.1	8588.4
Model 4	5x5x2.5	$6.1 \times 10^5$	42722.7	11283.6

Although the inherent deformation is underestimated when large elements are used, the computational time in case of using element of size 5x5x2.5 mm is about sixty (60) times larger than that of 20x20x10 mm. Based on the results we can concluded that even when we lost certain degree of accuracy using large element sizes, this lost is insignificant when we compare the time we save in computing each model. Very much important when we think about thousands of analysis, the number needed in order to create an automatic line heating system.

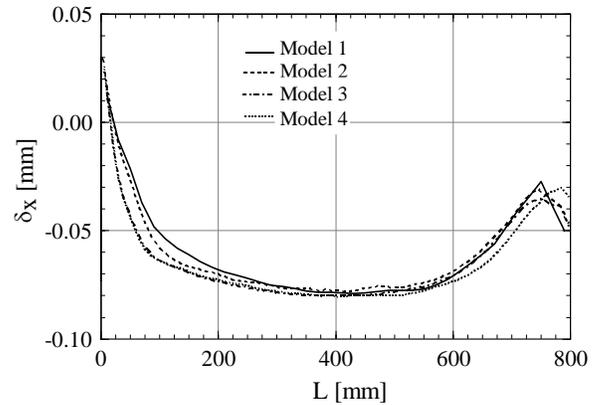
### 4.3 Influence of number of elements through the plate thickness

To acquire a better comprehension of the influence of the number of element through the plate thickness on inherent deformation we compare the inherent deformation caused by three cases shown in Fig. 14. In Model 1, the heat input is introduced in the first element from the heating surface. In Model 2, which has the same element size of Model 1, the same amount of heat input is introduced in the first two elements. Finally, in Model 3, the same heat input is introduced in the first element with the difference that in this model there are only four elements in the thickness direction.

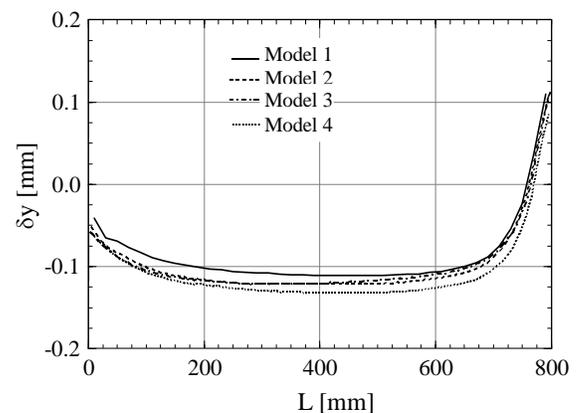
Figure 15 compares the transverse shrinkage obtained after simulating a partial line heating. As it may be observed, the results of Model 1 and Model 2 are mostly similar while the Model 3 is slightly smaller. However, this difference is small and can be neglected. In addition since the computational time in Model 3 is about 10 times less than in Model 1 and Model 2, it allows us to build a more complete inherent deformation database in a short time sacrificing certain percentage of accuracy. Here is important to mention that in case of 3D thermo elastic-plastic analysis by FEM, the usage of less than four elements through the plate thickness is not a good practice since the bending components of inherent deformation will not be accurately predicted.

### 4.4 Effective mesh models for computing the line heating process

In order to select the FE mesh model two situations need to be considered; first is when predicting inherent deformation produced by a single heating line and second is when predicting that produced by multiple heating lines. In the first case, FE analysis can be performed using a mesh model with sparse node distribution far from the heating area. However, in the case of analyzing multiple heating lines, the possible options of meshing are limited. An example of a mesh model for multiple heating lines is shown in Figure16.

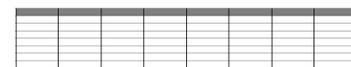


(a)

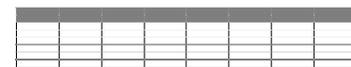


(b)

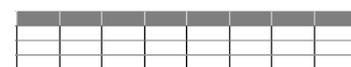
**Figure 13.** Influence of element size on (a) Longitudinal shrinkage, (b) Transverse shrinkage



