

La agricultura andina ante una globalización en desplome

John Earls



Pontificia Universidad
Católica del Perú

CISEPA

Centro de Investigaciones
Sociológicas, Económicas, Políticas
y Antropológicas de la PUCP

La agricultura andina ante una globalización en desplome

La agricultura andina ante una globalización en desplome

John Earls



Pontificia Universidad
Católica del Perú

CISEPA

Centro de Investigaciones
Sociológicas, Económicas, Políticas
y Antropológicas de la PUCP

La agricultura andina ante una globalización en desplome

Serie: Investigaciones CISEPA N.º 1

Primera edición: marzo de 2006

Tiraje: 300 ejemplares

© 2006 de esta edición por el Centro de Investigaciones Sociológicas, Económicas, Políticas y Antropológicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (CISEPA - PUCP)
Correo electrónico: cisepa@pucp.edu.pe

El contenido de este libro no expresa necesariamente la opinión del CISEPA - PUCP, ni compromete la posición institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Diseño y diagramación: Gisella Scheuch

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso de los editores.

Derechos Reservados

ISBN: 9972-2780-0-X

Hecho el Depósito Legal N.º 2006-0321

Impreso en el Perú – Printed in Peru

Quiero agradecer a Milagros Silva y a Hilda Araujo por el gran apoyo que me han dado en la traducción del inglés del primer y tercer artículo y en la revisión de todo el texto. A Rosario Bernardini por la corrección de estilo y a María Isabel Merino por su esmerado esfuerzo en coordinar la edición de este libro.

Índice

Introducción	11
--------------------	----

Capítulo I

Las dinámicas de una globalización en desplome	19
--	----

Introducción	21
--------------------	----

1. Auto-organización crítica y predicción	26
2. Ley de potencias con una modulación logarítmico-periódica	33
3. Las dinámicas financieras y el modelo de la bolsa	34
4. Crisis financieras	37
5. La autoorganización en el campo crítico	41
6. Globalización: población y producción económica	43
7. La «madre de las crisis»	47
8. Calentamiento global	49
9. Cambio climático y misticismo político	62
10. El colapso de civilizaciones	64

Capítulo II

Agricultura peruana en la transición energética del siglo XXI	71
---	----

Introducción	73
--------------------	----

1. Agricultura y energía	74
2. La energía y los ecosistemas humanos	76
3. Crisis global de la energía	80
4. Energía y alimentos en el Perú	89

Capítulo III

El carácter de la agricultura andina 103

Introducción 105

1. Ecoclimatología en altas altitudes	107
1.1. La gradiente de la presión atmosférica	108
1.2. La gradiente de la radiación solar	109
1.3. La gradiente de temperatura	111
1.4. Humedad aérea	112
1.5. La altitud y la incertidumbre	113
1.6. La incertidumbre y la predictibilidad	114
1.7. Una conclusión ecoclimática general para los Andes	118
2. Tecnologías de manejo de riesgos: la estrategia del paralelismo masivo	119
2.1. Algunos importantes artefactos agrícolas andinos	123
2.2. El control del espacio vertical	125
2.3. Coordinación y agricultura de laderas	129
2.4. Tiempo	136
2.5. Algunas conclusiones sobre la agricultura inca	138
3. Experimentación y control en el Estado Inca: Moray	139
3.1. Descripción del sitio	141
3.2. Registros térmicos y análisis	143
3.3. Mecanismos posibles que constituyen los sectores	151
3.4. Una breve nota sobre la astronomía en Moray	152
3.5. Algunas conclusiones e hipótesis	153
4. Algunas conclusiones generales sobre el carácter de la agricultura andina	157

Bibliografía 161

Introducción

Casi toda la discusión que se da hoy en día en el Perú acerca del desarrollo agrícola se basa en la presunción de que el mundo del futuro será simplemente una extensión del mundo de hoy. Se cree que el proceso de globalización va a seguir avanzando con el mismo rumbo que los últimos veinte o treinta años. Se supone también que la agricultura peruana siempre contará con mercados extranjeros en permanente crecimiento, en los cuales se podrán colocar los productos nacionales y de donde se importarán productos baratos necesarios para satisfacer las necesidades alimenticias que no se producen aquí o cuya producción no se considera económicamente competitiva en la coyuntura. Se predica así el desarrollo prioritario de una agricultura altamente tecnificada para la producción de bienes para la exportación, que también servirá para el mercado urbano nacional.

Según esta visión la agricultura de las comunidades indígenas y de las sociedades de origen precolombino es un arcaísmo, y está destinada a desaparecer. Una versión extrema de este escenario sostiene que la agricultura andina tradicional no tiene ningún lugar en este mundo globalizado y que las tierras por encima de los 3.000 metros deben reservarse para la minería y satisfacer las necesidades del creciente mercado mundial.

Sin embargo, cabe preguntarse si el sistema global —tal como está actualmente constituido— va a seguir con la misma tendencia de crecimiento en el largo plazo. Qué pasaría si el mercado global experimentara un decrecimiento drástico y acelerado; qué pasaría si la parte sustancial de la agricultura peruana se convierte en una agroindustria que produce

espárragos, alcachofas, ajos, páprika, cebollas, frutas, etc. para la exportación y de repente no hay dónde exportar; y qué si ya no hay cómo importar productos que necesita la población, tales como trigo, maíz, arroz, cebada, etc. A fines de los años noventa las importaciones netas de cereales llegaron al 44% del consumo total y esta tendencia continuará aumentando. ¿La población podría alimentarse satisfactoriamente con una dieta exclusiva de espárragos y alcachofas? Esto nos hace recordar la solución de María Antonieta al hambre de la Francia revolucionaria con el consumo de bizcochos.

Con toda seguridad este escenario parecerá totalmente fantasioso y hasta apocalíptico a la mayoría de lectores. Y quizá, por la simplificación, sea un poco exagerado. Sin embargo, el análisis sistémico de la globalización capitalista demuestra que esta no es sostenible de ninguna manera y que, de hecho, su desplome es solo cosa de tiempo. La dinámica del crecimiento histórico del sistema y su proyección hacia el futuro demuestran una serie de patrones internos que son universales en todo sistema complejo y que van en camino al estado crítico. Estos patrones se manifiestan como una oscilación en el patrón de crecimiento, que se acelera en amplitud hasta llegar a un valor infinito que expresa el desplome total del sistema en una tremenda convulsión y su reemplazo por algo totalmente diferente; temas que serán tratados en este libro.

En el primer capítulo del libro analizo el sistema global de acuerdo con la teoría actual de los sistemas complejos adaptativos y se ve que la curva derivada que mejor describe su dinámica da una vida máxima hacia mediados de este siglo. Asimismo se observa que el patrón de este proceso se expresa en el comportamiento de la bolsa de valores, en el crecimiento demográfico y la productividad económica, y hasta en el mismo modo de pensar del mundo *occidental* dominante. Adicionalmente a ello se muestra que la mecánica del crecimiento industrial está generando el calentamiento global desde fines del siglo XIX y que el patrón del calentamiento parece expresarse en la misma forma oscilatoria que caracteriza el sistema económico general. Veremos así que el calentamiento global es una parte integral del crecimiento económico.

No es posible prever cómo estos diferentes procesos van a presentarse en el Perú, pero en tanto el país esté más acoplado al sistema global más

severos serán los efectos de las perturbaciones que se generen. Las fuertes expansiones y contracciones en el sistema económico global serán altamente desestabilizadoras para toda la producción agrícola comercial. Los efectos del calentamiento global ya se manifiestan en la desglaciación andina que influye en las restricciones en el abastecimiento de agua en Lima y en la costa en general. Todavía la ciencia está lejos de entender los detalles del impacto local de estos fenómenos, pero los modelos globales coinciden en proyectar un escenario general de mayor sequía, con la ocurrencia de algunas intensas lluvias atemporales en los Andes centrales. La combinación de todos estos factores pone trabas insuperables para una agricultura de tipo industrial.

En dicho análisis se trata al sistema global como un sistema autoorganizado que es más o menos independiente de fuentes externas de energía para su propulsión. Sin embargo, no es así. No hay proceso físico que ocurra sin un gasto de energía y el sistema económico es un proceso físico por definición: las materias primas se transforman en productos y los productos se transportan a otros lugares donde se los consume. Hasta la misma actividad bursátil, que parece tan ajena a la realidad de una fábrica de acero o de un fundo de espárragos, involucra la movilización y el gasto de energía, los que se ramifican en toda la economía productiva. El problema de la energía será abordado por ello en el segundo capítulo.

El sistema industrial global está basado en la presunción del crecimiento continuo. Se puede constatar que todas las notas sobre economía que se publican en la prensa están asociadas a la palabra *crecimiento*. El crecimiento económico es un concepto no cuestionable en este mundo. Sin embargo, el crecimiento económico está basado en la abundancia de las fuentes de energía que se obtienen a precios baratos de los combustibles fósiles, principalmente petróleo. Es decir que el desenvolvimiento del sistema está sustentado en el crecimiento de las fuentes energéticas que lo potencian. El petróleo es, de lejos, el combustible más conveniente de estas fuentes, a lo que se suma su carácter multipropósito. Como he escrito ya en otro texto:

Casi todo aspecto de la vida actual depende del acceso a petróleo barato [...] Veamos el ejemplo de la agricultura: cada paso en la producción agrícola

industrial involucra energía fósil, pues desde la siembra, el barbecho, la irrigación, la cosecha y el procesamiento es mecanizado; los fertilizantes y pesticidas, así como el plástico usado en el empaquetamiento, provienen del petróleo; el procesamiento y el empaquetamiento derivan del petróleo; la distribución y el transporte; el almacenamiento refrigerado en supermercados; el traslado a las casas en carros y el almacenamiento en refrigeradoras, la preparación en cocinas a gas o eléctricas. (Earls 2005: 11-12)

Actualmente el petróleo alcanza el 43% del consumo energético mundial y el 95% de la energía es usada en el transporte. Por cada caloría de comida que se consume en los Estados Unidos se invierten diez calorías en su producción. Aunque no tenemos las cifras correspondientes para la agroindustria peruana, podemos afirmar que la tendencia es la misma, aunque aquí todavía una parte sustancial de esa energía es hidroeléctrica. Todo aparentemente está bien, excepto que la producción del petróleo en el mundo ha llegado a su punto máximo, en los años venideros disminuirá y el pico en la producción de gas lo seguirá en unos cinco o diez años. No es que el petróleo esté agotado, sino que lo que queda es más difícil y costoso de extraer y refinar, y los precios continuarán subiendo. De esta manera, un sistema agroindustrial estrechamente acoplado al sistema global será inviable en unos años más. La posibilidad de satisfacer las necesidades alimenticias futuras con la importación de comida altamente costosa será inviable a mediano e imposible a largo plazo. Esta problemática es explorada, como ya señalamos, en el segundo capítulo de este libro.

Es así que con el colapso del sistema capitalista global, la producción agrícola volverá a ser una actividad local o por lo menos nacional. Será un período de transición energética: una transición del modo de vida, en todos sus aspectos, hacia una nueva organización social basada en el uso de energías renovables que tendrá mucho en común con las sociedades de la época preindustrial pero que seguramente incorporará también mucho de la llamada revolución informática. Dentro de los países, el alto costo de la gasolina restringirá el transporte de los productos a distancias reducidas; el trueque y el comercio con los países colindantes se mantendrán pero a una escala menor. Grandes ciudades como Lima no podrán abastecerse como ahora del campo y habrá un movimiento masivo de personas al campo. Hay que notar que este escenario futuro está recibiendo mucha

atención en Europa, especialmente en países pequeños como Austria y Suecia pero no solo en ellos. Hay proyectos importantes, como el Global Integrated Village Environment, centrado en Austria y auspiciado por la Unión Europea (<http://www.globalvillages.info/index.php/GlobalVillages/Welcome>), que están preparando a la población rural para ese nuevo mundo. La transición energética no es una eventualidad sino una inevitabilidad. El ecólogo de sistemas Howard Odum, en el tiempo de la primera crisis de petróleo, lo resumió así:

Durante el crecimiento, el énfasis es en la competición, y grandes diferencias en bienestar económico y energético desarrollan; exclusión competitiva, inestabilidad, pobreza y riqueza desigual son características. En un estado estacionario, la competición es controlada y eliminada siendo reemplazada con sistemas regulatorios, alta división y diversidad de labor, distribuciones energéticas uniformes, poco cambio, y crecimiento sólo para propósitos de reemplazo. Amor para la calidad de sistema-estable reemplaza el amor para ganancias netas. Ética religiosa adopta algo que es más cercano a la de aquellos pueblos primitivos que anteriormente eran dominantes en las zonas del mundo con culturas basadas en los flujos estables de energía solar. Ideas socialistas de distribución son más consistentes con estado estacionario que con crecimiento. (Odum 1974: 5-6 Trad. John Earls)

En el Perú, felizmente, se ha desarrollado un sistema agrícola de alta productividad sobre el curso de varios milenios. Este sistema llegó a su desarrollo máximo en el incanato y han sobrevivido ciertos patrones básicos en las comunidades campesinas actuales de la sierra, pese a las presiones modernizantes ejercidas por los abanderados locales de la globalización. Esta agricultura andina, a menudo designada como *tradicional*, difiere en muchos aspectos fundamentales a la agroindustrial y comercial. En muchos aspectos es consonante con los patrones que Odum señala para el nuevo mundo emergente del estado estacionario. Además, cuenta con patrones de manejo que parecen contra-intuitivos para aquellas personas que han sido formadas en una cultura que asume que el patrón capitalista es el patrón *natural* de la humanidad. Este sistema, al que llamo andino, ya no sobrevive en estado puro; en las comunidades campesinas coexiste con la actividad agrícola comercial, en mayor o menor grado. Es común que los campesinos de las comunidades cultiven algunas

chacras de la manera denominada andina y otras de manera comercial. Sin embargo, dado que es casi imposible emplear en las laderas escarpadas de la sierra maquinaria de uso intensivo en energía, la agricultura mayormente se basa en la energía solar (no tomamos en cuenta el uso de los fertilizantes y pesticidas basados en el petróleo, pues no es revelante en esta discusión).

Es así que, en el tercer capítulo abordamos las características básicas de la agricultura andina como un sistema con la función de asegurar los requisitos alimenticios de sus habitantes, comenzando con una descripción del medio ambiente andino. Este ambiente es excepcionalmente complejo: es el medio de mayor diversidad ecolimática del mundo y se caracteriza por un alto grado de incertidumbre y de riesgo de todo tipo, el cual aumenta con la altitud. En su evolución histórica la agricultura andina se ha caracterizado por un proceso continuo de articulación de la producción agrícola entre los diferentes ambientes ecológicos, y a la vez la optimización de la producción dentro de cada ambiente. La domesticación de un número enorme de cultivos autóctonos y la innovación de una serie de artefactos agrícola —andenes y camellones, entre otros— que generalmente se designan colectivamente como tecnología andina son algunos de los resultados de esta estrategia. Sin embargo, el éxito de esta agricultura no se basa tanto en los artefactos mismos sino en el *software social* detrás de su operación. Se asemeja mucho a lo que en la Unión Europea se llama agricultura basada en el conocimiento, la que ahora está recibiendo mucho impulso.

Al contrario, la agricultura industrial ha sido desarrollada a partir de una tradición agrícola del manejo de medio ambientes de llanuras. Así, en el Perú solo ha podido establecerse en los ambientes homogéneos de la costa y en los fondos planos de algunos valles de la sierra; las laderas han sido dejadas a la agricultura andina. En esa tradición y con los amplios subsidios de energías fósiles, la articulación de las zonas de producción no se ve como un problema. Todo se lleva al mercado urbano y allí se lo convierte en dinero, lo que se reconvierte en otros productos que provienen de otras zonas todavía. La articulación de la producción se resuelve con el transporte. Cada productor solo tiene que preocuparse de sus propias chacras.

En el período de la transición energética será relativamente fácil reconvertir la agricultura netamente comercial a una agricultura para la alimentación local. Pero dadas las nuevas restricciones energéticas no sería probable lograr una producción suficiente que permita reemplazar las importaciones actuales de alimentos. Será necesario retomar la agricultura andina que subsiste en la sierra, entenderla y repotenciarla con el conocimiento científico actual con el fin de alcanzar un gran aumento productivo. Pero lo más importante es integrar a los mismos campesinos andinos al proceso. Ellos mantienen un enorme reservorio de conocimientos y una vez que compartan los fines de la transformación, sintiéndose parte de ella, aportarán ideas y tácticas que a los científicos que hemos sido formados exclusivamente en la cultura occidental nunca se nos ocurrirían.

Los grandes avances en la organización agrícola andina ocurrieron con los estados Wari y Tiwanaku en el Horizonte Medio y luego en el Incanato. El Estado se esforzó en articular y optimizar la producción sobre grandes áreas, y las mejoras en la tecnología agrícola son evidentes. Obviamente no se tratará de reinstalar ni de imitar los estados andinos antiguos, sino de identificar los principios organizativos que han guiado sus tácticas y estrategias. De nuevo hay que tomar ese doble camino pues la optimización de la producción en un medio ecoclimático local demanda la articulación de las labores en este con las que se efectúan en los otros medios colindantes y cercanos. Al final del capítulo describo el sistema tecnológico inca de Moray, que fue diseñado y construido específicamente para la articulación de la producción sobre una diversidad de medios ecoclimáticos de la región cusqueña. Con la tecnología cibernética actual, estos sistemas de control podrían implementarse a un costo relativamente bajo sobre toda el área andina.

El petróleo y el gas no van a agotarse de un día a otro. Es un proceso gradual que durará más de veinte años. Sin embargo, como lo demuestra el informe de Hirsch (2005) al gobierno de los EE.UU. sobre el pico del petróleo, una reorganización socioeconómica sin grandes trastornos debe comenzar entre diez y veinte años antes del pico mismo.

El Perú tiene grandes ventajas en energías renovables y un abastecimiento de gas natural, que, de manejarse inteligentemente, duraría más de veinte años y suavizaría este período de transición energética. Cerrar los

ojos a lo que está pasando en el mundo globalizado y enganchar más estrechamente al país a ese sistema mediante la firma de los TLC, que reducen aún más las opciones agrícolas del Estado, es una invitación al desastre.

Capítulo I

Las dinámicas de una globalización en desplome

Introducción

En el estado actual de la situación mundial es muy difícil prever el curso de los sucesos del futuro, incluso a corto plazo. Esto se debe en gran parte a que convivimos con dos percepciones distintas del mundo. Presentimos que la incertidumbre sobre el futuro aumentará y que la situación de deriva de los acontecimientos en el mundo no augura un futuro ni seguro ni estable. El mundo científico es casi unánime en sus advertencias sobre el impacto desastroso del cambio climático en el planeta y en nuestras vidas. Hay mucha evidencia de que la edad de la energía abundante y barata, de la cual depende este mundo, está llegando a su fin y esto va a impactar negativamente en nuestras economías. La gente siente que las horas y la intensidad de su trabajo aumentan más rápido que sus ingresos, aún para aquellos cuyos ingresos no aumentan. En casi todas las partes del mundo los derechos humanos están bajo ataque. La ley internacional, cuidadosamente construida a mediados del siglo pasado, está siendo desmantelada. Movimientos mesiánicos que predicen la guerra mundial como el camino a la salvación están surgiendo de las tres grandes tradiciones religiosas monoteístas; y sus visiones apocalípticas influyen en los gobiernos de dos de los países más militarizados del mundo. Pero lo peor es quizás que nos sentimos más y más aislados en el mundo y siempre con menos influencia en el curso de los acontecimientos. Esta es la percepción de un mundo en desaparición.

