

# CENTRO DE MODELAMIENTO MATEMÁTICO

## 1. Caracterización y status institucional del CMM

### 1.1 Historia

El CMM es una unidad creada en 2000 como dependencia del Departamento de Ingeniería Matemática (DIM) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (UCH). En su creación participaron además CONICYT y el CNRS de Francia, instituciones que hasta hoy apoyan su quehacer de manera significativa.

El DIM tiene una trayectoria de 25 años en la investigación en el área de las matemáticas aplicadas. Desde inicios de los '90 algunos profesores del DIM venían realizando trabajos de aplicación en los sectores forestal y minero, con la ayuda de fondos gubernamentales para el fomento de la investigación aplicada y el desarrollo de innovaciones productivas. La consolidación de estas actividades dispersas en un Centro fue posible gracias a un *grant* de CONICYT, del programa de Fondo de Apoyo a Áreas Prioritarias (FONDAP), que desde 1997 ha aportado un millón de dólares anuales para financiar infraestructura, equipamiento, recursos bibliográficos, investigación, viajes internacionales, y becas de postdoctorado para traer matemáticos extranjeros al Centro. De hecho, el CMM fue creado con la primera renovación del FONDAP, en 2000, la que fue precedida de una positiva evaluación por CONICYT de los resultados obtenidos a la fecha.

Si bien el financiamiento del FONDAP no está dirigido a fomentar las aplicaciones, sino ciencia básica, el trabajo orientado a las aplicaciones de la matemática a la solución de problemas productivos se intensificó con la creación del Centro, cuya misión esencial es “crear nueva matemática, modelar y resolver problemas complejos de la industria y de otras disciplinas científicas, y reforzar la sinergia entre estas actividades”.

### 1.2. Estructura y organización

El CMM no tiene personalidad jurídica propia, sino que actúa a través de las autoridades de la Facultad y la universidad. No tiene personal propio permanente, salvo el Director, ya que los 20 investigadores asociados al Centro son profesores contratados por el DIM. A ellos se suman seis profesores de la Universidad de Concepción. Prácticamente todos los académicos del DIM participan en las actividades del CMM, en mayor o menor medida. El personal asociado al CMM se completa con unos 40 ingenieros y otros profesionales contratados temporalmente sobre la base de proyectos. El CMM administra sus recursos con total independencia de la Facultad, pero no tiene la potestad de contratar a largo plazo personal académico o profesional. Esta limitación no ha sido grave hasta ahora, pero puede convertirse en un problema para el crecimiento futuro del CMM, porque el Departamento sólo contrata en forma permanente si la nueva plaza es necesaria para la docencia, pero no si es necesaria para la investigación, toda vez que ésta no asegura flujos permanentes de dinero. Dado que sólo el departamento puede contratar a largo plazo, el CMM mantiene a su staff de ingenieros a través de contratos de plazo fijo, y esto perjudica la retención de profesionales altamente calificados que desean mayor estabilidad.

La Dirección del Centro sigue los lineamientos establecidos por CONICYT para los programas FONDAF, y está a cargo de un profesor *senior*, designado por CONICYT a propuesta del Rector de la UCH. Además existe un Comité Académico formado por el Director, cuatro investigadores del CMM, y el Director del DIM. El Comité se reúne 2 ó 3 veces al mes y en él se toman todas las decisiones administrativas y de gestión del CMM. La renovación de los miembros del Comité depende del propio Comité.

Además, se realizan reuniones plenarias con todo el staff académico cuando ello es necesario, lo que suele suceder dos o tres veces por año, pero sin una periodicidad y una orgánica definida.

Los investigadores asociados al CMM se organizan sueltamente en una especie de matriz por área de la matemática—ecuaciones diferenciales, matemática discreta, mecánica matemática, optimización y equilibrio, modelamiento estocástico, y análisis numérico (en Concepción)—y también por sector industrial: forestal, minería, transporte, energía, telecomunicaciones y educación.