(a) Model 1



(a) Model 2



(c) Model 3

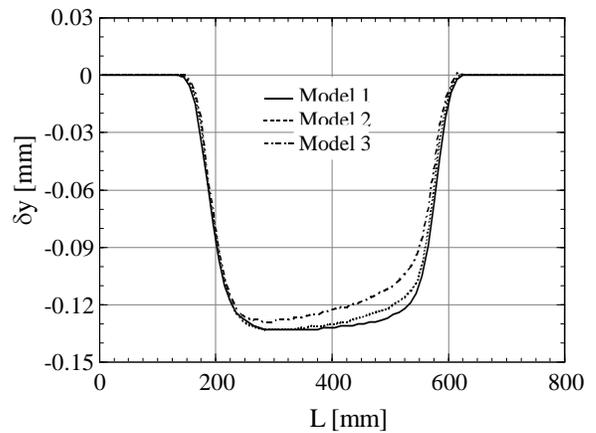
**Figure 14.** Models used to study the influence of number of elements through the plate thickness on inherent deformation

As it may be seen from the figure, if an additional heating line is applied, a new mesh is needed. So, the number of degree of freedom will be increased and therefore the computational time. Although small elements in the heating area are necessary to attain high accuracy in prediction of inherent deformation (as it is demonstrated before), it also increases the number of degrees of freedom and consequently the computational time. In addition, it is necessary to study the influence of multiples heating lines such as parallel and crossed on inherent deformation. Thus, flexible mesh models which can be used for multiples heating lines are needed.

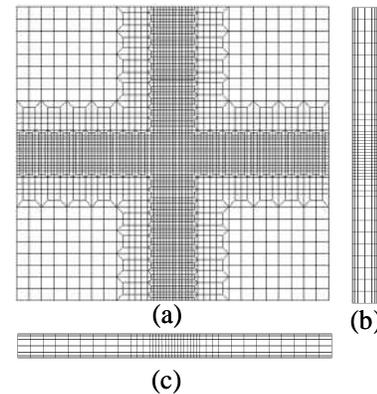
**Table 3.** Characteristics of the models used to study the influence of number of elements through the thickness on prediction of inherent deformation

Model No.	Elements Size (mm)	Degree of Freedom	Computational Time (Seconds)	
			Thermal Analyses	Mechanical Analyses
<b>Model 1</b>	20x20x10	$2.7 \times 10^4$	420.3	456
<b>Model 2</b>	10x10x10	$6.5 \times 10^4$	958	739.7
<b>Model 3</b>	5x5x5	$5 \times 10^5$	13159.1	8588.4

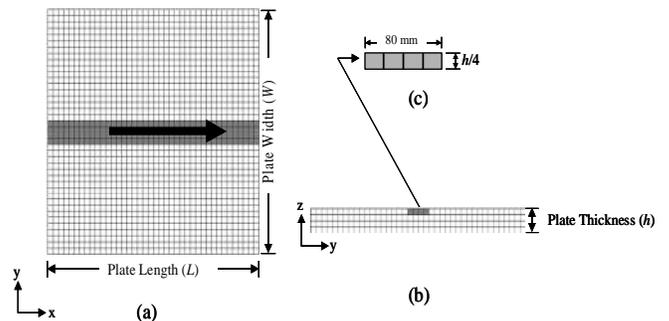
To overcome this situation, and base in numerical and experimental results, we propose the usage of meshes model with uniform distribution of elements trough the plate length, width and thickness, as shown in Figure 17. This type of mesh model can be use without limitation to study any kind of 3D thermal elastic-plastic process including line heating. The only restriction will be the size of the source. In case of line heating, it usually varies from 60 to 100 mm, thus the usage of element size such as 20mm x 20mm x (a quarter of the thickness) is good enough to acquire high enough precision of inherent deformation predicted by FEM.



**Figure 15.** Influence of number of element through the plate thickness on transverse shrinkage



**Figure 16.** Example of mesh model needed in case of simulating crosses heating lines (a) Top surface, (b) along the heating line and (c) Transverse to the heating line



**Figure 17.** Typical mesh model used in simulating the line heating process, (a) Top surface, (b) Mesh distribution through the plate thickness, (c) Area of heating.

## CONCLUSIONS

From the analysis of the results of this numerical study we can draw the following conclusions:

- 1- Based on the results of comparing our code with other codes and with experiments, we can conclude that the FEA established in this paper is appropriate to study the 3D thermal-elastic-plastic mechanism of the line heating process.
- 2- It has been demonstrated that in simulating the line heating process, the usage of plate model smaller than 800 mm underestimate the inherent deformation.
- 3- After examining different combination of element sizes and number of element through the plate thickness we can conclude that the usage of an element of size equal to 20 mm large x 20 mm width x one quarter of the plate thickness is appropriate for predicting the inherent deformation in reasonable time without losing appreciable accuracy.
- 4- In simulating multiples heating lines it is necessary to use mesh model with uniform distribution of elements in the heating direction, in the transverse direction and through the plate thickness.