Al mismo tiempo somos conscientes de que vivimos una época de avance tecnológico y científico nunca jamás visto en la historia del mundo. La porción de la población mundial que tiene acceso a los beneficios de este avance ya no puede imaginar sus vidas sin computadoras, Internet, teléfonos celulares y todos las conveniencias y servicios que estos nos proporcionan. Damos por descontado que estos van a seguir mejorando en los años venideros y que harán nuestras vidas aún más placenteras. Y la gente que no tiene o tiene poco acceso a todo esto guarda la esperanza de que algún día cercano su suerte cambiará y podrá ingresar a esta forma de vida. El Producto Bruto Interno (PBI) del mundo sigue aumentando y se nos dice que el despunte tecnológico de alguna manera se traducirá en un despunte del bienestar económico. Además esta nueva tecnología nos abre contactos con personas a enormes distancias y nos posibilita mantener amistades que habrían caído en el olvido. Nos da conocimientos del mundo que nunca hemos tenido antes y reduce la brecha científica entre el mundo rico y el denominado *mundo en desarrollo*. Tenemos la percepción de participar en un mundo globalizado. Esta es la percepción de un mundo en apertura.

Estas dos percepciones del proceso histórico actual pueden parecer contradictorias y excluyentes, pero de alguna manera la visión optimista y la visión pesimista coexisten en la mayoría de personas. Las tenemos en diferentes proporciones y combinaciones, y se expresan en nuestra psique de distintas maneras. El hecho es que las dos percepciones son fundamentalmente correctas. Lo que sucede es que el mundo ha entrado en un proceso de transición histórica hacia una nueva meta-organización humana que será diferente a todas las que se han tenido antes. No hay ninguna manera de vaticinar cómo será esta, ni cuánto tiempo durará su emergencia; tampoco tenemos la seguridad de que la humanidad sobrevivirá al proceso. Sin embargo, conviene entender más acerca de la naturaleza de la transición y de la escala de tiempo involucrada de modo tal que nos permita lograr una planificación estratégica de nuestra participación en el proceso y saber cómo amainar la interrupción de la vida en el mundo, en el Perú y en el entorno sudamericano. Tenemos que aprovechar de la aceleración científico-tecnológica y de las nuevas aperturas de conocimiento y planificación que esta trae, para dilucidar la dinámica del sistema

global del cual formamos parte. Hay que aprovechar del mundo en apertura para navegar por el mundo en desaparición y de este modo comenzar a programar los cambios estratégicos que sean consistentes con la transición al mundo emergente (Earls 2004) y así aliviar la incertidumbre que nos agobia. Es decir, hay que construir alguna manera de pronosticar el curso general de los acontecimientos en el mundo y de sus repercusiones en la región. El devenir del proceso global está determinado por la interacción entre casi una infinidad de eventos y procesos menores; algunos de estos se perciben como los grandes problemas, pero resultan a su vez de la interacción de eventos y procesos menores, y así sucesivamente. A cada nivel de escala hay procesos que interactúan entre sí de manera no lineal,¹ y es muy difícil especificar las relaciones entre ellos. Todo esto es característico del comportamiento de los sistemas complejos; de aquellos que están *al borde del caos* para usar la popular expresión introducida por Chris Langton y Stuart Kauffman (Kauffman 1995). Las relaciones entre los eventos incluyen retroalimentaciones tanto positivas como negativas,² las cuales a menudo cambian de un estado a otro en caminos impredecibles. Por tanto, si los eventos y los cambios que generan este comportamiento están fuera de los límites de la predicción, ¿qué podemos predecir para reducir la incertidumbre del futuro y que sea útil para la planificación estratégica?

En este trabajo trato de elucidar algunas respuestas a esta problemática en base a los avances de la nueva ciencia de la complejidad. Esta es una

¹ Por lineal o linear me refiero a una relación entre eventos que de manera simple se puede pensar como: la magnitud del cambio producida en un fenómeno es proporcional a la magnitud del cambio en el fenómeno que la causa, o por lo menos aproximadamente. En álgebra elemental se lo escribe como $Y = aX + b$ donde X y Y son dos variables acopladas y a y b son dos constantes que especifican la proporcionalidad entre los cambios en cada uno. Para relaciones no lineales no hay una relación de proporcionalidad; al aumento de un cambio en X quizás corresponda una detención o disminución del valor de Y como en el llamado *efecto mariposa*.

² Retroalimentación positiva significa que un cambio en una cantidad da lugar a un cambio adicional en esta cantidad, en el mismo sentido un aumento produce más aumento, y viceversa, como en una curva exponencial. Retroalimentación negativa significa que un cambio en una cantidad produce un cambio en el sentido contrario, y así ayuda a mantener la estabilidad.

ciencia que ha emergido de la interacción continua y creciente entre todas las ciencias en la década de los noventa y que puede ser entendida como una expresión profunda de la nueva apertura científica, o quizás como una propiedad de ella. No voy a entrar aquí en una discusión general de esta ciencia, basta decir que en ella se busca identificar y describir formalmente los principios universales del comportamiento en todos los sistemas complejos sin importar las manifestaciones concretas de ellos.³ La complejidad puede entenderse como algo que *emerge* de las interacciones entre los componentes del sistema y tiene propiedades que no existen al nivel de los componentes. Por ejemplo, las moléculas del aire solo tienen propiedades como masa, posición, velocidad, fuerza, y otras de las propiedades definidas en la mecánica de Newton. No tiene sentido hablar de la temperatura de una molécula ni de su presión pero sí del aire; estas son propiedades de colectividades, propiedades que *emergen* de las interacciones entre grandes números de moléculas componentes. En sentido estricto, se mide la complejidad de un sistema en términos de la longitud de la descripción más escueta de sus regularidades; se dice que un fenómeno es más complejo que otro si su descripción es más larga (Gell-Mann 1994). Una primera introducción a los orígenes de esta ciencia para el público general es el libro de Mitchell Waldrop (1992), y un buen texto universitario es el de Yaneer Bar-Yam (1997), que está disponible en el Internet. Me parece que el texto avanzado más completo es el de Didier Sornette (2004a).

Para los propósitos de este trabajo describo aquí el modelo de la dinámica de sistemas complejos que ha sido desarrollado por los físicos Didier Sornette y Anders Johansen y sus colaboradores, y presentado en una forma menos técnica en el libro de Sornette *Why Stock Markets Crash: Critical events in complex financial systems* (2003). Este modelo resulta de investigaciones en diferentes campos de la ciencia y en este libro está

³ Por ejemplo, los mismos principios de *autoorganización* operan en sistemas biológicos, sistemas terrestres y sistemas económicos, entre muchos otros. No quiere decir que todos estos sistemas son iguales, sino que sus dinámicas tienen propiedades comunes. El hecho de que las leyes de Newton gobiernan el movimiento de los planetas y el vuelo de los pájaros no significa que los planetas puedan reducirse a pájaros o viceversa.

desarrollado en torno al análisis del sistema financiero; de ahí se extiende al problema de la dinámica de la transición global. Como antropólogo, este modelo me parece muy bien fundamentado y su formulación es concordante con los postulados y procedimientos de la tradición de Franz Boas, en particular de Alfred Kroeber y quienes se han interesado en los procesos de cambio en sistemas socioculturales.⁴ No obstante, tengo otra razón para enfocar este modelo: creo que nos facilita entender la dinámica de muchos procesos socioculturales que tradicionalmente ha estudiado la Antropología, en particular la dinámica de los movimientos mesiánicos. Como he señalado ya, la nueva intensificación de estos movimientos está incidiendo fuertemente en el desarrollo del proceso global, por eso han dejado de ser una curiosidad antropológica. La aplicación del modelo de Sornette y Johansen a la dinámica de los precios en las bolsas de valores me permite percatarme que el crecimiento y el desenvolvimiento de las burbujas en las bolsas son gobernados por patrones de comportamiento que son muy similares a los de aquellos movimientos. No voy a elaborar esta idea a fondo en este trabajo, pero ella está implicada en varios de los procesos que trataré. Al fin voy a mostrar que hay buenas razones para postular que el modelo da cuenta del proceso del calentamiento global.

La discusión que sigue comienza con el concepto central de la criticalidad autoorganizada (*self-organised criticality*) y cómo esta es una característica general de sistemas complejos que están sujetos a tensión pero cuya dinámica es determinada por su propia organización. La modelación de sus propiedades permite predecir muchas características del desarrollo general del sistema. Con esta base paso al análisis del comportamiento de los sistemas bursátiles; en particular el crecimiento de las burbujas y los derrumbes en ellos. El modelo revela que el sistema de la bolsa de valores está autoorganizándose hacia un derrumbe catastrófico para el año 2052.

⁴ Es sintomático del mundo cambiante. Una breve revisión del Internet revela que el libro de Sornette ya está incorporado en los syllabus de varios cursos universitarios sobre la antropología del sistema financiero.

En la sección siguiente se presenta el análisis al crecimiento demográfico en el mundo y a la dinámica de la evolución de la productividad económica en el curso de la historia humana. En este contexto hago una breve revisión de la dinámica evolutiva en sistemas estatales basados en la agricultura. La modelación de la autoorganización crítica de los tres procesos —la evolución bursátil, demográfica y económica— revela que se está generando el colapso general del sistema global alrededor de los mediados de este siglo y que actualmente el mundo se encuentra en un proceso de transición. Basándome estos resultados y en una discusión simple de la economía termodinámica, paso a la revisión del calentamiento global como un proceso que está generado por el sistema económico global. La biósfera es el ambiente de este sistema y está sirviendo como el basurero que acumula la entropía producida en el propio sistema como calor. De ahí paso a una discusión general de la dinámica del colapso de civilizaciones complejas y de las prospecciones para la transición del sistema global.

He presentado tres ecuaciones en la discusión para satisfacer la curiosidad de aquellos lectores con una formación matemática. Sin embargo, los lectores no matemáticos no perderán nada, ya que los gráficos incluidos ilustran la solución de las ecuaciones en los contextos indicados.

1. Auto-organización crítica y predicción

¿Qué es lo que tienen en común la fuerte presión de un tanque en un cohete, una falla sísmica y un mercado activo? Recientes investigaciones sugieren que todos pueden ser descritos en los mismos términos físicos básicos de sistemas autoorganizados, que desarrollan patrones de comportamiento similares sobre varias escalas, desde la muy pequeña hasta la más grande. Y los tres tienen el potencial de conductas extremas: ruptura, temblor o estallido. (Sornette 2002: 2522 Trad. John Earls)

Se ha sostenido ampliamente, en base a la analogía entre los terremotos y la auto-organización crítica definida por Per Bak (1996), que los eventos críticos en los sistemas complejos son intrínsecamente impredecibles. Un sistema complejo alcanza un estado crítico como resultado de

sus propios procesos internos y en este estado la relación entre las causas y los efectos es no-lineal. La magnitud del efecto de una perturbación de magnitud constante sobre el sistema varía desde lo más pequeño a lo más grande de acuerdo con la Ley de potencias.⁵

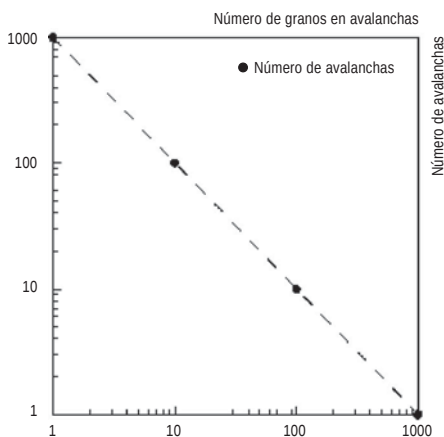
Tomaré el ejemplo de las avalanchas para ilustrar este punto. La magnitud de una avalancha es representada matemáticamente por el número de *granos* de roca que estarían movidos por ella. Si se echa un *grano* a la pendiente de una montaña que no está en un estado crítico hay muy poca probabilidad de que se produzca cualquier movimiento; se puede seguir añadiendo más granos y casi la única cosa que cambiará será la pendiente misma. Cuando la pendiente alcanza un ángulo crítico, se cambiará a una situación en la que la adición de nuevos granos estará balanceada por el deslizamiento del mismo número en promedio de granos hacia abajo. Es decir, la pendiente de la montaña estará ya en estado crítico y cualquier perturbación energética en ella dará lugar a una avalancha que puede ser grande o pequeña. La relación entre la magnitud de la avalancha y la frecuencia de su ocurrencia, con perturbaciones de magnitud constante, está gobernada por una ley de potencias que se muestra en la figura 1.⁶ Una avalancha de diez granos (magnitud 1) es 10 veces más frecuente en promedio que una avalancha de 100 granos (magnitud 2), y 100 veces más que una de 1.000 granos (magnitud 3). Pero en este estado, pequeñas perturbaciones producen reacciones en cadena, las cuales pueden afectar

⁵ De manera muy simple se puede pensar la *Ley de potencias* como el resultado de la disminución continua del denominador de una fracción simple: $1/1 = 1$, $1/0.5 = 2$, $1/0.25 = 4$, (...), $1/0,0625 = 16$, (...), $1/0,0009765625 = 1.024$, etc. A mayor disminución del denominador mayor crecimiento del valor entero de la fracción. Con el denominador igual a cero el valor es infinito. La ley expresa la relación entre el crecimiento de la fracción y la disminución del denominador. En el ejemplo dado se reduce el denominador por la mitad a cada paso y se expresa como $y = 1/2^n$ donde y es el valor total y n es el valor de la potencia de 2. ($1/2^2 = 1/4 = 4$, etc.). Una cosa interesante de este crecimiento es que es más rápido que el crecimiento exponencial. Cuando la potencia n no es un dígito entero sino una fracción, como en los sistemas que tratamos aquí, la función expresa una organización *fractal* que se compone de una jerarquía de escalas que son autosimilares entre sí. A razón de estas propiedades, si se conoce la dimensión fractal de la función se puede deducir mucho sobre su organización.

⁶ Nótese que las escalas de ambos ejes son logarítmicas, lo que permite presentar la relación como una línea recta.

cualquier número de elementos dentro del sistema; entonces, la magnitud de las reacciones es impredecible para cualquier tiempo específico. En el caso de los terremotos, la autoorganización crítica es expresada por la relación Gutenberg-Richter (G-R) entre la distribución temporal y la magnitud de los terremotos en una escala logarítmica. El próximo grano probablemente solo producirá algún temblorcito, aunque muy de vez en cuando resulta en un tsunami.⁷

Figura 1: La distribución de avalanchas y terremotos de acuerdo con la Ley de potencias



Coordenada x: la magnitud de un evento. Coordenada y: el número probable de eventos de esta magnitud.
Las escalas de los ejes son logarítmicas.

Fuente: Winslow 1995.

El punto es que las pequeñas perturbaciones que siguen añadiéndose a la pendiente constituyen una tensión constante en ella y bajo esta va generándose un proceso de autoorganización que conducen al sistema a un estado crítico. Una vez en este estado, su comportamiento está gobernado por la Ley de potencias. Se ha demostrado que esta ley

⁷ Una buena discusión no técnica del modelo es dada por Sornette (2004b).

caracteriza los comportamientos de un enorme rango de fenómenos complejos y representaría una propiedad universal de los sistemas complejos.⁸ A primera vista esto parecería hacerlos inherentemente impredecibles, sin embargo, el hecho de que la evolución detallada de los sistemas complejos esté fuera de nuestro alcance no excluye la posibilidad de predecir las fases de su evolución, particularmente de aquellos que nos afectan como son los eventos extremos: grandes terremotos y avalanchas, revoluciones políticas, quiebras en los sistemas sociales y económicos, crisis en las vidas personales de las personas, transiciones en los sistemas ecológicos, entre otros. El grado de probabilidad de un evento nos dice algo sobre la situación interna del sistema.

La mayoría de los sistemas complejos en las Ciencias Naturales y las Ciencias Sociales suelen pasar por transiciones súbitas que ocurren en intervalos de tiempo que son muy cortos en comparación con las típicas escalas de tiempo de su posterior evolución. El comportamiento a largo plazo de estos sistemas a menudo está controlado por raros eventos catastróficos. La historia de Rusia del último siglo ha sido condicionada en gran parte por el colapso de la monarquía zarista y la revolución bolchevique, y 72 años después por el colapso de la Unión Soviética que surgió de esa revolución. Ambas convulsiones tuvieron lugar en un lapso menor de un año.

Para realizar predicciones adecuadas de tales eventos catastróficos hay que rastrear la evolución de la crisis desde las interacciones entre los eventos que se dan a las escalas más pequeñas hasta las más grandes. Como dice Sornette:

Un denominador común de los diversos ejemplos es que ellos surgen de procesos colectivos: las acciones repetitivas de las influencias interactivas no lineales sobre varias escalas conducen a una acumulación progresiva de correlaciones a gran escala y finalmente a la crisis. El comportamiento a gran escala es controlado por su comportamiento cooperativo [a toda escala] y la ampliación de sus interacciones a escalas mayores (Sornette 2002: 2523 Trad. John Earls).

⁸ La Ley de Zipf, y la Ley de Pareto sobre la distribución de ingresos en una economía capitalista son casos interesantes de la Ley general de potencias.

La cuestión es entonces cómo trazar la acumulación de las correlaciones entre las diferentes partes del sistema y a través de los diferentes niveles de escala, y cómo este proceso puede variar según otras propiedades del sistema. La heterogeneidad de la constitución de los sistemas juega un rol importante en el despliegue de los procesos que conducen a las grandes crisis. Cuanto más heterogéneo es un sistema, más advertencias tenemos mediante la ocurrencia de eventos precursores que se encaminan a la crisis.

Piénsese, por ejemplo, en la formación de rajaduras en una rama de madera seca que está lentamente doblándose hasta fracturarse, que es el *punto de crisis* en este sistema simple. Al principio se percibe la formación de diminutas rajaduras dispersas sobre la madera, pero en tanto la curvatura aumenta, estas crecen y se multiplican en número y el tamaño de las rajaduras se incrementa. Las rajaduras se funden con sus vecinas inmediatas y las fusiones se dan en las partes espacialmente más separadas de la rama; las rajaduras mayores que resultan de esto también se funden con sus vecinas. A cada nivel de escala se repite el proceso, es decir que el proceso que se da en una escala es autosimilar a los procesos en las otras escalas; de modo que todo el proceso se autoorganiza de modo fractal. Finalmente se llega a una *densidad crítica* de rajaduras por la fusión de una vía de rajaduras conectadas desde un borde de la materia al otro. Se genera así un estado crítico de interconectividad entre las rajaduras que altera la naturaleza de la madera y esta se rompe: hay una falla global en el sistema lo que se llama un *spanning cluster* en la Ecología (Klomp & Green 1996). La ruptura es acompañada por cambios en las propiedades físicas de la madera: la rama se parte en dos ramas, hay un alivio súbito del estrés y estiramiento, etc.