La organización es muy horizontal y el liderazgo está repartido entre una docena de investigadores que encabezan proyectos o gozan de la más alta reputación científica. Los proyectos de investigación aplicada convocan, además de a los miembros del CMM, a profesores de otros departamentos de la facultad (por ejemplo, Física, y las Ingenierías Eléctrica, de Transporte, de Minas e Industrial).

### 1.3. Financiamiento

El presupuesto anual del CMM es de un poco más de 3 millones de dólares. FONDAF aporta 1 millón, otro millón son los sueldos de los académicos y funcionarios del DIM, y algo más de 1 millón ingresa por proyectos de investigación y de asistencia técnica a empresas y al gobierno. El Director del CMM estima que en unos dos años el presupuesto podría llegar a 4 millones, con un 50% de este monto aportado por proyectos de investigación y asistencia técnica.

La estructura de *overheads* para los proyectos de asistencia técnica es de 10% para el CMM, y 10% para la Facultad, y 2% para la Universidad.

## 2. Productividad académica

En el periodo de cinco años que va desde inicios de 2000 a comienzos de 2005, los investigadores asociados al CMM, más los profesores invitados, los investigadores postdoctorales y los estudiantes del Doctorado en Modelamiento Matemático produjeron 340 artículos científicos de corriente principal, con una media de dos artículos per cápita por año.

El programa de doctorado tiene 36 estudiantes actualmente, y ha graduado a 15 doctores, más 7 en el programa de Doctorado en Matemáticas Aplicadas de la U. de Concepción. Un tercio de los alumnos del doctorado de la UCH son extranjeros. El Doctorado en Modelamiento Matemático tiene un acuerdo de co-tutela y doble titulación con Francia.

El CMM, además, es una unidad mixta (UMR) del CNRS francés, lo que ubica al Centro en pie de igualdad con otros centros CNRS instalados en universidades francesas. Como consecuencia, permanentemente hay investigadores franceses en visita, a razón de unos dos o tres por año. El status de unidad mixta permite también al CMM

optar a financiamiento europeo para proyectos, y acceso a fuentes bibliográficas vía CNRS. El CNRS valora al CMM como un marco eficaz para las múltiples colaboraciones científicas entre investigadores chilenos y franceses en las áreas que el Centro abarca, así como el hecho que el CMM esté inserto en una Escuela de Ingeniería, y la capacidad del CMM de “hacer ciencia en un ambiente económico liberal”, según me señaló un investigador del CMM.

Aunque los recursos FONDAP son la principal fuente de financiamiento para investigación básica con que cuenta el Centro, sus investigadores participan también en otros programas a través de los cuales el gobierno financia a grupos de excelencia en investigación, además de las fuentes competitivas regulares para ciencia básica y aplicada.

### **3. Relaciones con empresas**

#### **3.1 Origen de los proyectos**

Entre 2000 y 2005 el CMM ha ejecutado 14 proyectos de modelamiento en sectores económicos de importancia estratégica para el país (identificados arriba). En los primeros años después de la fundación del CMM la estrategia fue organizar desayunos y almuerzos con gerentes de planificación u operación de las empresas y organizaciones gubernamentales que enfrentaban problemas que, a juicio de los investigadores del CMM, podían analizarse a través del modelamiento. Las ideas sobre problemas provenían de las experiencias de apoyo a las empresas de colegas extranjeros, que los investigadores del CMM recogían en sus viajes.

En la actualidad, el prestigio del CMM atrae a los potenciales clientes sin necesidad de estas actividades informativas. De hecho, se reciben más solicitudes de proyectos que los que el CMM puede abordar. Las vías de ingreso de solicitudes de proyecto son el Director, quien entonces convoca a los investigadores que podrían trabajar en él a una reunión con la empresa, o los propios investigadores, respecto de empresas con las cuales ya se tiene una relación.

Para seleccionar proyectos, el Centro ha fijado las siguientes condiciones:

- a) El problema no debe haber sido resuelto en ninguna parte del mundo y tiene que ofrecer al menos la posibilidad de que su solución necesite el desarrollo de nueva matemática.
- b) El plazo debe ser de al menos un año.
- c) Que involucre a más de un investigador, para crear mayores oportunidades de intercambio.
- d) Que permita un componente de formación de estudiantes.