## ACKNOWLEDGMENTS

**Financial support from New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) through the Japan Space Utilization Promotion Center (JSUP) in the program of Ministry of Economy, Trade and Industry is gratefully acknowledged.**

## REFERENCES

1. **Chang, C.W.; Liu, C.S. and Chang, J.R.** (2005): A Group Preserving Scheme for Inverse Heat Conduction Problems. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 10, 1, pp.13-38.
2. **Jang, C. D.; Seo, S.; Ko. D. E.** (1997): A study on the prediction of deformations of plates due to line heating using a simplified thermal elasto-plastic analysis. *Journal of Ship Production*, 13(1):22-27.
3. **Kyrsanidi, A. K.; Kermanidis, T. B.; Pantelakis S. G.** (1999): Numerical and experimental investigation of the laser forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 87:281-290.
4. **Lewis, S. J., Alizadeh, H., Gill, C., Vega, A., Murakawa, H., El-Ahmar, W., Gilles, P., Smith, D. J., Truman, C. E.**: Modeling and measurement of residual stresses in autogenously welded stainless steel plates: Part 1 – *Fabrication and modeling*, 2009
5. **Ling, X. and Atluri, S.N.** (2006): Stability Analysis for Inverse Heat Conduction Problems. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 13, 3, pp.219-228.
6. **Liu, C.S.** (2006): An Efficient Simultaneous Estimation of Temperature-Dependent Thermophysical Properties. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 14, 2, pp.77-90.
7. **Liu, C.S.; Liu L.W. and Hong, H.K.** (2007): Highly Accurate Computation of Spatial-Dependent Heat Conductivity and Heat Capacity in Inverse Thermal Problem. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 17, 1, pp.1-18.
8. **Moshaiov, A. and Latorre, R.** (1985): Temperature Distribution during Plate Bending by Torch Flame Heating. *Journal of Ship Research*, 29, 1, pp.1-11.
9. **Moshaiov A.; Shin, J. G.** (1991): Modified strip model for analyzing the line heating method-part 2: Thermo-elastic-plastic plates. *Journal of Ship Research*, 35(3):266-275.
10. **Moshaiov A.; Vorus, W. S.** (1987): The Mechanics of the Flame Bending Process: Theory and Applications. *Journal of Ship Research*, 31(4):269-281.
11. **Nishikawa, H.; Serizawa, H.; Murakawa, H.** (2005): Development of a Large-scale FEM for Analysis Mechanical Problems in Welding, *Journal of the Japan Society of Naval Architects*, 2, pp.379.
12. **Osawa, N.; Hashimoto, K.; Sawamura, J.; Kikuchi, J.; Deguchi, Y. and Yamaura, T.** (2007): Development of Heat Input Estimation Technique for Simulation of Shell Forming by Line-Heating. *CMES:*

*Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 20, 1, pp.45-53.

13. **Tango, Y, Ishiyama, M, Nagahara, S, Nagashima, T, and Kobayashi, J**, (2003). "Automated Line Heating for Plate Forming by IHI-ALPHA System and its Application to Construction of Actual Vessels-System Outline and Application Record to date," *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. Vol. 193. pp. 85-95.
14. **Terasaki, T.; Kitamura, N. and Nakai, M.** (1999): Predictive Equation for Thermal Cycle Generated by Line Heating Method. *Trans. The West-Japan Soc. Naval Architects*, 99, pp.321-329 (in Japanese).
15. **Tsuji, I. and Okumura Y.** (1988): A Study on Line Heating Process for Plate Bending of Ship Steels. *Trans. The West-Japan Soc. Naval Architects*, 76, pp.149-160 (in Japanese).
16. **Vega, A., Rashed, S., Tango, Y., Ishiyama, M., Murakawa, H.**: Analysis and prediction of multi-heating lines effect on plate forming by line heating. *CMES Journal: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, *CMES*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-14, 2008
17. **Vega, A.**: Development of Inherent Deformation Database for Automatic Forming of Thick Steel Plates by Line Heating Considering Complex Heating Patterns. Doctoral Thesis. Osaka University, Japan, 2009.

Esta revista se terminó de imprimir en  
la Imprenta de la  
Universidad Tecnológica de Panamá  
bajo la administración de la  
Ing. Marcela Paredes de Vásquez