Desde el primer momento en que se aplica la tensión se dan interacciones en las propiedades físicas que se expresan como fricciones, y estas se modifican y amplían con el incremento de la escala de las rajaduras fundidas. Por tanto, el monitoreo de propiedades específicas —elasticidad, emisión acústica, etc.— y de las fricciones con el incremento en la tensión —curvatura— en el tiempo, suministra una serie de lo que podemos llamar advertencias de la ruptura final de la madera. El comportamiento exhibido en el crecimiento de las rajaduras es denominado un

comportamiento cooperativo.⁹ El comportamiento *autosimilar* que se da en la formación de las rajaduras a diferentes escalas es denominado invariancia de escala discreta (*discrete scale invariance*) y es una propiedad de los sistemas fractales. (Sornette 1998 y 2003a).

Ahora bien, la madera es un material biológicamente formado que exhibe una gran heterogeneidad interna y morfológica: hay muchas irregularidades y desarreglos en una pieza de madera. Un material homogéneo como un cristal no da tales advertencias. Si lo sometemos a una tensión creciente de pronto estallará cuando el punto crítico sea alcanzado, pues todas las rajaduras se dan al mismo tiempo. El punto es que cuanto más heterogéneo y desordenado es el sistema, más predecible es el tiempo de la falla final global. En el camino al punto de la falla global en los sólidos heterogéneos, la disipación de la energía elástica seguirá el comportamiento de una ley de potencias corregida por una modulación logarítmico-periódica como veremos en la sección siguiente.

Estoy seguro de que la pregunta se le ha ocurrido a mucha gente, ¿cómo se puede comparar legítimamente un complejo proceso social a una pieza de madera?, ¿cómo podríamos determinar lo que puede ser observado y medido en un sistema social, donde los métodos experimentales de la Física son totalmente irrelevantes? En este punto diría otra vez que estamos tratando de las propiedades generales de los sistemas complejos. La cuestión de técnica y métodos será tocada más adelante. Las sociedades humanas son sistemas heterogéneos por naturaleza, pues se constituyen a partir de una diferenciación de roles y atributos, y en el curso de la historia la tendencia ha sido aumentar la heterogeneidad social. Con la globalización la sociedad humana adquiere una vida más estrechamente interconectada y limitada al espacio finito de la superficie terrestre. El incremento en número de los muy diversos procesos locales que participan y que originalmente fueron creados por sistemas socioculturales separados, ahora están entretejidos dentro del sistema global, al que le añaden mayor complejidad. Hay una real explosión en el número de roles

⁹ Se refiere también a este tipo de proceso como una *percolación* (o filtración) *correlacionada*, pues es análogo a la filtración del agua en el suelo.

sociales y de los personajes sociales.¹⁰ Desde todo ángulo y perspectiva, la complejidad y la heterogeneidad de este sistema son enormes y siguen aumentando.

Asimismo, es claro que las numerosas tensiones en el sistema también están aumentando rápidamente. La tensión entre el sistema económico global y su medio ambiente es la que más está forzando la acumulación y la disipación de la energía del sistema, la cual nos gustaría medir. No se mide la energía directamente, sino los efectos de esta en los movimientos de la materia —personas, máquinas, moneda, bienes, moléculas, etc.— que resultan de la disipación de la energía. Si se piensa el dinero como una expresión del acceso a estos movimientos en la materia, o sea de la energía concentrada en el sistema, entonces puede ser medido en el sistema capitalista al igual que en la madera. Mediante el Internet tenemos acceso a billones de cifras sobre los movimientos monetarios en todas las escalas del sistema económico. Una metodología para la conversión de unidades de dinero en unidades de energía ha sido elaborada por Howard Odum (Odum y Odum 1981, Odum 1996). Es decir que sí se pueden medir y comparar los flujos de energía en sistemas heterogéneos físicos y sociales, y cuando las mediciones son disponibles ya no es necesario conducir experimentos para obtenerlas.¹¹

El sistema capitalista global es sostenido por el acceso a enormes fuentes de energía fósil a precios bajos. Estas energías como el petróleo y el gas natural son tremendamente concentradas y hacen que el sistema sea muy robusto frente a perturbaciones ambientales. La aplicación de estas energías ha producido que la agricultura industrial se ha hecho muy resistente a las sequías, a los cambios en la distribución de las precipitaciones, al empobrecimiento y la pérdida de los suelos, etc. El continuo

¹⁰ En las sociedades de cazadores y recolectores no hay más que unas decenas de distintas personalidades sociales, mientras una sociedad industrial moderna puede tener más de un millón de diferentes tipos de personalidades sociales (Tainter 1996).

¹¹ En Física se necesita conducir experimentos engorrosos y costosos para obtener cifras relevantes sobre los fenómenos en el mundo de la naturaleza. La fácil disponibilidad de cifras sobre el comportamiento del sistema económico ha atraído la atención de los físicos en los últimos años, de manera tal que se está dando una emergencia de nuevas especialidades como la Econofísica y la Sociofísica.

suministro de energía a la naturaleza como en maquinaria, grandes represas, fertilizantes, herbicidas, la extracción del agua de las profundidades, etc. ha permitido que las inclemencias climáticas ya no tengan los efectos devastadores en la agricultura de los países ricos que han tenido en la época preindustrial. Muchos de los problemas pueden arreglarse, por lo menos temporalmente, mediante la intensificación tecnológica basada en la energía barata y abundante. Sin embargo, el sistema es siempre más susceptible a las perturbaciones que pueden darse en el aprovisionamiento de esta energía. Actualmente hay mucha evidencia de que la producción de la energía fósil está comenzando a disminuir y que su costo va a aumentar inexorablemente. Las perturbaciones se presentan en forma de fluctuaciones en el suministro de la energía que sostiene el sistema, y estas ya están teniendo impactos fuertes en guerras y movimientos económicos; en otros textos he trabajado una discusión de la energía en el sistema global y sus repercusiones en el Perú (Earls 2004). El punto es que las energías que han servido para aliviar las tensiones en el sistema global ahora generan fricciones que producen nuevas tensiones en él.

2. Ley de potencias con una modulación logarítmico-periódica

En este punto presento una muy breve descripción semitécnica de la Ley de potencias y la propiedad de la *periodicidad logarítmica* (log-periódica) para los lectores interesados. Las figuras 1, 2, 3 y 4 presentan estas funciones en forma visual para varios sistemas críticos que se tratarán en el texto. Los lectores no matemáticos deben pasar a la sección siguiente.

La periodicidad logarítmica ocurre como resultado de las oscilaciones que son observadas en diferentes sistemas heterogéneos que exhiben autoorganización crítica. La Ley de potencias expresa la relación entre la emisión de energía disipada E y el tiempo a la falla en términos del intervalo entre el tiempo t y el tiempo crítico t_c ,

$$E \sim (t_c - t)^{-\alpha} \quad (1)$$

Y la modulación logarítmica periódica es expresada como

$$E \sim (t_c - t)^{-\alpha} [1 + C \cos [2 \pi \log (t_c - t)/\log \lambda]] \quad (2)$$

Donde λ es la longitud de onda y el argumento del coseno es un múltiplo de 2π y α es la dimensión fractal. Por lo tanto, las oscilaciones son moduladas en frecuencia con un incremento geométrico en la frecuencia, $t_c - t_n \sim \lambda^{-\alpha}$, en la aproximación al punto crítico t_c .

Esta periodicidad logarítmica es muy general en sistemas, tanto experimentales como teóricos, aunque todavía está lejos de ser entendida. Puede ser pensada como una secuencia de oscilaciones con ciclos de períodos progresivamente más cortos que decaen de acuerdo a una serie geométrica. Básicamente muestra la aceleración de alguna señal, en este caso la emisión acústica, en la aproximación a la falla global; lo cual trabaja Sornette con más detalle (2003: 171-227).

3. Las dinámicas financieras y el modelo de la bolsa

En esta sección voy a resumir brevemente la modelación que hace Sornette de las burbujas y las quiebras financieras. Los derrumbes de la bolsa son fenómenos sociales catastróficos que incluyen grandes pérdidas de dinero y usualmente terminan en un gran incremento del desempleo, y generan la aparición de muchas otras tensiones sociales y personales. La gran crisis de 1929 *gatilló*¹² una gran cadena de eventos que condujo a la Gran Depresión. Al mismo tiempo, si los comerciantes en el mercado son básicamente individuos racionales cuyas actividades están siempre vinculadas con la ganancia de dinero y la minimización de los riesgos involucrados, ¿cómo es que pueden quebrar? En primer lugar, entonces, es necesario demostrar que una explicación de la conducta del mercado, actualmente popular entre los economistas, es totalmente inaceptable.

¹² Usaremos en el texto este término utilizado por Maturana, que podría entenderse también con el uso que se le da a *disparó* o también *hizo explotar*.

Por algún tiempo los economistas habían ensayado la explicación de las grandes crisis como el resultado de la *irracional* conducta psicológica por una parte de la población que se dedica al juego de la bolsa. Este tipo de teorización ha dado lugar al modelo del *corredor sensible al ruido*. Este modelo predice que las actividades en el mercado por parte de aquellos agentes llamados mercaderes de ruido, que son extremadamente optimistas —o pesimistas— darán lugar a que los precios en el mercado sean mayores —o menores— que su valor real.

La noción de los *mercaderes de ruido* es importante por la luz que puede echar sobre gran parte —pero no sobre toda la ideología— de la teoría económica actualmente en boga. La definición estándar de Black,

[...] define "ruido" como "no información", y a los "mercaderes de ruido" como los que negocian el ruido como si fuera información. Él afirma que los mercaderes de ruido no pueden ser eliminados del mercado porque el arbitraje racional contra ellos es costoso y por tanto limitado. Los mercaderes de ruido no son pronosticadores racionales Bayesianos y por tanto, sus actividades hacen el mercado menos eficiente. Sin embargo, los mercaderes de ruido son también benéficos al mercado porque suministran liquidez corriente (Sanders, Irwin y Leuthold 1997 Trad. John Earls).

En esta definición, el mercader de ruido es el que comercia sobre una información irrelevante o ruido. Un ítem de la noticia financiera de la BBC informa que dos economistas han desarrollado un nuevo modelo en el cual hay dos tipos de comerciantes:

Los "Fundamentalistas" [quienes] tratan de ganar dinero a base de la diferencia entre el precio las acciones y el precio que tendrían de las acciones [si este fuera] basado genuinamente sobre los eventos reales del mundo.

A "los mercaderes del ruido" no les importa el genuino valor —ellos hacen su dinero simplemente por especulación en el sube y baja de los precios—.

Los mercaderes del ruido hacen su dinero más rápidamente. Pero cuanto más juntan a la multitud y sigan la dirección [de la manada] el precio de las acciones puede ser empujado hasta muy lejos de su verdadero precio, causando burbujas o derrumbes en el mercado. En este punto, los fundamentalistas se ponen en pie y actúan para volver el precio de la acción hacia su verdadero valor. (BBN News 1999. Trad. John Earls)

Este modelo distingue entre dos tipos de gente bastante diferentes que juegan en la bolsa para hacer dinero. Los fundamentalistas son jugadores racionales *adam smithianos* que actúan sobre la base de información verdadera, mientras que los mercaderes de ruido son jugadores irracionales cuya conducta está basada en rumores, superstición, impulsos instintivos, o sea lo que fuere. Hay un acuerdo general de que los mercaderes de ruido actúan sobre ideas y datos económicamente falsos o irrelevantes. Pero ninguno de estos autores nos dará alguna idea sobre lo que constituye un dato considerado verdadero ni tampoco un dato tenido falso, ni como distinguir entre ellos. No me detendré en analizar sus argumentos y sus presuposiciones subyacentes. Los economistas que sostienen posiciones como esta tienen muy pocas probabilidades de pronosticar el comportamiento de la bolsa.¹³

En cambio, el modelo S-J (Johansen y Sornette 1999, Johansen 1999) es un modelo del estilo de *expectativas racionales*. Todos los mercaderes de la bolsa están persiguiendo expectativas racionales, y estas son simplemente las de la hipótesis familiar en las que el precio actual de un capital se da por las expectativas de su precio futuro en base a la información que es disponible en la actualidad. Si se vislumbra una probabilidad de crisis, los inversores sienten que deberán ser compensados con un altísimo retorno para mantener sus acciones en un capital que podría quebrar. Cuanto mayor sea la probabilidad del derrumbe más rápido deberá incrementarse el precio, mientras todavía no haya crisis. Esto contradice el punto de vista del sentido común que vería una caída del precio en las mismas circunstancias. Asimismo, sería racional para los agentes mantener sus acciones, puesto que hay una probabilidad finita de que la burbuja se desinfe sin crisis. La crisis no es un resultado inevitable de la burbuja.

¹³ Desde punto de vista antropológico es muy interesante señalar que en el siglo XVI el extirpador de idolatrías Cristóbal de Albornoz describió las actividades de los indígenas andinos en el movimientto mesiánico *Takiy Onqoy* en exactamente los mismos términos (irracionales, supersticiosos, etc.) que estos economistas *científicos* usan para describir a los mercaderes de ruido. Parece que la separación exclusiva de la gente en estas categorías expresa una estructura binaria fundamental del pensamiento occidental. Para Albornoz los cristianos eran los fundamentalistas racionales.

La crisis es tratada como un evento exógeno, y nadie puede saber cuándo acontecerá; si no fuera así, algunos mercaderes racionales podrían ganar enormes beneficios por la venta justo antes del derrumbe.¹⁴ En este modelo, la probabilidad de la crisis es también una variable exógena originada fuera del modelo y no hay estrategia comercial para forzar la crisis, y en cualquier caso un agente racional no buscaría reducir su capital. En este sentido, todos los mercaderes pueden ser vistos como mercaderes de ruido que basan sus acciones en sus percepciones de lo que es una información relevante. En otras palabras, no hay una distinción de comportamiento entre los mercaderes de ruido y los agentes racionales; toda persona simplemente procura tener ganancias y no tener pérdidas, y aprovecha de toda la información a su alcance. La supuesta distinción entre los dos tipos de agentes se hace en base de las consideraciones ideológicas del denominado analista. Hay que resaltar que el modelo S-J es un modelo antropológico del comportamiento humano pues, modela la actividad de los accionistas de la bolsa en los términos de los patrones culturales de la sociedad capitalista. Más adelante se verá como el modelo puede extenderse para explicar otros patrones de conducta que suelen generarse en toda sociedad humana dadas ciertas condiciones de tensión.

4. Crisis financieras

Proponemos que [las crisis financieras] son causadas por la lenta acumulación de correlaciones temporales a largo plazo entre corredores que conducen a un colapso de la bolsa en un instante crítico. Esta acumulación se manifiesta como una aceleración general de acuerdo a una ley de potencias en el precio “decorada” por [ondas] precursoras log-periódicas. (Johansen, Sornette y Ledoit 2000 Trad. John Earls).

Si un grupo suficientemente amplio de accionistas vende simultáneamente, entonces la bolsa quebrará, ya que no habrá suficientes órdenes de

¹⁴ En la película australiana *The Bank* se puede observar una dramatización de los esfuerzos de este tipo de racionalidad.

compra para contenerlos. Esto puede suceder aun cuando los agentes que toman la opción de venta sean un enorme grupo cuyos miembros mayormente no se conocen entre sí. Cada agente está encajado en una red de relaciones familiares, amigos, colegas, relaciones institucionales, etc. Continuamente se influyen entre sí a través de estas redes, y las redes de muchos agentes estarán sobrepuestas, aunque esto no es una condición necesaria del modelo. En tiempos normales los números de compradores y vendedores tienden a anularse. El comportamiento a escala microscópica está basado sobre la bien fundada suposición de que la gente tiende a imitar a sus pares; en este caso, en la percepción de que puede constituir la *verdadera información*. Cuando las personas se sienten dudosas sobre qué hacer tienden a consultar las opiniones de otras que conocen bien y respetan. Es esta característica la que puede dar lugar al comportamiento cooperativo a gran escala, la cual es necesaria para producir una crisis; como en el caso de la madera descrita líneas arriba. Como Sornette insiste, no sucede esto porque un grupo de personas repentinamente logra hacerse de una pieza caliente de información, digamos de un periódico, y entonces vende todo. Tampoco significa que la gente vuelva repentinamente en un frenesí de venta irracional.¹⁵

La sensibilidad del sistema a la perturbación es denominada *la susceptibilidad*. Esta puede ser pensada como una medida de la influencia de un agente sobre otro. Cuando esta influencia es elevada e incide en los precios de las acciones se generan coordinaciones a escalas mayores y puede finalmente dar lugar a la cooperación global entre corredores tal que se *gatilla* la crisis. En tanto que la susceptibilidad aumenta, la probabilidad de derrumbe crece en función de la aceleración del sistema hacia un punto crítico. Al mismo tiempo, el sistema aparece más susceptible a las perturbaciones externas, a los choques exógenos (Sornette, Malevergne, Muzy 2002). El ambiente del sistema es intrínsecamente ruidoso, pero en los

¹⁵ Lo acontecido a ENRON (la empresa gigante de energía que infló su situación financiera artificialmente hasta que se produjo una implosión que acabó con la compañía y con los ahorros de sus accionistas y empleados pequeños y medianos en el año 2002) y a otros muestran lo opuesto; solo un pequeño número de altos directivos tuvo la opción de vender a tiempo. Y tampoco dio como resultado una crisis repentina en el sistema financiero, aunque ciertamente indicaba un alto grado de sensibilidad en el sistema.

largos intervalos entre las crisis, las perturbaciones ambientales no tienen grandes repercusiones en el sistema. El modelo de la crisis es formulado sobre esos aspectos que se hacen más pronunciados, en tanto que el sistema ingresa al campo de transición en la vecindad del punto crítico. Para aplicar la ecuación 2 a la predicción del mercado financiero, esta es transformada a la fórmula:

$$I(t) = A + B(t_c - t)^z + C(t - t_c)^z \cos(\omega \log(t_c - t) - \phi) \quad (3)$$

Donde $I(t)$ expresa el índice del mercado, A es el precio terminal de las acciones en el momento crítico t_c . El exponente z ($0 < z < 1$) describe una aceleración, y ω y ϕ son la frecuencia angular de las oscilaciones log-periódicas y de la fase, o la unidad temporal respectivamente (Johansen y Sornette 2001).