Estas condiciones propenden a separar al CMM del mercado de las consultoras, porque ponen una vara muy alta que excluye los proyectos repetitivos y de corto plazo típicos de las consultoras. El principio es que si el problema puede ser resuelto por una consultora, entonces el CMM no lo toma. En general las consultoras son más rápidas y baratas que el CMM, de modo que las empresas no tienen incentivos para preferir al CMM en problemas sencillos. Parte de la demora del CMM radica en que sus investigadores no necesariamente son expertos en la industria en particular que requiere asistencia, y entonces debe haber un tiempo de aprendizaje al inicio.

Para cada proyecto hay equipos de 3 ó 4 investigadores del CMM, uno de los cuales hace de líder. Este equipo de proyecto interactúa con el grupo técnico de la empresa, con reuniones típicamente cada 15 días. En la mayoría de los proyectos se

trabaja en dependencias del CMM. Ocasionalmente el proyecto se ejecuta en las instalaciones de la empresa.

### 3.2 Ejemplos de colaboración

- *Laboratorio de bioinformática y matemática del genoma*: CMM es el laboratorio de contraparte para el modelamiento y tratamiento de la información genómica de las bacterias que se usan para el proceso de biolixiviación de cobre. El cliente es Biosigma, una empresa creada por la cuprífera estatal chilena Codelco y por la japonesa Nippon Mining. La biolixiviación permite explotar roca de muy baja ley, que se irriga con ácido sulfúrico y bacterias que generan una reacción que percola un líquido que contiene cobre puro, a un costo por libra de cobre fino que es la mitad del que se obtiene en el proceso que usa la fragmentación de rocas. La biolixiviación ya se emplea en la producción de cobre, pero no se entiende bien cómo funciona nivel químico y biológico, y por lo tanto no se puede controlar u optimizar.

El laboratorio trata la información genética de las bacterias, ensamblando genoma. Ensamblar genoma es un problema de teoría de grafos sofisticado para el cual hay algunas soluciones comerciales, pero no son suficientes, de modo que el laboratorio ha discurrido nuevos métodos de ensamblaje en tiempo razonable. Luego debe anotarse el genoma, lo que también es un problema matemático, y buscar las redes de interacción interna entre genomas. Las comunidades de bacterias deben estar presentes en determinadas proporciones para hacer su trabajo minero, lo cual condujo al desarrollo de un chip de bioidentificación de comunidades in situ.

Este proyecto, iniciado en 2003, es ahora uno de los proyectos de biotecnología más grandes de Chile, y ha permitido a los investigadores que participan en él focalizar un interés que traían de antes en integrar matemática y genómica. En palabras de uno de ellos “las aplicaciones en abstracto no me motivan”. El proyecto, financiado íntegramente por el cliente, ha generado ya cinco solicitudes de patente.

- *Arquitectura de pinos*: en 1985 llegó a Chile la plaga polilla del brote, que ataca a los pinos, produciendo deformaciones de crecimiento cuando la larva se instala en el ápice de un pino joven (2 a 3 mts. de altura). El árbol deformado pierde valor económico. En 1991 la empresa Forestal Arauco pidió al DIM estimar la propagación de la plaga por el territorio de Chile, lo que condujo a un software de simulación sobre evolución de la plaga, que consideraba también los efectos de las medidas de control. En un segundo proyecto se estudiaron y valoraron económicamente las transformaciones, lo cual permite a los técnicos en las épocas de raleo decidir si mantener o sacar árboles deformados. Estos proyectos dieron lugar a dos artículos en revistas científicas internacionales, una patente, y un manual para la industria.

### 3.3. Justificación de las relaciones con el sector externo y beneficios que se obtienen de ello

El trabajo con las empresas y el gobierno se justifica en el CMM por las siguientes consideraciones: a) la Ingeniería Matemática se caracteriza por buscar aplicaciones de la matemática a problemas productivos, b) la misión de la UCH es

servir al país, lo cual en este caso se hace sirviendo al desarrollo de sectores estratégicos de la economía nacional y a las necesidades del gobierno, c) el trabajo práctico hace surgir problemas académicamente interesantes que de otro modo no aparecerían, d) el trabajo con el sector externo tiene un valor formativo para los estudiantes.

Entre los beneficios asociados al CMM se citan a) el aumento de interés por la especialidad de Ingeniería Matemática entre los alumnos de Ingeniería: en 2000 sólo 15 estudiantes tomaban la especialidad; hoy el número es de 45, b) más de la mitad de los egresados de la especialidad hacen doctorados y regresan a incorporarse al plantel académico de otras universidades del país, lo cual ubica al CMM como difusor de talento y de un enfoque sobre la matemática en todo el país, c) con frecuencia los ingenieros del CMM parten a trabajar en las empresas después de haber tenido una buena formación en el Centro, lo cual enriquece la capacidad técnica de las empresas.

### *3.4. Lecciones aprendidas en el trabajo con empresas*

- La calidad técnica de la contraparte en la empresa es muy importante. El CMM suele trabajar con grandes empresas en sectores industriales económicamente muy relevantes, o con agencias técnicas de gobierno (como la Subsecretaría de Telecomunicaciones) que cuentan con ingenieros de alta capacidad. Una contraparte sofisticada ayuda a minimizar el problema de lenguaje que suele producirse entre las dos partes, que dificulta entender cuál es el problema.
- Es importante que la iniciativa para resolver un problema venga de la empresa, no de los académicos, para que la empresa esté verdaderamente interesada y comprometida. Este interés real se expresa en financiamiento real del proyecto.
- La principal dificultad para trabajar con las empresas es el tiempo: ellas generalmente quieren soluciones rápidas, mientras que la universidad tiende a querer estudiar bien el problema y a buscar la mejor solución, lo cual toma más tiempo.
- Los proyectos aplicados suelen generar conocimiento publicable en revistas académicas

## **4. Factores que potencian las relaciones con empresas**

### *4.1. Factores Internos*

La realización de proyectos con empresas trae aparejado un complemento al salario de los investigadores, que tiene como límite el que el sueldo total no puede superar el sueldo del decano de la facultad. Esta regla se aplica a toda la facultad, y no sólo al CMM, pero hay excepciones. En la práctica, no es infrecuente que los profesores dupliquen su salario por la vía de proyectos. Los honorarios de cada proyecto se discuten entre el director y el jefe de proyecto, pero usualmente hay una autorregulación.

Sin embargo, varios investigadores señalan que lo que más los motiva no es el dinero extra, sino el impacto de la aplicación a nivel social o en la mejora de productividad, así como la posibilidad que dan los proyectos de contratar gente y comprar equipos. Por otra parte, la universidad evalúa cada dos años la docencia, la investigación, y la gestión de cada profesor. Dos malas evaluaciones traen como

consecuencia la remoción del profesor. Este es un potente desincentivo a dedicar mucho tiempo a la asistencia técnica. Así, los investigadores cuidan su tiempo para docencia e investigación, de modo que sólo participan en uno o dos proyectos a la vez. Con todo, las jornadas de trabajo de los investigadores suelen ser de 50 ó 60 horas, de tal suerte que el límite más importante a trabajar en más proyectos es sencillamente la falta de tiempo. Los investigadores, profesores del DIM, deben hacer 4,5 horas de clases semanales en el pregrado de Ingeniería, lo que más o menos equivale a dos cursos por año. Esta carga de docencia es obligatoria. La docencia de postgrado no es obligatoria, pero es apetecida, por cuanto permite a los profesores captar tesis. En suma, la distribución típica del tiempo de un investigador es 25% docencia, 50% investigación, y 25% proyectos.

El enorme prestigio que tiene la calidad de la matemática que se hace en el CMM es otro factor que impulsa la colaboración con la industria.