Este modelo es isomórfico a los procesos colectivos que surgen en bloques de materiales, partes de la corteza de la Tierra, la densidad de la nieve en una montaña inclinada, los procesos de combustión en el interior de una vieja estrella, etc., ya bosquejados líneas arriba. Los parámetros del sistema lentamente evolucionan hacia el punto crítico y una vez que se acercan a él, la evolución del sistema acelera según la Ley de potencias. En el modelo financiero éste es visto en el incremento frenético de los precios en la burbuja que precede la crisis. Esta aceleración en el sistema en el campo del punto crítico puede ser mejor comprendida en términos de la autosemejanza fractal a través de las diferentes escalas. Como Sornette lo expresa:

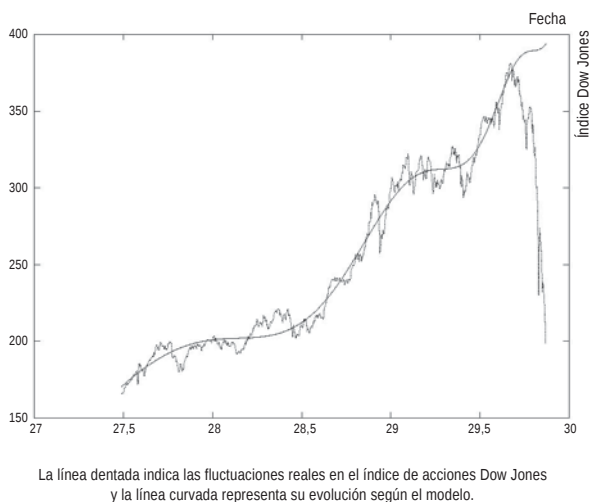
[...] en esta situación crítica, en un océano de mercaderes que están principalmente con tendencia a la baja, pueden haber diversas islas de mercaderes que están principalmente con tendencia al alza, y cada una de estas con lagos de mercaderes con tendencia a la baja; la progresión sigue bajando a la escala mínima de un solo mercader. Hablando intuitivamente, la propiedad de autosemejanza [fractal] es la razón porque la imitación local se propugna a través de todas las escalas a la coordinación global. (Sornette 2002: 11-12 Trad. John Earls)¹⁶

¹⁶ El lector notará que esta metáfora de las islas es isomórfica a nuestra descripción de las rajaduras en la ramita.

En la burbuja y en la crisis, las correlaciones producen el comportamiento cooperativo entre los mercaderes de las grandes islas y a todas las escalas inferiores, esto es, el patrón de la invariancia a escalas finitas.

Las crisis de Wall Street de 1929, 1962, 1987 y 1997 fueron analizadas por este modelo log-periódico, como también lo fueron la Hang Seng, la Nikkei y muchas otras (Sornette 2003: 228-280). Como se puede ver en la figura 2 para la crisis de 1929, la buena admisión de los datos al modelo se expresa en las oscilaciones del índice Dow-Jones en el crecimiento de la burbuja. El evento en sí mismo es un *outlier* estadístico (evento improbable), pero viene a ser más y más probable en tanto que la susceptibilidad y la tasa del riesgo crecen.

Figura 2: El índice Dow Jones antes de octubre de 1929, crisis de Wall Street

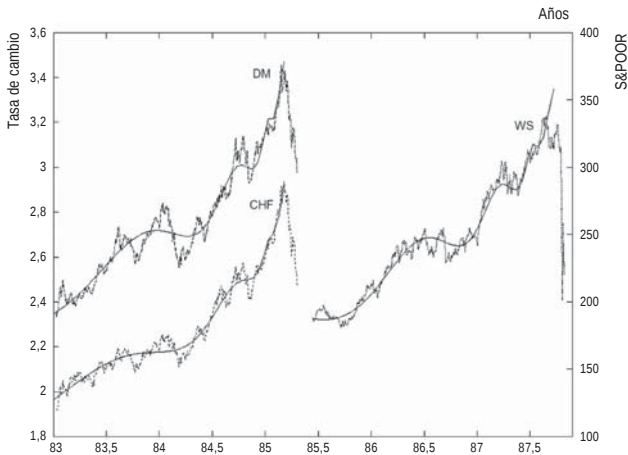


Fuente: Johansen y Sornette 1999.

En la figura 3 los tipos de cambio del DEM (marco alemán) y el CHF (franco suizo) son graficados contra el dólar norteamericano y sus fluctuaciones extrapoladas del modelo log-periódico de la crisis de 1987. En la

figura se ve que el modelo es suficientemente fuerte como para describir otros fenómenos de crisis financiera, que no pueden ser discutidas aquí.

Figura 3: El índice *Standard and Poor 500* (US) exactamente anterior al derrumbe de octubre de 1987 (a la derecha); y el cambio de las monedas alemana (DMK) y suiza (CHF) a dólares de EE.UU. en camino al colapso a mediados de 1985



Fuente: Johansen y Sornette 1999.

5. La autoorganización en el campo crítico

Antes de proceder sería útil retomar el fenómeno de la autoorganización en el campo próximo al punto crítico. La autoorganización es un proceso de evolución en el cual el efecto del ambiente es mínimo, o sea el desarrollo de nuevas estructuras complejas se genera al interior del mismo sistema.

Esto normalmente tiene lugar como resultado de procesos de variación interna, los cuales son usualmente llamados fluctuaciones o ruidos, y está asociado con fenómenos complejos no lineales (Heylighen 1997). En todo sistema complejo del mundo real siempre hay movimiento. Cuando el campo del sistema es estable y hay poca tensión en él, las interacciones no lineales entre los componentes generan una evolución lenta y suave y

hay poca indicación de las oscilaciones log-periódicas. Pero en condiciones de mayor tensión la evolución se acelera y los cambios ocurren en secuencia rápida. Las tensiones con el ambiente no determinan la aceleración del desarrollo—cada sistema se comportará de acuerdo a su propia organización, su autoorganización— sino las tensiones inciden para aumentar y propagar las interacciones no lineales entre los componentes y el sistema se hace más interconectado. En estas circunstancias el sistema comienza a conducirse al campo crítico y las pulsaciones log-periódicas vienen a ser la fuerza motriz de la autoorganización. Esto es lo que ocurre cuando el sistema entra al campo crítico.

La autoorganización debe ser pensada entonces como una propiedad emergente del sistema. No está asociada con los elementos y componentes particulares que interactúan juntos en la constitución del sistema. Un hormiguero es un sistema complejo que tiene propiedades muy diferentes de aquellas de sus componentes hormigas. Un hormiguero tiene la resiliencia para sobrevivir ante muchas perturbaciones ambientales aunque la manera como lo hace está condicionada por las típicas interacciones entre las hormigas. Diferentes especies de hormigas constituyen hormigueros de dinámicas adaptativas muy distintas (Tainter y otros 2003). Durante su ciclo de vida el hormiguero se adapta al ambiente y a todas las particulares características de esto, pero cómo lo hace está determinado por su propio desarrollo histórico interno.

Este desarrollo histórico es como una memoria para el sistema, en la que el pasado es incorporado dentro de la actual organización y esta será incorporada en su futuro. El mercado global es un sistema muy complejo que está en evolución rápida, pero como tal tiene propiedades emergentes que no son perceptibles por los agentes componentes del sistema. El sistema tiene su propia memoria, pero esta no es del todo accesible para los humanos que lo componen.

Antes de extender el modelo a la evolución futura del sistema financiero, voy a reseñar los resultados de la modelación según la Ley de potencias y la periodicidad logarítmica del crecimiento demográfico mundial y de la evolución de la productividad económica en la historia de la humanidad.

6. Globalización: población y producción económica

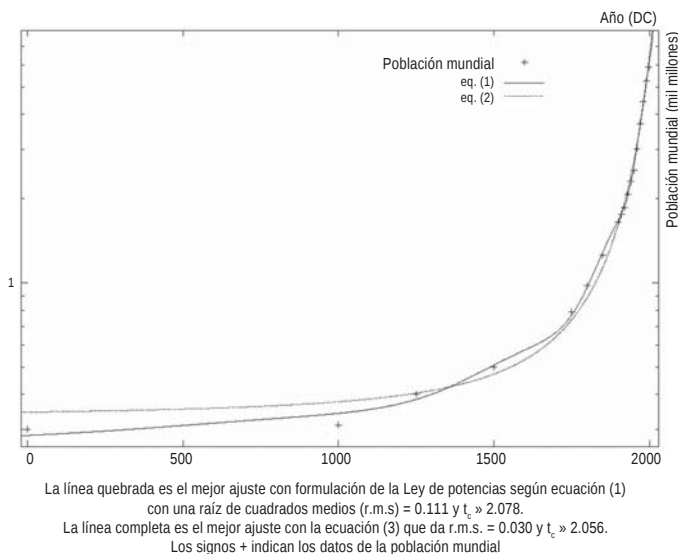
El proceso de la interconectividad creciente a lo ancho del mundo, en años recientes llamado globalización, es un proceso que se ha hecho más y más evidente en los últimos siglos; Eric Wolf (1987) ha desarrollado un análisis antropológico del proceso. Sornette y Johansen han extendido el modelo log-periódico al futuro crecimiento global en Demografía y Economía. Este punto es de importancia fundamental pues hace una ruptura con los modelos exponenciales de Malthus y de la mayoría de los demógrafos todavía hoy. Es útil reseñar un poco la historia de la idea, en los primeros años de la década del sesenta, Von Foerster y otros (Von Foerster y otros 1960, 1961; Von Foerster 1966) analizaron todos los datos disponibles entonces desde los tiempos paleohistóricos. Rechazaron el modelo de crecimiento exponencial y formularon un modelo del crecimiento demográfico global como una ley de potencias.

Ellos explicaron esto en términos de la capacidad humana para formar coaliciones a escalas siempre mayores en el curso del tiempo. Von Foerster ha identificado la invariancia de escala como una propiedad básica de las coaliciones humanas. En el curso de la historia los mismos principios estructurales de alianzas han sido aplicados para la formación de coaliciones a escalas siempre mayores y la mayor productividad resultante de esas coaliciones ha impulsado el crecimiento demográfico. Su modelo predijo una *singularidad* demográfica cuando la población global tocaría el infinito el 13 de noviembre de 2026. Como es de esperar esta predicción ocasionó una feroz polémica en los círculos científicos, incluso algunos demógrafos insistieron que era una broma, pero fue tomada seriamente por la prensa ya que expresó las inquietudes de mucha gente en los años sesenta. La idea de las singularidades no debe ser entendida solo como expresión matemática en la cual el denominador de la fracción se convierte en cero enviando la expresión total, en este caso a la población humana, al infinito. Cuando una singularidad sale de las ecuaciones, esta debe ser interpretada como una indicación de que algo importante está aconteciendo para el sistema en la vecindad de la singularidad. El tiempo de la ocurrencia de la singularidad es el tiempo crítico del sistema, el tiempo de su derrumbe, e indica que en este tiempo el sistema pasará a un nuevo estado. En el

mundo real no hay infinidades, por eso se refiere a las singularidades como *singularidades de estado finito*.

La tasa del crecimiento de la población mundial tocó su pico en 1970 —a 2,1% por año— y desde entonces hay una desaceleración. Sin embargo, esta desaceleración no contradice la predicción de la singularidad que va a ocurrir. Sornette (2003) y Johansen y Sornette (2001) han elaborado el análisis de Von Foerster para tomar en cuenta las variaciones en la aceleración mediante la modulación log-periódica. La base de datos usada fue la del Departamento de asuntos económicos y sociales del Fondo de Población de las Naciones Unidas (UNFPA). Contrastaron el ajuste de la curva log-periódica con la predicción exacta de la Ley de potencias. Tres parámetros fueron asignados a t_c , para los cuales analizaron la sensibilidad del ajuste de las curvas para mejor t_c . La mejor estimación da la singularidad al año 2052 ± 10 , como se puede ver en la figura 4. Si el crecimiento alcanzó la máxima aceleración en 1970, desde entonces a la fecha de la singularidad (~ 80 años) es solamente el 4% del tiempo total desde el año 0 a. de

Figura 4: Crecimiento de la población mundial



Fuente: Johansen y Sornette 2001a.

C, y 0,05% del tiempo desde el origen de la especie *homo sapiens* hace unos 140.000 años.

Aunque la tasa de crecimiento ha estado desacelerándose desde 1970, esto no significa que el estrés de la población global esté desapareciendo, solo estaría un poco atenuada. De hecho, esto es una indicación de que el patrón de crecimiento demográfico ha ingresado ahora a un periodo de transición en el cual algo muy grande está pasando. En los sistemas físicos este periodo está caracterizado por el *interjuego* entre las fuerzas de fricción y disipación, que suaviza las etapas finales en el camino hacia la crisis. En este último 4% del tiempo desde el Imperio Romano, la presencia de estos efectos señala que ahora estamos bien en el camino a alguna clase de nuevo régimen, si asumimos la supervivencia de la humanidad en el proceso. Ahora voy a bosquejar muy brevemente los resultados del modelo para el producto económico mundial y la evolución próxima del mercado de capitales.

Para desarrollar este argumento Sornette y Johansen se basan en un trabajo de Hanson (2000) sobre el crecimiento de la productividad económica. Hanson; a su vez; analiza los datos y las conclusiones de DeLong (1998) y otros investigadores sobre el PBI del mundo durante el último millón de años. El término PBI es usado aquí como una medida de la capacidad económica de las poblaciones asociadas con diferentes modos de producción, de modo que pueden ser comparados tanto los datos de sociedades no capitalistas como capitalistas. Hansen mismo demostró que la mejor inclusión del patrón de crecimiento se hace de acuerdo con la Ley de potencias, y que es muy similar al crecimiento poblacional con un buen ajuste al $t_c \gg 2050$. Sin embargo este investigador, como demógrafo, se siente muy incómodo con la idea de singularidades por las razones indicadas líneas arriba.

Hanson prefiere interpretar la curva como una secuencia de tres curvas de crecimiento exponenciales. Las curvas expresarían el crecimiento económico característico de los tres modos de producción económica: caza y recolección, agricultura e industrial. Supone que estos modos se siguieron el uno al otro pero con fases de transición con modos superpuestos. Para cada modo la tasa exponencial del crecimiento es cientos de veces más rápida que para el anterior. Se considera que el promedio

per cápita humano de consumo de alimentos es aproximadamente constante a lo largo de la historia, más o menos al nivel de subsistencia que es de alrededor de 40kcal/kg. de peso humano.¹⁷ Entonces, el enorme crecimiento en la productividad de alimentos está de alguna manera consumido en la elaboración de nuevos niveles de complejidad.

La consolidación política de la producción agrícola en sociedades es usualmente expresada en el registro arqueológico por el agrupamiento de la población en una jerarquía de tamaños de poblamiento. Se supone que esta jerarquía expresa la jerarquía socio-política que resulta de la coordinación y el control del mayor grado de colaboración que se requiere para sostener el sistema agrícola a gran escala o una jerarquía administrativa de coaliciones. Con el tiempo, la continua elaboración autoorganizada del proceso entero conduce a la emergencia de los sistemas estatales (Flannery 1998; Johnson y Earle 1987).¹⁸ En estos, el Estado coordina las actividades de grandes poblaciones distribuidas sobre amplias áreas y los avances tecnológicos retroalimentan la intensificación de la agricultura; lo cual hace aumentar la producción agrícola y esta, a su vez, acelera el crecimiento de la población. De esta manera, no todas las personas se dedican directamente a las actividades agrícolas. La jerarquía socio-política se hace siempre más compleja y más *decorada* por elaboraciones en la arquitectura, el artesanado y las actividades artísticas; el registro y la transmisión de la información deviene en una actividad que es siempre más importante. Nuevas formas de decoración tanto en lo personal como en el sistema, son inventadas e incorporadas. El sistema tiende a expandirse siempre más rápidamente hasta que es confrontado por constricciones internas o externas que generan el pase a una situación crítica. Las constricciones a menudo se dan en el acceso y la explotación de fuentes de energía y otros recursos que son necesarios para la manutención y la resiliencia del sistema, pero también resultan de la intensificación mis-

¹⁷ El problema de la obesidad en una gran porción de las poblaciones del mundo desarrollado es algo que ocurre solo hace pocas décadas.

¹⁸ Este patrón jerárquico también caracteriza los sistemas urbanos de los países modernos. Es importante señalar que la jerarquía urbana se distribuye como una ley de potencias (Pumain 2003).

ma.¹⁹ Esto puede tomar la forma de una rápida desagregación y colapso del Estado, su expansión o transformación en un imperio, o una profunda reorganización política y económica quizás en la forma de un movimiento religioso. Surgen también a menudo combinaciones de estos, que se entretejen en una dinámica autoorganizada (Marcus 1998).

Con la aparición del modo de producción capitalista industrial basado en la explotación de fuentes fósiles de energía barata, los sistemas políticos están reorganizados para conjugar y coordinar a una enorme población en redes cooperativas internacionales, pero sus dinámicas siguen el mismo modelo básico de los sistemas estatales agrícolas. Con la expansión de este sistema sobre el planeta entero, las constricciones críticas inherentes al proceso se hacen sentir más fuertemente; las constricciones del acceso a recursos se acentúan conforme a la tensión ambiental que resulta del calentamiento global y otros cambios climáticos, que en gran parte resultan del mismo proceso, como veremos más adelante.

7. La «madre de las crisis»

Teniendo en cuenta estas consideraciones generales podemos volver a tocar el sistema financiero en un contexto más amplio. Para analizar el futuro crecimiento financiero Johansen y Sornette centraron su análisis en el índice Dow-Jones (D-J) desde el año 1790 hasta cerca del 2000, pero también tomando en cuenta los otros mercados del mundo, incluyendo los latinoamericanos y peruanos. En todos estos se mostraban las mismas oscilaciones log-periódicas que modulan una aceleración según la Ley de potencias (Johansen y Sornette 2001, Sornette 2003: 366-377). La ecuación derivada predice que el índice Dow-Jones se elevaría del nivel de 11.000 a principios del 2000, a 38.000 en 2019 y a 100.000 en 2026. Citan

¹⁹ En la civilización Uruk de Mesopotamia —hoy día en Irak— este proceso pudo haber tenido un declive en la producción debido a la salinización de los suelos; pero el proceso es complejo e involucra una serie de factores diferentes.

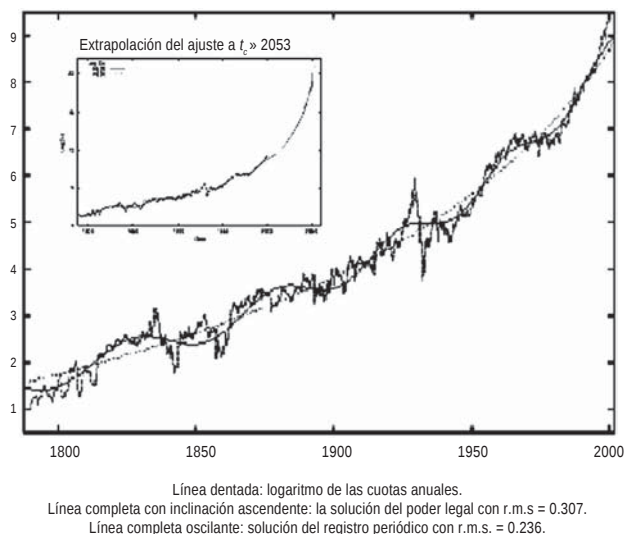
un número de economistas quienes han dado estimaciones compatibles con estas cifras pero con argumentos netamente económicos. ¡El punto crítico (la singularidad) para este proceso también se alcanza en el 2053! En la figura 5 veremos que las curvas con los mejores ajustes para la Ley de potencias y para la extendida ecuación log-periódica —basada en la ecuación 3— son graficadas contra el logaritmo de las cuotas anuales del D-J al año 2000. En la figura al interior de la figura ellas son extrapoladas para el tiempo crítico 2053, pero sin las oscilaciones finales (Sornette 2003).

Es decir que, las tres tasas impulsoras del sistema: el crecimiento demográfico, el crecimiento de la producción económica y el crecimiento de los precios de las acciones en la bolsa, convergen a un solo punto crítico a mediados de este siglo. Lógicamente, Johansen y Sornette interpretan la coincidencia de los tres puntos críticos como indicador de la fuerte interacción entre los tres fenómenos. El acoplamiento entre ellos es particularmente evidente en la correspondencia general de las oscilaciones autosimilares en el campo de la singularidad, y seguramente hay un efecto de *arrastré de ondas* que los entreteje. Las numerosas interacciones entre las tres trayectorias de desarrollo se relacionan con la evolución del conocimiento humano. El desarrollo del conocimiento tecnológico es controlado por el crecimiento poblacional, los conocimientos preexistentes y la producción económica (Boserup 1965, Hanson 2000). Esta relación es apoyada por trabajos recientes que muestran que el crecimiento del poder computacional es más rápido que el crecimiento exponencial especificado por la Ley de Moore: es un crecimiento según la Ley de potencias, tal como el modelo predice (Sornette 2003: 379).

Los resultados indican que el sistema mundial está acelerándose hacia una crisis de una escala nunca antes conocida, la madre de todas las crisis. El sistema global necesita urgentemente un profundo reordenamiento si se va a atenuar la catástrofe venidera. Sin embargo, al mismo tiempo hay una tremenda resistencia política y económica frente a cualquier propuesta del cambio real; incluso, esta resistencia parece estar aumentando en tanto que el número de problemas identificados aumenta. Sornette y Johansen proponen varios escenarios políticos que quizás puedan conducir al sistema mundial a otra trayectoria de desarrollo que no

voy a tratar aquí en este momento, regresaré a este punto después de ver algunos de los procesos implicados en el proceso de cambio del clima.

Figura 5: La evolución financiera D-J desde 1790 al 2000



Fuente: Johansen y Sornette 2001a.

8. Calentamiento global

Como un primer paso para relacionar el proceso del calentamiento global al modelo log-periódico y a sus resultados, revisaré brevemente algunas investigaciones que relacionan formalmente la teoría económica con los procesos termodinámicos y ecológicos. La Termodinámica es la ciencia que estudia la conversión de la energía de una forma a otra,²⁰ y hay dos

²⁰ En el contexto de este trabajo hay que entender el concepto de energía en términos más amplios de lo que normalmente se usa. La energía debe entenderse como algo que tiene la capacidad de efectuar trabajo, con la potencia de hacer trabajo. En Mecánica el trabajo se define como la transferencia de una cantidad de energía de un sistema físico a otro, y es

leyes fundamentales que gobiernan estas conversiones. La primera ley de la Termodinámica dice que la energía nunca se pierde: si una caloría de energía entra en un proceso, la misma cantidad sale. La segunda ley dice que en todo proceso de trabajo una parte de la energía²¹ siempre se degrada en entropía, de tal modo que la cantidad de trabajo que resulta es siempre menor que la cantidad de energía utilizada en hacerlo. Se puede pensar de la entropía como una forma de energía que es inútil o que no está disponible para trabajar en un sistema dado. Al realizar un trabajo, la entropía es disipada en el ambiente del sistema.

Nicolás Georgescu-Röegen elaboró un modelo económico que consideró la relación entre el sistema económico y el ambiente de manera formal. Él caracterizaba la relación en términos del intercambio de entropía (Georgescu-Röegen 1971, 1978). Un excelente libro de divulgación que explica sus ideas fue escrito por J. Rifkin (1989). El modelo fue después ampliado por Faber (1987) y muchos otros científicos.

Las economías son sistemas termodinámicos abiertos que extraen materias y energías del ambiente para crear bienes y desgastes de alta entropía. Los desgastes, que incluyen los productos gastados, salen finalmente del sistema económico y son descargados en el ambiente. Una porción de la energía del rendimiento del proceso económico construye orden y complejidad y representa una inversión en el sistema (Templett 1998). Es decir que los sistemas económicos igual que los sistemas complejos físicos, químicos, biológicos y ecológicos son estructuras disi-

expresado en términos de la transferencia de una fuerza sobre una distancia. Cuesta un julio de energía aplicar una fuerza de un newton sobre un metro de distancia. Para nuestros propósitos, sería mejor decir que todo cambio en la organización material del mundo es una expresión de trabajo y que involucra una transferencia de energía entre dos sistemas. Así, el aumento de la temperatura de un centímetro cúbico de agua por un grado Celsius es una expresión del trabajo que resulta de la transferencia de una caloría (=4,187 julios) de energía de un sistema con más calor —el fuego— a otro con menos calor —el agua—, (Earls 2004).

²¹ Se ha sugerido que es más conveniente pensar a la energía con potencial de hacer trabajo como la *exergía* de la Termodinámica. La *exergía* designa la forma de energía que puede convertirse en trabajo. Está más cerca de nuestro sentido común de energía, energía que realmente está disponible para transformarse en trabajo y degradarse en el proceso (Odum 1996: 267).

pativas²² que consumen energía de su medio ambiente, aumentan la complejidad interna —reduciendo su entropía interna— y expulsan la alta entropía como desgaste material y calor.

En otras palabras: los sistemas económicos importan recursos de baja entropía del ambiente, estos son transformados en productos y la energía de muy alta entropía que se genera en el proceso es disipada al ambiente otra vez. En los procesos de manufactura industrial, la cadena de etapas en la producción de los alimentos deviene siempre más larga y la entropía disipada crece con cada vínculo en la cadena; en cada vínculo, el proceso es subsidiado con nueva energía concentrada y la entropía generada es botada al medio ambiente. Esta energía subsidiaria es extraída del ambiente por adicionales procesos industriales. En todos estos procesos se producen también desechos que son otra vez botados al ambiente como alta entropía y por tanto se añaden al total de entropía generada y exportada por el sistema. Con las altas tasas de crecimiento demográfico y de producción económica además del agotamiento continuo de las reservas de energía fósil de acceso fácil, la tasa de eliminación de la entropía alta al medio ambiente se acelera.

Como ya hemos visto, en el campo del punto crítico hay una disipación de energía como fricción en la transición al punto crítico; la fricción y las otras formas de energía disipada en la transición son manifestaciones de la generación de entropía en el sistema. El mundo es un sistema físico y los sistemas económicos operan en un ambiente físico en los que producen cambios. El sistema económico-social global se mantiene a sí mismo efectuando continuos cambios, siempre mayores, en el ambiente físico terrestre. Todos los procesos que está conduciendo el sistema mundial en su tránsito por el campo de la singularidad están fuertemente unidos. La tasa del uso de energía en el sistema y su devolución al ambiente

²² Un sistema disipativo (Prigogine 1985) es un sistema abierto alejado del equilibrio termodinámico que intercambia materia, energía y entropía con su medio ambiente, de tal manera que se genera y se mantiene una organización compleja. En el modelo de Prigogine la autoorganización hacia una mayor complejidad es un proceso inherente a los sistemas disipativos.

como entropía se acelera de acuerdo con la misma Ley de potencias que gobierna la transición del sistema.²³ Es decir que la polución aumenta según la Ley de potencias.

La polución es una forma de materia o energía degradada y desordenada que es exportada al medio ambiente y es dañina para el medio y la vida. Mayormente está generada por actividades humanas. Un barril de petróleo es energía útil y disponible, el mismo petróleo dispersado de manera desordenada en una laguna es polución. La polución como desorden es una manifestación de la alta entropía que es exportada al medio ambiente y es una medida de la energía que ya no es disponible para actividades económicas posteriores (Georgescu-Roegen. 1971, 1978; Faber y otros 1996). La polución es una expresión de la degradación de aquellos componentes del medio ambiente, y de los ecosistemas sostenidos por este, que son usados en el proceso de extracción de recursos y producción de bienes pero que no son incorporados en los productos finales. La degradación expresa el hecho de que los ecosistemas del medio ambiente no pueden reciclar estos sobrantes en la escala del tiempo en el que se han producido, así como lo que acumularon como polución. El barril de petróleo en sus depósitos subterráneos es el resultado de millones de años de trabajo geobioquímico; al derramarse en el lago necesita poco tiempo para destrozar este ecosistema pero se necesitará cientos de años para reciclar la polución. En la Ecología, la expulsión de calor al medio ambiente es llamada polución de calor.

Los sistemas económicos han importado siempre baja entropía del Sol y exportado alta entropía al medio ambiente de la Tierra como polución y calor (incluso el fogón de cocinar produce calor y humo). Hasta el siglo XIX el medio ambiente pudo irradiar el exceso de calor de la actividad humana al espacio, así como los demás sistemas ecológicos. El sistema industrial ahora está generando calor y gases en cantidades suficientes para interferir con los ciclos de procesamiento geobioquímico. El dióxido

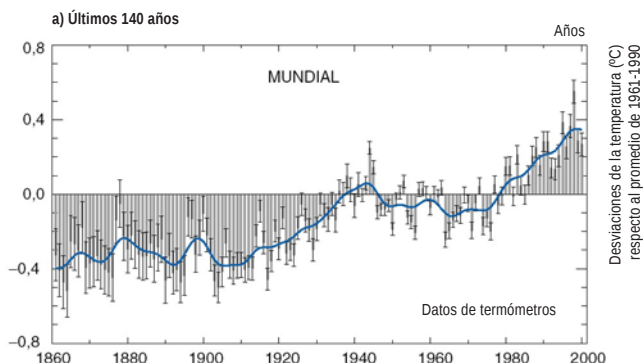
²³ No veo ninguna utilidad en distinguir aquí entre entropía termodinámica y entropía estadística para describir el proceso; las dos son manifestaciones de la fricción operativa.

de carbono es un producto natural de la respiración en los ecosistemas y es reciclado por la fotosíntesis para la producción de nueva materia orgánica en esos sistemas. El CO_2 es un *gas invernadero* porque bloquea la reemisión de la radiación térmica infrarroja en el espacio al igual que el vidrio en los invernaderos para plantas.

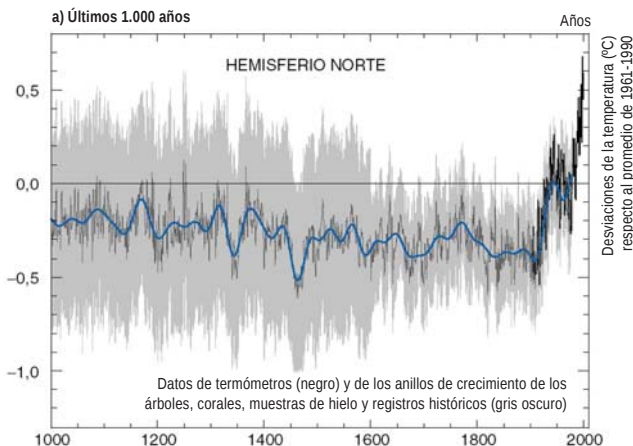
El último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC 2001a) y muchos científicos de otras organizaciones de investigación, como por ejemplo el Consejo de Investigación Nacional de los EE.UU. (National Research Council 2001 y J. Hansen y otros 2000), han proyectado el incremento de la temperatura entre 2°C y 6°C para el final del siglo XXI de acuerdo con los diferentes pronósticos de la actividad industrial, del crecimiento poblacional y de las políticas gubernamentales. El impacto de las emisiones y del calentamiento en otros aspectos del clima mundial es estimado para diferentes escenarios; estos incluyen niveles de superficie del mar, patrones de lluvias y sus distribuciones, sistemas ecológicos y sociedad humana (Walker y Steffen 1997). La modelación del sistema climático es sumamente difícil por su complejidad. Existen complejas redes de retroalimentación que operan entre los diferentes factores tanto en la misma escala como entre escalas. Las retroalimentaciones son tanto positivas como negativas, y muchas de ellas pueden cambiar de una forma a otra bajo diferentes circunstancias. Por lo tanto, la expresión y la magnitud de los impactos son necesariamente no lineales, haciendo muy difícil la planificación de estrategias efectivas para afrontar el cambio climático.

Los gráficos de la figura 6 están tomados del informe IPCC del 2001 y están incluidos aquí como referencia. Muestran la temperatura global creciente en los últimos 140 años y los últimos 1000 años.

Figura 6: Las variaciones de la temperatura de la superficie de la Tierra en los últimos 140 años y en el último milenio



La temperatura de la superficie de la Tierra se expone anualmente (barras grises) y aproximadamente por decenio (curva negra, curva anual filtrada que suprime las fluctuaciones por debajo de las escalas temporales próximas). Hay incertidumbres en los datos anuales (las barras negras muy finas representan el intervalo de confianza del 95%) debido a las lagunas de datos, a las incertidumbres y errores instrumentales aleatorios, a las incertidumbres en las correcciones de distorsiones en los datos de la temperatura de la superficie del océano y también en los ajustes por la urbanización. En los últimos años, la mejor estimación indica que la temperatura promedio mundial de la superficie ha aumentado $0,6 \pm 0,2^\circ \text{C}$.



Asimismo, las variaciones anuales (curva gris oscuro) y las variaciones promedio en 50 años (curva negra) de la temperatura promedio de la superficie en el hemisferio norte durante los últimos 1000 años se han reconstruido a partir de datos indirectos calibrados con respecto a los datos del termómetro. El intervalo de confianza del 95% en los datos anuales se representa por medio de la zona gris clara. Estas incertidumbres aumentan en tiempos mas distantes y siempre son muchos mayores que en el registro instrumental debido al uso de datos indirectos relativamente dispersos. A pesar de ellos el ritmo y la duración del calentamiento en el siglo XX han sido mucho mayores que en cualquiera de los nueve siglos anteriores. También es probable que los años noventa y el año 1998 hayan sido respectivamente el decenio y el año más calurosos del milenio.

Fuente: IPCC 2001a, p. 4.

Nuevas interacciones no lineales están siendo descubiertas continuamente, y muchas de estas señalan que los esfuerzos humanos para controlar el cambio climático resultan en situaciones *no-win* (todas las opciones tienen salidas indeseadas). Esto es importante porque indica que el proceso está desarrollando propiedades emergentes de autoorganización que quizás escapen al control humano. Me referiré solo a tres de estos.

- 1) Un efecto no lineal es visto en los resultados de varios convenios sobre limitaciones en las emisiones sulfurosas. En 1979, la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE, por sus siglas en inglés) implementaba la Convención sobre el Rango Límite de la Polución —el Club de los 30%—, por la que las emisiones permitidas fueron reducidas en 1994 y 1998. En conjunto, la estimación de la caída de las emisiones del dióxido de sulfuro en Europa es de 25-30% entre 1980 y 1990, y de 40% para el año 2000. Más caídas en las emisiones de dióxido de sulfuro son esperadas durante la próxima década. Estos acuerdos fueron implementados debido al daño de la salud de la gente, y del problema de la lluvia ácida y sus visibles efectos sobre los bosques del hemisferio septentrional. Sin embargo, estos sulfatos tienen también un efecto de enfriamiento sobre la atmósfera —son gases anti-invernadero—, por lo que su eliminación acelera el calentamiento (Centro Nacional para la Investigación Atmosférica).
- 2) Se habla mucho de la reforestación como una medida para combatir el calentamiento global pues las plantas absorben el CO_2 para producir biomasa. La efectividad de esta estrategia fue fuertemente cuestionada por los resultados de un extensivo experimento de Gill y otros (2002). El experimento estuvo conducido a determinar la relación entre la absorción de la vegetación de diferentes concentraciones de CO_2 atmosférico, y la presencia y conducta de otros nutrientes en el proceso. Se encontró que hasta una concentración de $\sim 400\text{ppm}$ la producción de biomasa por parte de las plantas se incrementó en respuesta al aumento de CO_2 . Hasta este nivel, la absorción de CO_2 es asociada no linealmente con una reducción en el nitrógeno disponi-

ble en el suelo para la producción de nueva biomasa vegetal. Por encima de este nivel el N_2 se agota y la absorción cesa; las plantas están saturadas con carbono. Ya que el nivel actual es alrededor de 379 ppm, esto significa que los proyectos de reforestación anti invernadero están llegando a sus límites efectivos. Entonces, el nivel de CO_2 atmosférico se acelerará en poco tiempo, y la temperatura también.

- 3) El tercer escenario *no win* está presentado por Pearce (2001) como una informada especulación basada en algunos efectos químicos atmosféricos que no han recibido mucha atención. El radical hidroxilo OH^+ es muy reactivo y combina rápidamente con los gases invernaderos en la atmósfera, convirtiéndolos en químicos solubles que vuelven a la Tierra. Es una suerte de detergente que limpia la polución. Pearce arguye que la concentración del OH^+ caerá rápidamente como resultado de la eliminación de los clorofluorocarbonos (CFC) bajo la Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono. Estos CFC han sido usados en un gran número de procesos industriales y luego expulsados al aire. Al llegar a la atmósfera superior dieron lugar a los grandes agujeros en la capa de ozono. El OH^+ es producido por la acción de la radiación ultra violeta (UV) en el vapor de agua de la atmósfera. En 1985 se encontró que los niveles de OH^+ habían caído en alrededor del 25% desde los años 50, probablemente abrumándose por la creciente polución. Hacia fines de la década de los 80, sin embargo, la concentración de OH^+ empezaba a recuperarse, y Pearce relaciona esto a la súbita e imprevista disminución del ozono en las troposferas polares (los agujeros de ozono). Esto dio lugar a los altos niveles de radiación UV, que no solamente produjeron una ola de cáncer a la piel sino también aumentaron la concentración de OH^+ a un nivel suficiente como para limpiar una parte apreciable de la incrementada polución atmosférica. Por lo tanto se disminuyó la velocidad de las acumulaciones de los gases invernaderos CO_2 , CO , CH_4 , y los óxidos de nitrógeno, y también la tasa del calentamiento global. El IPCC había advertido que el metano atmosférico, CH_4 , un gas invernadero extremadamente poderoso, pudo haber aumentado

en 50% en el medio siglo siguiente. Cuando el agujero de ozono desaparezca, esto es si el actual programa internacional sobre los CFC funciona como esperamos, la entrada de la radiación UV caería a un nivel donde produciría mucho menos radicales hidroxilos. En esta situación el incesante crecimiento de las emisiones contaminantes rápidamente incrementará y agotará el OH^+ restante. Con la ausencia de hidroxilo los niveles de gases invernadero aumentarán a una tasa acelerada —y así también el calentamiento global.