La estructura de Centro facilita las relaciones con las empresas, que son en general renuentes a establecer relaciones con unidades académicas universitarias, a las que consideran como lentas y burocráticas. El CMM, en cambio, es percibido como ágil y flexible, porque está dotado de autonomía operativa. El principal impacto del Centro ha sido dar un sentido común a los trabajos individuales que ya se venían haciendo y darle más visibilidad a la matemática aplicada. Además, el Centro apoya a los investigadores con infraestructura, una oficina de gestión de proyectos que maneja los aspectos administrativos, y un staff de ingenieros de alto nivel.

El aprovechamiento económico de la propiedad intelectual no ha sido hasta ahora significativo. En parte, porque a pesar que la UCH tiene desde hace poco una política de propiedad intelectual y una oficina de gestión del conocimiento, que depende de la Vicerrectoría de Investigación, todavía no hay patentes que hayan generado recursos. La política estándar de la UCH en materia de distribución de royalties de patentes es que un tercio pertenece a la UCH, un tercio a la facultad, y un tercio a los investigadores.

La propiedad intelectual que potencialmente puede traer más dividendos es la que se ha generado en los proyectos de biolixiviación con Biosigma. El acuerdo con esta empresa dispone que el control de la propiedad intelectual es 100% de la empresa, pero la UCH tiene derecho a 2% de las regalías que se obtengan. Con todo, esta posibilidad de ganancia no es lo que ha motivado al CMM a involucrarse en los proyectos de bioinformática aplicada al cobre, sino el interés científico intrínseco de los problemas con que se trabaja.

No obstante que para efectos administrativos y legales el CMM opera a través de la Facultad, la burocracia de la universidad no ha sido un problema. Aunque los contratos pueden demorar un mes en su trámite, ello incluye la revisión legal, lo cual es una fuente de tranquilidad y respaldo para los investigadores.

#### *4.2. Factores externos*

El CMM siempre ha contado con el apoyo político-institucional (aunque no financiero) de los decanos de la facultad y de los rectores de la UCH. Las autoridades de la universidad han visto con claridad que el CMM confiere valor a la universidad como un todo, y es una vitrina óptima del servicio de la UCH, y la ciencia, pueden hacer al desarrollo del país.

Otro elemento relevante es que los proyectos con la empresa no han puesto condiciones de confidencialidad o embargo que hagan imposible publicar resultados.

Biosigma ha sido el contrato más restrictivo en este aspecto, pero también en este caso la empresa se ha abierto a la posibilidad de que algunos resultados sean publicados, porque han comprendido que ello es importante para la universidad y para los investigadores del CMM, y que no comunicar resultados científicos disminuye al Centro, y por ende, al programa de investigación que desarrolla con él.

En muchos de los otros proyectos de asistencia técnica la protección de la propiedad intelectual no es un obstáculo, pues los modelos matemáticos que se producen y el software que los encarna no son buenos objetos de patentamiento, y no es problemático que queden sin protección.

La disponibilidad de recursos gubernamentales para la investigación básica y aplicada también ha sido clave. Desde luego, sin el aporte del FONDAP el CMM no se habría creado, pero a ello se suman otros proyectos más pequeños que también han permitido mantener una infraestructura de alto nivel, una alta capacidad de cómputo, docenas de estudiantes avanzados e investigadores postdoctorales, acceso a la literatura, y amplias posibilidades de contacto internacional. El éxito de los primeros proyectos mineros y forestales, apoyados con fondos de innovación del gobierno, ayudó a empezar “a sacar la matemática al mundo real”, como lo puso un investigador. Después el *grant* del FONDAP, acompañado por un discurso de las autoridades y de los académicos que valora las aplicaciones, hicieron el resto.

Los contactos internacionales de los investigadores, principalmente con Francia, pero de ningún modo exclusivos con esa nación, ha permitido al CMM mantenerse en la frontera del conocimiento y traer a su labor lo más avanzado que se está haciendo en otras partes.

Por último, no debe olvidarse que el CMM trabaja con sectores y empresas grandes de la economía chilena, que tiene las espaldas financieras como para apoyar continuamente el desarrollo de soluciones que aumenten su eficiencia y productividad.