Existe abundante evidencia empírica reciente de que el planeta está calentándose más rápidamente que lo esperado anteriormente, y hay muchos otros ciclos de retroalimentación positiva. Un nuevo estudio de los científicos de la Unión Europea tomando en consideración el tipo de mundo promulgado por la actual administración norteamericana, eleva las actuales proyecciones del incremento de CO_2 de 1,8ppm/año a 2,1ppm/año. Esto disminuye el tiempo para el doblamiento del CO_2 atmosférico a menos de 30 años desde ahora, con la consecuente aceleración del calentamiento (Pearce 2003: 8).²⁴

Estos casos ilustran la no linealidad del proceso del calentamiento y de las dificultades implicadas en su control. Como un producto *colateral* del proceso económico, su dinámica seguiría la Ley de potencias y estaría también en la etapa transitoria en camino a la singularidad de estado finito. Esto puede ser llamado el Escenario Venus. Muchos científicos han aceptado este escenario pesimista para el clima de la Tierra. En una

²⁴ Es significativo que en los últimos años —2002, 2003 y 2004— la concentración de CO_2 atmosférico se ha acelerado, pasando en agosto de 2004 la tasa de 3ppm/año (Pearce 2004). Esta tasa llegará a los 400 ppm en el año 2011. Esto podría deberse a la quema de los grandes pantanos turbosos en Borneo, Indonesia, por parte de los campesinos que queman los bosques para obtener nuevas tierras para la agricultura y en el proceso queman también los enormes depósitos de turba. Esta práctica se ha acelerado desde 2002 y fuegos enormes han sido reportados en diarios peruanos. Otra posibilidad es que las poblaciones de insectos herbívoros han explotado en los bosques fríos de Canadá y Alaska de Siberia y del norte de Europa debido al calentamiento de la Tierra. Estos están devorando enormes cantidades de follaje y matando los árboles en grandes áreas. La vegetación muerta no absorbe nuevo CO_2 y puede desprenderse de la biomasa en descomposición. Muchos otros fenómenos que es imposible mencionar aquí están ocurriendo.

entrevista de televisión el cosmólogo físico Stephen Hawking ha planteado que un nivel suficientemente alto de concentración de gases invernadero no dejará ingresar suficiente luz solar de la atmósfera para sostener la fotosíntesis; las plantas y los animales morirían poco a poco y la atmósfera de la Tierra se convertirá en algo similar a la de Venus, cuya temperatura se remonta a $\sim 300^{\circ}\text{C}$, la temperatura de la Tierra antes de la expansión de la vida.

Otro escenario ha sido popularizado por la película *El día después de mañana*. El calentamiento de la Tierra descongela el hielo circumpolar en cantidades suficientes para que el agua dulce resultante desalinice significativamente los mares del norte. La desalinización reduce la densidad de las aguas y estas ya no se van al fondo, y así se interrumpe la circulación termohalina del océano, que trae las corrientes de agua tibia desde el sur, que producen el clima moderado y agradable para los países que circundan el Atlántico Norte. La interrupción de esta circulación, y con ella la Corriente del Golfo, arrojaría a gran parte del hemisferio norte a una nueva Edad de Hielo. Hay evidencia que un evento de esta naturaleza dio lugar al enfriamiento drástico del Younger Dryas hace unos 12.000 años (Joos; Plattner, Stocker y otros 1999; Broecker 2003).

En ambos escenarios los hielos árticos y antárticos descongelan y la investigación más amplia y reciente (Corell 2004) concluye que la capa polar del norte está calentándose dos veces más rápido que el promedio del planeta. El calentamiento global es un hecho, pero es tan complejo que la modelación del proceso entero en detalle no es posible con los medios disponibles ni ahora ni en un futuro cercano.

He argumentado sobre una relación sistémica del calentamiento global con el acelerado crecimiento de la economía mundial por razones teóricas y también prácticas. Al tratar el calentamiento como la manifestación de la entropía generada en la dinámica del sistema económico global, se puede construir un modelo del proceso total que no requiere un enorme poder de computación. Sin embargo, queda como una hipótesis que necesita someterse a muchas pruebas. De acuerdo con el argumento, la tasa de calentamiento seguiría el mismo patrón log-periódico que los otros crecimientos que Sornette y sus colaboradores han elucidado. Las curvas de la figura 6 tienen una semejanza general con este patrón. El

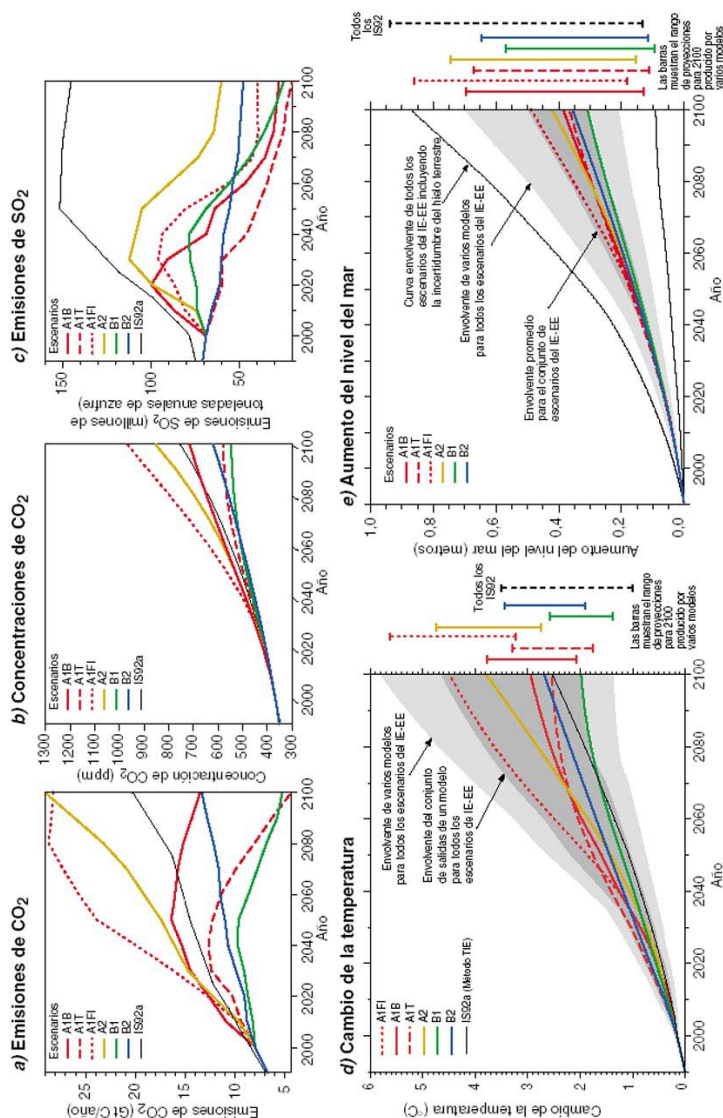
incremento de la temperatura en el siglo pasado parece demasiado escarpado para un crecimiento exponencial y las oscilaciones en la curva son consistentes con el modelo log-periódico. Sin embargo, todavía estamos lejos de entender la denominada mecánica operativa del sistema total. Por ejemplo, la energía que se genera en la economía mundial es solo cerca del 1% de la energía de la atmósfera terrestre, entonces el motor del proceso es la interferencia en los flujos naturales de la energía y no en la cantidad de calor generado (Karl y Trenberth 2003).

El incremento de la temperatura atmosférica está asociado a una pendiente creciente en el número de los llamados eventos extremos tales como inundaciones, heladas, sequías, quema de bosques, ciclones, deslizamiento de lodo y otros. Hay un consenso general de tipo teórico que plantea que estos eventos extremos deben estar aumentando. Fuentes de las compañías de seguros sostienen que el número de desastres naturales relacionados con el clima han aumentado en un 500% en los Estados Unidos durante los últimos 30 años, y a esto se debe el aumento en 15 veces del pago de daños desde 1960. Sin embargo, los datos empíricos son calurosamente disputados y es difícil separar la ciencia de las visiones del mundo de aquellos que más escriben; hay algunos que todavía insisten ruidosamente que no hay influencia humana en la presente conducta climática.²⁵

Los gráficos de la figura 7 fueron desarrollados por la IPCC en 2001. Presentan seis familias de modelos de escenarios para el desarrollo industrial-económico en el siglo XXI con las emisiones de gases invernadero asociados con ellos. Las emisiones entrópicas asociadas a cada escenario de desarrollo varían ampliamente según las proyecciones políticas y económicas para el futuro. Se ha estimado la tasa de calentamiento de acuerdo con las emisiones asociadas durante este siglo mediante simulaciones de cada escenario.

²⁵ Es interesante notar que todavía hay un pequeño grupo vociferante de personajes que proclaman que todo el consenso científico de la participación humana en el calentamiento global tiene un afán casi subversivo. Uno de ellos, Michael Crichton, a lo mejor estará haciendo una superproducción cinematográfica para combatir las llamadas *ideas peligrosas* de la película *El día después de mañana*.

Figura 7: El clima mundial del siglo XXI según las proyecciones de los 6 escenarios en respuesta a los cambios y la respuesta del sistema climático a las actividades humanas



Fuente: IPCC 2001a, p. 11.

Los 6 escenarios graficados en la figura 7 son:²⁶

- A1F1 fuentes de energía fósil.
- A1T de origen no fósil.
- A1B con fuentes fósil y no fósil balanceados.
- A2 un mundo heterogéneo con autosuficiencia regional; un crecimiento demográfico e innovación tecnológica promedia más lenta.
- B1 un mundo homogéneo con una innovación tecnológica rápida hacia una economía de la información y fuentes de energía limpias y sostenibles.
- B2 semejante a B1 pero con desarrollo regional heterogéneo.

Es claro que el escenario A1F1, que representa más o menos la continuación del modelo de desarrollo todavía dominante, es asociado con la mayor tasa de calentamiento y la mayor producción de entropía. Las energías fósiles son las fuentes de energía más atractivas para los que detentan el poder en el sistema actual. Son de explotación fácil con la tecnología actual, son todavía baratas y no necesitan mayor nueva inversión. Estamos llegando, o hemos llegado, al pico de la producción petrolera y después de poco tiempo la extracción va a ser más difícil y costosa, sin embargo seguirá siendo la fuente de energía más atractiva para el crecimiento económico. Como he sostenido en otra parte, la política económica y militar de los Estados Unidos es claramente orientada al control de un mundo dependiente del petróleo y el gas natural (Earls 2004).

²⁶ El grupo A1, está caracterizado por un rápido crecimiento económico y un crecimiento poblacional que llega a su máximo por los años 2050 para luego decrecer.

9. Cambio climático y misticismo político

En caso que el calentamiento global siga el modelo log-periódico, como producto de la dinámica del sistema global estaremos encarando problemas adicionales. No es suficiente la publicación de una predicción verdadera de una inminente catástrofe en un futuro cercano para lograr convencer a la opinión política mundial de la urgencia de acciones racionales para enfrentarlo. Debido a la mayor frecuencia e intensidad de los eventos extremos —inundaciones, sequías, ciclones, etc.— asociados con el calentamiento, la percepción del daño ha sido tomada en cuenta seriamente en el acuerdo de Kioto. Este tratado impone un límite para la emisión de los gases invernadero al nivel de las emisiones de 1990, cuando las emisiones estuvieron todavía solamente alrededor del doble de sus niveles preindustriales. Pero el gobierno del principal país emisor²⁶ de los contaminantes del mundo se niega a firmar dicho acuerdo. Primero fue el Congreso de los Estados Unidos el que rehusó ratificarlo, luego el presidente Bush hijo proclamaba que de alguna manera dañaría al crecimiento económico de ese país y por tanto no podía ser considerado. Sin embargo, la razón de fondo parece ser que Bush y sus asociados *creen religiosamente* que su tecnología podrá imponerse a cualquier consecuencia del cambio climático en su economía nacional. La retroalimentación positiva entre el calentamiento global y el proceso económico está claramente expresada en este estilo de pensamiento: cualquier perturbación a la economía industrial debe ser arreglada con más tecnología del mismo sistema, y este calentamiento global es una perturbación exógena que resulta de causas naturales no especificadas.²⁷

Como argumentaba antes, cuando las dinámicas internas de un sistema estatal lo conducen hacia un punto crítico, su comportamiento viene a ser más y más entretejido a las dinámicas del campo del estado

²⁶ Los EE.UU. con un 4% de la población mundial emite el 25% de las emisiones de polución gaseosa.

²⁷ A fines del 2004 había unas débiles señales de que la Casa Blanca estaría considerando la idea que los humanos podrían tener algo que ver con el calentamiento global, pero solo en los últimos 30 años.

finito de la singularidad. El actual empuje de los Estados Unidos al imperialismo del viejo estilo militar en gran parte está basado en la creencia de que la supervivencia en los años venideros depende de la habilidad para ejercer suficiente fuerza militar sobre otros países para el control de los recursos, particularmente de los recursos energéticos. Esto es, la supervivencia de los Estados Unidos tal *como es*, depende de su control militar del mundo tal *como es*, pero que este control de alguna manera mística traiga libertad y bienestar para los pueblos controlados es un fundamentalismo extremo. Hay bastante evidencia de que este pensamiento está expresado por los preceptos de los Estados Unidos y por sus seguidores en otras partes del mundo, como una suerte de mensaje casi religioso. No sabemos hasta qué grado el pensamiento mesiánico influye en la estrategia político-militar de la Casa Blanca pero sí hay movimientos sectarios que promulgan un papel bíblico para su país en base de ciertos textos en las *Revelaciones de San Juan Bautista*, cuyos miembros votaron casi exclusivamente para Bush y el partido republicano en los últimos comicios. Por ejemplo, los sionistas cristianos creen que los Estados Unidos tienen que apoyar a Israel para apoderarse de toda las tierras bíblicas en preparación para el segundo advenimiento de Jesucristo.²⁸ Creencias como estas probablemente han tenido influencia en muchos afanes imperialistas a lo largo de la historia. La interrogante de por qué los Estados Unidos se han encontrado en este camino de negación en lugar de las muchas alternativas racionales que están indicadas por la ciencia no puede ser contestada aquí. Además, Estados Unidos es solo el más reciente de una larga secuencia de imperios europeos que han conducido el proceso de la globalización capitalista (Wolf 1987). Se trata de un proceso histórico que ha involucrado la participación de una multitud de estados-actores y cuyo comportamiento emerge de las interacciones entre todos. Pero es importante entender las fuerzas que actúan en los Estados Unidos, dado su peso en la actual situación crítica del mundo.

²⁸ Estos y otras sectas de la misma índole hacen campañas bien financiadas para reclutar adeptos en el Perú y en todo el Tercer Mundo.

10. El colapso de civilizaciones

En años bastante recientes ha habido un gran resurgimiento del interés sobre la problemática del colapso de civilizaciones, y ello se debe en gran parte a la inquietud de los científicos y no científicos acerca del futuro del sistema global actual. Ya no es un problema de interés solo de los arqueólogos e historiadores. Como dice el físico Sornette:

La historia humana como una totalidad ha sido caracterizada por una tendencia inexorable hacia niveles más altos de complejidad, especialización y control sociopolítico; el procesamiento de mayores cantidades de energía e información; la formación de poblamientos más grandes, y el desarrollo de tecnologías más elaboradas y eficientes. Sin embargo, hay un cuerpo creciente de investigación que sugiere que la complejidad causada por la alta tecnología podría ser la ruina de la humanidad. Por ejemplo, los mayas de las tierras bajas al sur del Petén dominaron a América Central hasta mediados del siglo IX. Construyeron sistemas elaborados de irrigación para sostener a la población creciente que fue concentrada en ciudades de siempre mayor tamaño y poder, con la construcción de templos y palacios bien ornamentados, un gran florecimiento de las artes y las ciencias, y con el paisaje modificado y transformado para la agricultura. La sobrepoblación y la sobreconfianza en el riego fue un factor que condujo a los maya a la vulnerabilidad del fracaso: el acontecimiento que gatilló el colapso habría sido una sequía larga que comenzó cerca de 840 d. de C. Entre los muchos factores, como guerras y pestes, que contribuyeron a los colapsos de las sociedades antiguas, parecen haber dos causas principales: demasiada gente y no suficiente agua dulce. Como consecuencia la civilización se hizo vulnerable al estrés ambiental tal como una sequía prolongada o un cambio de clima. Las sociedades parecen haber contribuido a su propio ocaso por animar el crecimiento demográfico a niveles que conllevan las semillas de su propia destrucción por medio de la destrucción de sus tierras [...] El imperio de Akkad en Mesopotamia, el Reino Viejo de Egipto, la civilización del Valle del Indus en la India, y las sociedades tempranas en Palestina, Grecia y Creta colapsaron en una sequía catastrófica y en un enfriamiento de la atmósfera entre 2300 y 2200 años a. de C. (Sornette 2003b : 384-385 Trad. John Earls).

En el curso de su historia, las sociedades tienden continuamente a aumentar la complejidad de todo aspecto de la vida sociocultural. Según Tainter (1996), la complejidad social puede entenderse en términos del

tamaño de la sociedad, el número y la diferenciación de sus partes, la variedad de roles especializados, el número de personalidades sociales reconocidas, y la diversidad de mecanismos que hay para organizar todos estos en una totalidad coherente y operativa. Los problemas que ocurren tienden a resolverse mediante la elaboración de la complejidad sociocultural en los dominios asociados con esos problemas. Asimismo, los dominios interactúan entre sí para aumentar la complejidad de la totalidad. Al mismo tiempo que la sociedad aumenta su complejidad, tiene que invertir más en la producción de recursos, el procesamiento de información, la administración y la defensa. Como en todo sistema disipativo, la manutención misma de la complejidad exige el gasto continuo de energía. Tainter arguye que en un primer tiempo los beneficios de estas inversiones parecen muy favorables, pues abren nuevos medios y recursos de acceso fácil y no demandan mucha energía. Sin embargo, a la vez que las tensiones aumentan en la sociedad, las soluciones fáciles y baratas no bastan y las inversiones se hacen cada vez más complejas y costosas. En el tiempo se llega a una situación de rendimientos decrecientes en la que hay que invertir cada vez más pero los beneficios son cada vez menores; la vulnerabilidad del sistema se incrementa y al fin se desploma. Tainter define al desplome (o colapso) como una repentina pérdida de complejidad sociocultural y una transformación completa del modo de vida. En el Perú el colapso del Imperio Wari en el siglo IX es un buen ejemplo de esto.

Al parecer, las sociedades tienden a observar el deterioro de la vida con resignación y no toman las acciones correctivas apropiadas. Dice Tainter:

A la vez que se hace más visible a los miembros y a los administradores de una sociedad compleja que las bases de sus recursos están deteriorándose, sería razonable presuponer que se estén tomando algunos pasos racionales [énfasis suyo] para atender el problema [...] Si una sociedad no puede enfrentar el vaciamiento de sus recursos [...] entonces las preguntas más interesantes conciernen a la sociedad, y no a los recursos. ¿Cuales son los factores estructurales, políticos o económicos en una sociedad que impiden una respuesta apropiada? (Tainter 1988:50 citado en Janssen, Kohler y Scheffer 2003: 722 Trad. John Earls)

Como ya hemos visto, la complejidad tiende siempre a aumentar y a demandar mayor inversión de tiempo y energía, y su manutención se hace más costosa. En las sociedades preindustriales no hubo nuevas fuentes de energía para potenciar las innovaciones tecnológicas como ha habido en el mundo moderno —para todo aumento en el uso de energía la gente tenía que trabajar más duro—. Muchos antropólogos han llamado la atención sobre el hecho de que los miembros de sociedades agrícolas complejas tienen que invertir mucho más tiempo en trabajo para su subsistencia que los miembros de sociedades más simples, como las bandas de forrajeros (Sahlins 1972).

Entonces siempre hay una natural resistencia frente a la introducción de nueva complejidad, aunque en muchos casos no hay otra solución para los problemas. Por ejemplo, las comunidades campesinas andinas solo han podido mantenerse como sistemas viables bajo los regímenes coloniales y republicanos mediante la conformación de una organización social compleja de trabajo para la minimización del riesgo ecológico. Los fundamentos de esta organización fueron elaborados por las sociedades andinas autóctonas como una adaptación exitosa al ambiente agreste de los Andes. No hay otra región del mundo donde se han generado sistemas estatales adecuados a un ambiente de tanta incertidumbre y heterogeneidad. La invasión española introdujo un sistema estatal adecuado a un ambiente mucho más homogéneo, pero este sistema no es nada adecuado a los Andes. Entonces se generó en la población una nueva dinámica de adaptación que ha conducido a las actuales comunidades andinas con su particular manera de enfrentar los problemas (Earls 1998).²⁹

Pero, ¿por qué la sociedad sigue invirtiendo en las mismas viejas soluciones cuando los costos se incrementan mucho y los beneficios poco? Janssen y Scheffer (2004) y Janssen, Kohler y Scheffer (2003) presentan un modelo basado en el efecto *sunk cost* (costo hundido), que ha sido estudiado por muchos economistas. Según este, las personas a

²⁹ Los comuneros andinos tienen que invertir más horas en el trabajo agrícola que los campesinos de países de ambientes más homogéneos. Sin embargo, la compleja organización de su trabajo ha dado lugar a una optimización de la mano de obra que no se habría conseguido con una organización laboral de tipo europea (Golte 1980).

menudo basan sus decisiones económicas en las inversiones pasadas y no en la expectativa de beneficios futuros. Pero de acuerdo con la teoría económica de decisión racional, la gente no debe dejarse influir por la inversión anterior sino solo por los costos y beneficios futuros de las opciones disponibles. Los habitantes de una casa vieja y grande que ellos mismos han construido o heredado, y en la que han invertido mucho tiempo y recursos para reparar y mantener, se resisten a menudo a abandonarla, a pesar de que los costos de su mantenimiento son siempre mayores. La gente que por generaciones está viviendo en una ciudad no quiere trasladarse a otro sitio mejor situado, aunque sienta que en la ciudad actual escasean los recursos o se está sujeto a constantes desastres ambientales.

Janssen y sus colaboradores sostienen que muchos de estos patrones irracionales de comportamiento de las sociedades complejas frente a deterioros anticipados pueden explicarse en términos del efecto *sunk cost*. La sociedad continúa empleando los métodos probados y confiables para la resolución de sus problemas.³⁰ Ya se ha invertido mucho tiempo y energía en el desarrollo de esos métodos y estrategias, y mayormente han funcionado de alguna manera. De esta manera, la continua creencia actual en un paquete tecnológico basado en la energía fósil de combustión interna, a pesar del agotamiento de los recursos necesarios y de su impacto destructivo en el sistema mismo, en parte se explicaría por el efecto del *costo hundido*. Este efecto sin duda juega un papel en la crisis actual en el sistema global, pero, como ya he señalado en la sección previa, la creencia mística en esa tecnología hundida exagera y amplifica su uso y su impacto. La mitificación del costo hundido es más extendida en los Estados Unidos

³⁰ Como dice el dicho: «más vale malo conocido [...]»

³¹ En el contexto actual del pico de petróleo (*peak oil*) es significativo que la Casa de Representantes del Congreso de los EE.UU. esté redactando una nueva Ley de energía, en la cual se niega cualquier reducción del consumo norteamericano de petróleo. Esta legislación hace recordar la del gran rey Knut de Dinamarca, Noruega e Inglaterra en el siglo X, quien para demostrar su gran poder universal se paró en la orilla del mar y mandó que no entrara la marea. La legislación estadounidense tendrá la misma efectividad que el decreto del rey Knut.

que en los otros países de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCED). El uso de energía fósil por cabeza de población es mucho menor en Europa y Japón que en Norteamérica; en aquellos países se han dado pequeños pasos iniciales para una transición hacia energías alternas.³¹ En teoría, los países andinos podrían hacer esa transición con mucha más facilidad que los países del OCED, pero en el Perú la institucionalidad formal es firmemente acoplada al sistema global (Earls 2004).

Creo que el problema estriba en la naturaleza de las propiedades emergentes de la complejidad autoorganizada. Para recapitular un poco, en el campo de la singularidad finita, el sistema complejo desarrolla conductas que no son accesibles al raciocinio de los miembros participantes. Una propiedad básica de los sistemas complejos autoorganizados es que adaptan sus estructuras internas a las perturbaciones que impactan para preservar su organización. La organización misma está forjada en el curso de su propia ontogénesis. El sistema es *autopoietico*³² como un organismo y adapta solo aquellas perturbaciones que percibe como impactantes. En efecto, exhibe una suerte de voluntad propia que no es percibida por los miembros activos participantes. Los participantes la experimentan como una convicción racional o religiosa, o simplemente como el sentido común. El ejemplo del hormiguero fue dado líneas arriba; el hormiguero actúa a través de las hormigas, mientras estas solo hacen las cosas que vienen naturalmente —en este caso por programación genética—. Desde luego que los sistemas sociales humanos son mucho más complejos que las hormigas y en fases de crisis nuestros sistemas suelen generar visiones alternas en muchos agentes participantes.

En la presente situación del mundo, el sistema capitalista global está centrado en los EE.UU. y está dominado por los EE.UU. Su organización actual está generada en la ontogénesis del capitalismo mundial y en su propio proceso histórico. Hay muchos otros procesos histórico nacionales que están incorporadas en el capitalismo globalizado pero estos están

³² El término *autopoiesis* se aplica al proceso circular por lo cual la organización de un sistema genera los componentes —incluyendo los linderos— y las interacciones entre ellos que produce el mismo sistema. Es decir que el *sistema autopoietico* es un sistema cerrado y autónomo (Maturana y Varela 1984).

ahora expresadas como subsistemas capitalistas dependientes de los EE.UU. Ellos identifican su supervivencia con la supervivencia de los EE.UU. Eso explicaría las ambiguas posiciones actuales de los gobiernos de Europa y Asia con respecto a la política y economía unilaterales de los EE.UU. El ente capitalista mundial, como un sistema *autopoietico* complejo, no toma en consideración las percepciones e interacciones de sus miembros cuando estos están en conflicto con su comprensión acerca de su propia preservación; incluso cuando estas apuntan a conductas que están socavando su viabilidad.³³

Tal como con los mercaderes de ruido del subsistema financiero, los agentes activos en el sistema político económico demandan compensaciones crecientes por los crecientes riesgos percibidos. De esta manera se puede comenzar a entender el empuje continuo por mayores ganancias de parte de las corporaciones transnacionales y por mayor control político económico sobre el mundo de parte de sus gobiernos. Sin embargo el sistema, a través de los grandes agentes que se mueven en él, percibe de alguna manera que a pesar de la siempre mayor inversión la presencia omnisciente del desastre acecha. Esta omnisciencia llega a extremos en el caso de los mesiánicos: frente al Apocalipsis percibido como inmanente, estos demandan la redención divina como su compensación para mantener su participación activa en el sistema.

Los bucles de retroalimentación que se amplifican en la transición al punto crítico claramente resaltan los peligros que se generan en el proceso. No es necesario que detalle estos peligros aquí pues son ampliamente difundidos en la literatura, sin embargo hay otros procesos en movimiento que estarían girando el sistema en rumbos totalmente distintos. Como Holling y sus colaboradores han planteado, los ecosistemas humanos pasan por etapas de crisis como parte de su dinámica general

³³ Aunque no lo puedo discutir aquí, parece que en las fases de crisis muchas personas que no son tan acopladas al sistema comienzan a percibir el sistema social en el que participan como un subsistema de un macrosistema todavía mayor. En el caso actual se ve el sistema global como subsistema del sistema ecológico terrestre, y se cuestiona la viabilidad del sistema económico global en términos de las constricciones de este sistema mayor.

(Holling 2004, Redman y Kinzig (2003)). Las crisis mismas suelen generar nuevas opciones para el desarrollo que no se había vislumbrado antes, y estas reverberan cooperativamente por el sistema.

De cualquier manera, el sistema global está en transición a una enorme simplificación. No podemos saber de qué manera se organizará el mundo, pero hay una cosa segura: el capitalismo, por lo menos en su forma vigente, está destinado a la extinción.

Terminaré con una cita del periodista inglés George Monbiot que resume en una manera muy gráfica la destructividad autoorganizada de los Estados Unidos en este momento de la historia.

Tengo una imagen mental de la política externa estadounidense, que me asalta aun en mis sueños. La vanguardia de un ejército vasto está marchando sobre el globo en búsqueda de un enemigo. Ve una masa de tropas en la distancia que retroceden ante él. Abre fuego, sin darse cuenta que está disparando a su propia retaguardia (Monbiot 2004 Trad. John Earls)

Monbiot usa esta imagen visual para ilustrar los efectos de la política de los Estados Unidos en el mundo del que forma parte, con respecto al cambio climático, Irak, Bin Laden, y las Naciones Unidas. Dice que ese país tiene todo el derecho a autocastigarse, pero mientras se ataca a sí mismo alrededor del mundo, arrasa con todo los demás también.

Capítulo II

Agricultura peruana en la transición energética del siglo XXI

Introducción

En las últimas décadas se han hecho grandes esfuerzos para el desarrollo de una agroindustria de exportación. En varios casos estos esfuerzos han tenido un éxito espectacular. El cultivo de espárragos en la costa peruana está produciendo rendimientos aun mayores que los países productores competidores básicamente por dos razones: i) las condiciones climáticas en la costa peruana son excepcionalmente favorables, y ii) las altas entradas de energía necesarias son accesibles a bajo costo. En este proceso se ha visto la integración de la agricultura no tradicional y de casi toda la economía formal peruana al sistema económico global. En el sistema global, las economías de los países integrantes se hacen cada vez más interconectadas e interdependientes.

En este trabajo voy a revisar algunas tendencias de la evolución del sistema global en el siglo XX y voy a hacer una primera evaluación de la sostenibilidad del desarrollo agroindustrial peruano como componente de ese sistema. Finalmente, voy a reseñar un escenario para la participación de la agricultura andina denominada tradicional en el sistema global, caracterizado por energía menos accesible y más costosa.

1. Agricultura y energía

Hace tres décadas D. Pimentel y sus colaboradores (1973) publicaron un trabajo acerca de la agricultura y la energía que tuvo mucha influencia en las discusiones de desarrollo en aquella época de la primera gran crisis mundial de la energía.¹ Ellos señalaron que la dependencia de la agricultura al consumo de altas cantidades de energía subsidiaria barata, en una época de costos energéticos en alza continua, representa serios problemas para la sostenibilidad de la agroindustria y la alimentación proveniente de ella. La agricultura industrial usa energía directa en todas las fases de su producción: el transporte de semillas, la maquinaria empleada para su cultivo (tractores), la irrigación, los fertilizantes, herbicidas, pesticidas, etc. El gran rendimiento energético de la agroindustria no se debe a mejoras en el proceso fotosintético sino al hecho de que muchas tareas que antes eran hechas por los cultivos mismos son ahora hechas por los agricultores, como extraer nutrientes, resistir a enfermedades y a ataques de herbívoros. A pesar de que la dependencia de energía fósil no renovable en la agroindustria peruana está aminorada en cierto grado por la abundancia de energía hidroeléctrica,² esta energía solamente es utilizable en ciertas etapas del ciclo productivo. Todo parece indicar que en un futuro previsible la parte mayor de la energía gastada seguirá dependiendo de fuentes no renovables.³

¹ Esa crisis tenía varias causas económicas y políticas. La dependencia de petróleo del mundo desarrollado se duplicó en la década de los 60, el Golfo Persa emergió como el centro productor y los países árabes agrupados en la OPEP se aprovecharon de su nuevo poder para influir en la situación político-militar de Medio Oriente (Enders 1975). El precio del petróleo aumentó entre cuatro y cinco veces en pocos años y la economía mundial entró en una contracción severa. Sin embargo, esa crisis fue esencialmente de carácter político-económico. Todavía había campos de petróleo por desarrollar, particularmente en el Mar del Norte, África y el Golfo de México.

² Sin embargo, incluso la disponibilidad de energía hidroeléctrica no debe ser dada por sentada.

³ Más del 70% de la energía usada en el mundo proviene de fuentes no renovables, principalmente el petróleo.

Günther (2000) ha señalado que la viabilidad de la agroindustria depende del mantenimiento continuo de las siguientes condiciones:

1. La producción de combustibles baratos a largo plazo.
2. La disponibilidad de fuentes de veta de fósforo para la producción de fertilizantes.
3. Un sistema de distribución de fertilizantes, combustibles y productos agrícolas que funcione sin interrupción incluso frente a la ocurrencia de perturbaciones en la sociedad externa al sistema agrícola.
4. Una infraestructura de apoyo que provea la renovación y la reparación de maquinaria agrícola independientemente del clima industrial en general y los costos futuros de energía.

En casi la totalidad de la discusión nacional sobre el desarrollo agrícola, se da por sentado la existencia futura de estas condiciones. Sin embargo, ¿es realista tomar por sentada toda esta estabilidad en un mundo globalizado que ya ha entrado en un nuevo período de inestabilidad energética-económica? Cualquier estrategia sostenible para el desarrollo tiene que poder adecuarse a las perturbaciones que se generan en el sistema global. La estabilidad de todo sistema es resultado de su habilidad para mantener su homeostasis frente a todas las perturbaciones que lo impactan, ya sea que se originen en el ambiente en el que el sistema se desarrolla o que se generen por su dinámica interna. El subsistema agroindustrial es muy robusto frente a perturbaciones ambientales en general, pero es muy susceptible a las perturbaciones que se den lugar en el aprovisionamiento de energía.⁴

En la siguiente sección, evaluaremos la factibilidad futura del sistema con respecto a la primera condición señalada por Günther (2000): la producción de combustibles baratos a largo plazo.

⁴ Las perturbaciones incluyen aquellas que se presentan en forma de fluctuaciones en el suministro de la energía que sostiene el sistema.

2. La energía y los ecosistemas humanos

En el contexto antropológico y ecológico hay que entender el concepto de energía en términos más amplios que en los que normalmente se le utiliza. La energía debe entenderse como algo que tiene la capacidad de efectuar trabajo, es decir, algo con la potencia de trabajar. En mecánica, trabajo se define como la transferencia de una cantidad de energía de un sistema físico a otro y es expresado en términos de la transferencia de una fuerza sobre una distancia. Así, cuesta un *julio* (J) de energía aplicar una fuerza de un *newton* (N) sobre un metro de distancia.

Para los propósitos que aquí se persiguen, es mejor decir que todo cambio en la organización material del mundo es una expresión de trabajo e involucra una transferencia de energía entre dos sistemas. Así, el aumento de la temperatura de un centímetro cúbico de agua en un grado Celsius es una expresión del trabajo que resulta de la transferencia de una caloría (cal) de energía de un sistema con más calor como el fuego a otro con menos calor como el agua. Puesto que el concepto de la energía es general, la caloría de calor puede igualmente expresarse como 4.187 julios de energía mecánica o 1.163×10^{-6} kw de energía eléctrica.

La energía de las comidas suele presentarse en kilocalorías (1 kcal = 1.000 cal) o en julios. Es muy importante notar aquí que la energía potencial de un barril de petróleo es equivalente a 1.461.581 kcal o aproximadamente la energía alimenticia de 365.400 kg de carbohidratos y proteínas de comida. Sin embargo, con cada transferencia de energía de un sistema a otro para hacer trabajo hay una degradación en la calidad de la energía tal que pierde su capacidad de trabajar.⁵ Así, la cantidad de aquella energía

⁵ La primera ley de la termodinámica especifica que la energía nunca se pierde: si una kcal. de energía entra en un proceso, como resultante debería salir al final la misma cantidad. Sin embargo, la segunda ley dice que en el proceso del trabajo siempre se degrada una parte de la energía en entropía —energía desordenada e inútil—, tal que la cantidad de trabajo efectuada es siempre menor que la cantidad de energía empleada en hacerlo. En sistemas simples mecánicos, el desgaste entrópico es mínimo; pero en sistemas químicos, biológicos y socioeconómicos la pérdida de energía útil es siempre significativa. Las plantas solo pueden transformar una centésima parte de la energía que reciben del Sol en biomasa vegetal. Como Odum ha sugerido, es más conveniente pensar la energía con potencial de trabajar como la "exergía" de la termodinámica.

inicial que finalmente se plasma en energía alimenticia en las transformaciones agroindustriales es muchísimo menor.

En años recientes, la Antropología y otras Ciencias Sociales están volviendo a interesarse en el papel de la energía en el desenvolvimiento del proceso político-social.⁶ El nuevo interés en la energía proviene de los avances que se han hecho en la Ecología y la generalización de estos en el nuevo acercamiento a los llamados ecosistemas humanos.⁷ El estudio de ecosistemas humanos se originó en los trabajos del ecólogo Howard Odum (1980, 1981, 1988 y 1996), quien mostró la actuación de principios generales que gobiernan los comportamientos de sistemas ecológicos y sistemas sociales en función de la disponibilidad de la energía que necesitan para sostenerse.⁸ La dinámica de autoorganización que caracteriza a estos sistemas involucra el flujo continuo de energía e información a través del sistema; la fuente de energía es externa al sistema —energía solar, energía hídrica, energía de combustibles, etc.—. Odum elaboró un esquema para evaluar cuantitativamente el balance entre la energía útil que entra en un proceso y la transformación en energía útil y energía degradada en el proceso; y demostró que en cada transformación, la energía útil disminuye en cantidad pero aumenta en calidad por concentrarse.

El dinero fluye en sentido contrario a la energía y, así, puede ser pensado como una manera directa de acceder a la energía disponible en cada transformación. El flujo de la información determina cómo la energía va a ser plasmada en organización de acuerdo con el estado del sistema en un momento dado. Sin embargo, la información está, al mismo tiempo,

⁶ Los trabajos antropológicos de mayor envergadura desde la perspectiva de la energía han sido los de Leslie White (1959), Richard N. Adams (1983) y, más recientemente, los de Allen Johnson y Timothy Earle (1987).

⁷ El término ecosistemas humanos se refiere a los ecosistemas que son dominados por humanos y en los que la especie humana es el agente central. Hay propiedades de ecosistemas humanos que no se encuentran en ecosistemas no humanos. Aunque estas propiedades no son necesariamente únicas, operacionalmente tienen diferencias suficientes para distinguirlos (Stepp et al 2003).

⁸ Una buena visión general de este nuevo campo de investigación y su aplicación en la Antropología está dada por Tom Abel (1998).

generada en esta organización y por su dinámica: el comportamiento del sistema es autónomo y no está determinado por ningún flujo de información desde su exterior. A decir verdad, es la organización del sistema la que da sentido a la información y es este sentido el que determina el comportamiento del sistema en referencia a dicha información. Hasta cierto grado se puede pensar el dinero como la codificación de la información social que se atribuye a las diferentes expresiones de la energía y el trabajo que fluye en un sistema social. Es la organización la que establece la relación entre dinero y energía en un momento dado: el valor de un producto es una expresión de esa organización.

Todos los sistemas complejos gastan energía con el fin de acceder a ella de acuerdo con la dinámica de su autoorganización. El sistema industrial invierte una cantidad de energía fósil para la extracción de más energía fósil. Las hormigas de un hormiguero invierten energía en la cosecha de hojas verdes para acceder a la mayor energía producida por los hongos que se mantienen en base a estas hojas (Tainter, Allen y otros 2003). Los imperios humanos invierten energía en la formación y uso de ejércitos para adquirir nuevas fuentes de energía para el crecimiento imperial. Muchas características de la organización de los sistemas pueden derivarse de la razón entre la energía a la que se accede por el proceso y la energía⁹ invertida en extraerla. Esta razón es llamada *gain* en inglés y nosotros podríamos traducirla como ganancia.

Ganancia =	Unidades de energía extraída Unidades de energía empleada directamente e indirectamente en ubicar, extraer y refinarla.
------------	--

⁹ En la ecuación, la unidad de energía puede ser la kilocaloría, el julio, kilowatt/hora, tonelada equivalente de petróleo o, muy flojamente, el barril. Para evaluar un recurso, hay que tomar todo el contexto sociotecnológico en cuenta. Los soldados de Alejandro Magno observaron charcos de petróleo quemando en Asia pero, en aquel contexto, el petróleo solo servía para abrigarse del frío (Tainter. Allen y otros 2003).

Ya que el dinero es la expresión sistémica de la energía involucrada en un proceso, se entiende cómo la idea común de ganancia económica se relaciona con la ganancia energética. Sin embargo, el acoplamiento entre los sistemas económicos y energéticos es relativamente flojo: el flujo de energía impone constricciones sobre el sistema económico pero no lo determina.

Los cambios que ocurren en la tasa de ganancia energética siempre se acompañan por cambios en la dinámica de los sistemas. La organización económica y el flujo energético en una comunidad campesina andina han sido estudiados como un ecosistema humano por Jorge Rocha (2003, 2004). Lo que él pudo observar fue que estas comunidades son sistemas de muy baja ganancia y que son muy susceptibles a las perturbaciones del medio ambiente que las rodea. Así, es posible decir que la elaborada organización de estas comunidades ha evolucionado como una adaptación a esta susceptibilidad ambiental (Earls 1989, 1996, 1998).

Quizás el mayor impacto que ha sufrido la antropología como disciplina académica es la disolución de la barrera, siempre considerada arbitraria e inconveniente, que ha separado el estudio y análisis de las sociedades denominadas tradicionales del de las sociedades industriales avanzadas. En Tainter, Allen y otros (2003) se muestra cómo los sistemas que acceden a energía de alta ganancia desarrollan organizaciones bastante diferentes a las sociedades de baja ganancia y se comportan de manera muy distinta la una de la otra. La agroindustria es un sistema de alta ganancia (SAG) y la agricultura campesina en los Andes es un sistema de baja ganancia (SBG).

La agricultura campesina, como SBG, accede a la energía dispersa que proviene del sol de dos maneras: i) en forma directa por el proceso de fotosíntesis que convierte la energía solar en energía de biomasa (alimentos, ropa, habitación, etc.), y ii) en forma indirecta por la colección de energías residuales (no alimenticias) de los procesos metabólicos (leña, lluvia, bosta, etc.) que reinvierten para aumentar su cosecha de energía alimenticia (Rocha 2004). La agroindustria, como SAG, invierte grandes cantidades de energía de alta concentración como combustibles fósiles y energía hidroeléctrica, en adición a la energía solar, para cosechar cantidades aún superiores de energía alimenticia. Los SAG tienen un alto grado de

independencia de la inclemencia de la naturaleza y necesitan poca organización entre los productores inmediatos. Los SBG son muy sensibles a fluctuaciones ambientales y, por ello, los productores desarrollan una organización rica y compleja para amortiguar el riesgo y asegurar la cosecha de energías alimenticias en cantidades suficientes (Earls 1991a, 1996, 1998). Todo sistema autoorganizado siempre tiende a aumentar su estructura en el tiempo, pero los SBG y los SAG lo hacen de diferentes maneras. Los SAG suelen aumentarla mediante la adición de nuevos niveles jerárquicos hacia arriba, mientras los SBG tienden a elaborar su estructura de manera horizontal (Tainter 2003).

En la siguiente sección de este artículo voy a repasar la situación del acceso energético que sostiene el SAG de la agroindustria en el mundo. Dado el acoplamiento estrecho del Perú al sistema global, no tiene sentido circunscribir la discusión al área territorial del Perú ni a la de América Latina. El sistema global ahora es un solo sistema con su propia dinámica interna y, como todo sistema complejo, su comportamiento está estrechamente asociado a su acceso a energía. Por otro lado, dado que la actividad política de las potencias ejerce mucha influencia sobre el flujo de energía fósil y lo que se reporta sobre ella, voy a revisar la situación política con respecto al petróleo.

3. Crisis global de la energía

En primer lugar hay que señalar que la nueva crisis energética difiere de la crisis de la década del 70 de una manera fundamental: la crisis de los años 70 ocurrió como resultado de una crisis política mientras la crisis actual resulta del agotamiento físico de las reservas del petróleo. Con esto no estoy diciendo que estemos cerca a secar los últimos barriles de los campos del mundo. De hecho, va a haber petróleo por mucho más tiempo en el futuro. Sin embargo, es necesario notar tres cosas fundamentales: i) la demanda mundial de petróleo está aumentando muy rápidamente en comparación con nuestra habilidad para extraerlo de la tierra, ii) las reservas de petróleo han llegado a su tope o están disminuyendo y iii) el costo de la extracción comienza a aumentar. En otras palabras, la produc-

ción petrolera está llegando a su tope. El mundo ha llegado, o está por llegar, al pico de petróleo (*peak oil*) y, por ende, está entrando en un período de transición hacia una organización de baja ganancia energética.

La demanda de petróleo está aumentando en todo el mundo y, a menos que haya un colapso drástico en la economía global, va a seguir aumentando. En 2003, China importa el 32% del petróleo que usa y se anticipa que este porcentaje se duplicará hacia el año 2010. Actualmente la demanda petrolera de China crece a una tasa anual de 7,5% (*Institute for the Analysis of Global Security* 2003) lo cual se encuentra por encima del promedio mundial. La demanda de los Estados Unidos, que actualmente consume el 25% de la producción total, también crece. El mismo crecimiento es observado en la ya importante demanda de petróleo que tiene la India. De acuerdo al *United States Geological Survey*, la demanda mundial de petróleo seguirá creciendo a una tasa anual de 2,2%. Por su lado, la *International Energy Agency* (McKillop 2004) señala más bien una tasa anual de 3% en el crecimiento de dicha demanda. En lo referente a las reservas de petróleo naturalmente hay una gran diversidad de pronósticos.

Un análisis del asesor de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), Jean Laherrère (2001), muestra que estos pronósticos caen en dos categorías con marcadas diferencias: las estimaciones políticas y las estimaciones técnicas. La primera categoría consiste en las estimaciones de reservas que se dan en fuentes como el *Oil & Gas Journal*, *World Oil*, *BP Statistical Review*, OPEC, el Ministerio de Energía y Minas en el Perú, etc. Por una serie de razones, los estimados políticos tienden a sobreestimar las reservas.¹⁰ Por su parte, los estimados técnicos de las reservas son el resultado de las exploraciones geológicas y geofísicas. Pese a que las compañías petroleras y los gobiernos tienden a mantener en secreto esta información, hay maneras de aproximarse a ellas a través de ciertos datos accesibles.

Así, Laherrère encuentra que las reservas petroleras disponibles para la extracción llegaron a su auge en los años 80 y desde entonces han

¹⁰ Esto se debe, por un lado, a las convenciones establecidas para el reporte de las reservas, y, por otro, al juego que se hace con estas convenciones para que las compañías petroleras, los países productores y la OPEP misma puedan obtener ventajas políticas y financieras.

entrado en declive. Del lado político la *Energy Information Agency* (EIA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Energía (Wood, Long y Morehouse 2004) insiste en que el pico de petróleo no llegará hasta el año 2020. Aunque la EIA subraya que su análisis se basa en un estudio del *United States Geological Survey*, según los criterios de Laherrère, su trabajo constituye una estimación política. De todos modos, a pesar de la disminución de las reservas, la extracción de petróleo en el mundo ha seguido aumentando de acuerdo con la demanda. Los cálculos y el método de Laherrère exitosamente anticiparon los datos que han hecho que algunas corporaciones petroleras como Shell y BP y el mismo OPEP admitan que sus estimaciones han sido exageradas.

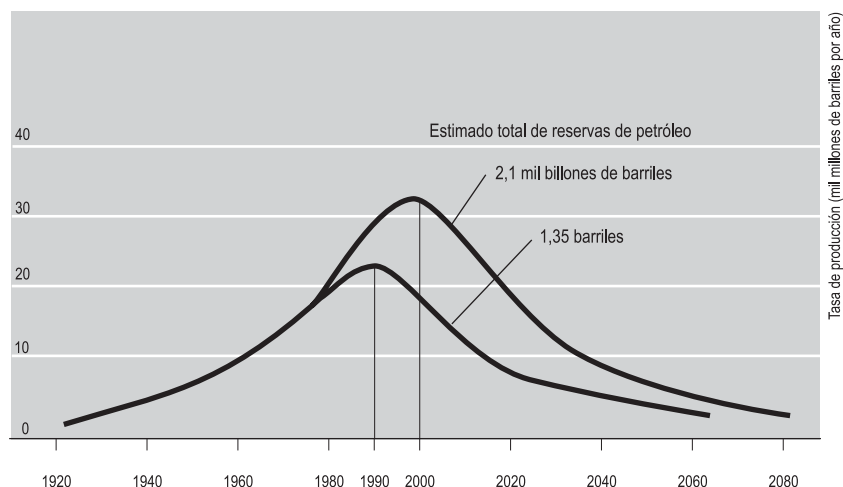
La mayoría de los analistas independientes tienden a ubicar el pico entre los años 2000 y 2008. Sin embargo, la fecha exacta no importa, pues como veremos más adelante el sistema político global ha comenzado a comportarse como si ya hubiéramos llegado a él. Esto es sumamente importante, ya que como se vio en la sección anterior, es la organización del sistema la que da sentido a la información que fluye en él.

Toda discusión alrededor del pico de petróleo gira necesariamente alrededor de la curva Hubbert. Hace cuarenta años, el geólogo petrolero M. King Hubbert desarrolló un modelo que relaciona la producción de petróleo con las reservas estimadas (Hubbert s/f), Campbell 2001, Heinberg 2004). Hubbert especificó que la producción en un campo llega a su tope cuando cerca de la mitad del petróleo está agotado; luego de esto, la producción comienza a declinar. Al abrir un nuevo campo petrolero, lo que primero se saca es el petróleo que está más disponible y es más barato. Cuando, se llega a la mitad del pozo (el pico de petróleo), la extracción cuesta más, es más difícil a extraer y la producción deja de aumentar. Después, la extracción de lo que queda viene a ser más difícil y más costosa y la producción se aminora hasta el abandono del campo. Hubbert modeló este proceso como la derivada de una curva logística, lo cual veremos en la figura 1.¹¹

¹¹ La curva logística es usada extensivamente en la Ecología y otras ciencias para explicar el comportamiento de sistemas en los que el acceso a un recurso limitado de parte de una población gobierna el crecimiento de la misma. La derivada de la curva da la tasa del acceso

De esta manera fue capaz de predecir el pico de la producción estadounidense en 1970. Su modelo predice —además— el pico de la producción mundial en los primeros años del siglo XXI, justo donde estamos hoy. En adelante, la producción de petróleo va a disminuir y su extracción será siempre más cara. Los expertos en la geofísica del petróleo han ido anticipando esta situación por algún tiempo pero los economistas han seguido pronosticando un crecimiento sin fin (Ivanhoe 1995; Campbell y Laherrère 1998; y Kerr 1998).

Figura 1: Curvas de Hubbert que describen la producción mundial de petróleo bajo dos estimaciones de las reservas totales globales



En agosto del año 2004 se está produciendo petróleo a una tasa de 83,6 millones de barriles por día que es 30.514 millones de barriles por año. Rusia y los países OPEP están produciendo a capacidad máxima.

Fuente: Caldwell 2003.

al recurso por parte de la población. Dado que la producción petrolera está fuertemente influenciada por factores como guerras y ciclos económicos diversos, la curva de Hubbert en la práctica no es suave como en su formulación matemática sino, más bien, bastante irregular.

Otro factor determinante es la ganancia energética en el proceso. Para servir como una fuente de energía, se debería gastar menos energía en la extracción del combustible que la energía que se obtendrá después. La ganancia energética tiene que ser mayor a uno. Se tiene que gastar mucha energía para la exploración, en el taladrar y en toda la infraestructura industrial; pero si, por ejemplo, se emplean 1.100 julios para extraer petróleo que solo brinde 1.000 julios de energía —con lo que la ganancia es 0,91— ya no se trata de una fuente de energía sino de otro tipo de recurso, como lo es el oro, la electricidad y el hidrógeno.¹² Al principio de la explotación de los grandes campos de petróleo, con una inversión de un barril se ganaban cincuenta barriles. Actualmente la ganancia varía entre uno y cinco según la antigüedad del pozo (Word.IQ). En los Estados Unidos continentales los campos petroleros ya han llegado al punto de igualdad entre la energía invertida y la energía cosechada, y de acuerdo con el modelo de Hubbert su tasa de abandono se acelerará rápidamente. El petróleo está pasando de ser una fuente de alta ganancia a una de baja ganancia y, en unos años más, dejará de ser una fuente de energía.

El editor de la revista especializada «Petroleum Review», Chris Skrebowski (2004), en entrevista a Al Jazeera, dijo que hay 18 países productores del petróleo cuya producción está en declive (que son el 25% de la producción mundial), y que en 14 de ellos la tasa de declive está aumentando. Esto quiere decir que la producción de los países que representan el otro 75% de la producción mundial tiene que aumentar extraordinariamente para que todo quede igual. Con la demanda de petróleo creciendo entre 2% a 3% por año, la situación es crítica. No se han hallado nuevos grandes campos de petróleo desde los años 80 y no se espera encontrarlos en el futuro. Hay otras fuentes de extracción de petróleo de baja calidad y

¹² Contrario a la creencia común, el hidrógeno no es una fuente de energía pues hay que invertir más energía petrolera en su preparación y extracción que la energía disponible en él. Para producir 1 kwh. de electricidad hay que invertir 3,7 kwh. de energía petrolera (con lo que la ganancia es solo 0,27) y hay que invertir mucho más para producir hidrógeno. El hidrógeno puede ser un portador de energía importante, pero no una fuente. La posibilidad de acceder a la energía termonuclear del hidrógeno de manera que podamos utilizarla, parece siempre más remota; las mini bombas controlables de hidrógeno quedarán en los sueños.

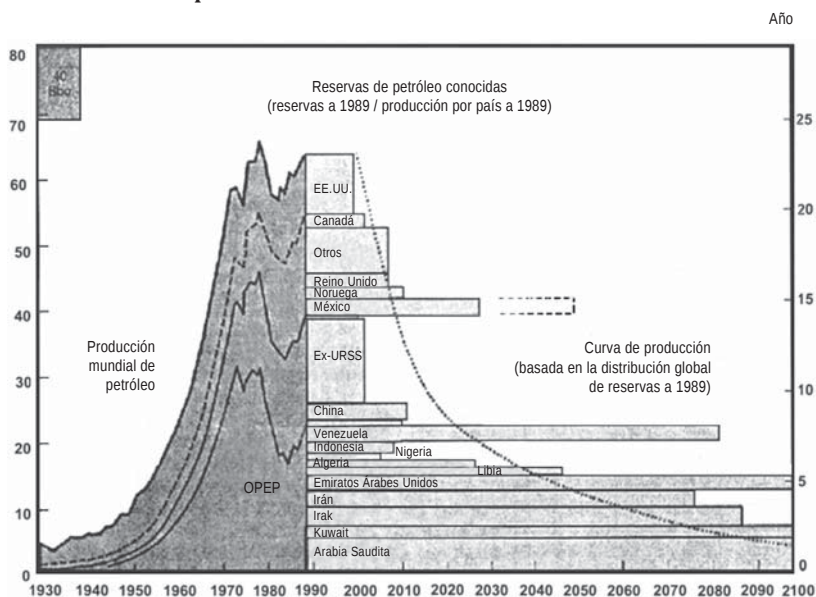
una vuelta al uso de carbón sería económicamente factible, sin embargo, estos tienen tanto impacto dañino en el medio ambiente y en el calentamiento global que su explotación en cualquier grado significativo no sería factible por razones políticas. De todos modos, para extraer petróleo de la brea de arena se estima que se necesita invertir 2 julios para conseguir 3 julios de energía útil, es decir la ganancia es de solo 1,5 (Günther 2001).

El costo del petróleo en el mundo estaría determinado en gran parte por la regla de la oferta y la demanda. Al momento de escribir este texto, 19 de octubre de 2004, el costo está por encima de los 50 dólares por barril. Como es posible comprobar, el mercado es altamente susceptible a la coyuntura política del momento. El vicepresidente de Exxon Mobil, Harry Longwell (2002) ha hecho un buen resumen de la situación y ha indicado qué dirección va a tomar la estrategia futura de la industria. La invasión de Irak es totalmente coherente con aquella estrategia. Longwell no habla directamente de guerras, pero es difícil ver cómo sus planes podrían instrumentalizarse por medios pacíficos. Cuando un recurso que es vital para todos es escaso, los estados más poderosos siempre han ejercido su poder militar para asegurarse que sus necesidades estén satisfechas. Estados Unidos quiere cumplir con sus necesidades industriales mediante el control militar de las fuentes de petróleo pero en este afán empuja los precios aún más aceleradamente. Aunque las fuentes oficiales tratan de minimizar todo, la invasión de Irak ha tenido fuerte influencia en los precios de petróleo. Por otro lado, no va a ser posible aumentar la producción petrolera en la región hasta que los Estados Unidos no dejen a ese país en paz.¹³ Efectivamente, la política de los Estados Unidos consiste en reemplazar el acceso al petróleo mediante el sistema económico global, con un acceso determinado por la jerarquía militar, ocupando ellos el nivel superior. Aunque en este caso los resultados son contrarios, esta es la manera característica que tienen los sistemas de alta ganancia para atender a problemas sistémicos.

¹³ Antes de la invasión, Irak tenía una capacidad de exportación de 2,4 mbd, actualmente, esta capacidad ha sido reducida a cerca de 1 mbd o menos (McKillop 2004).

La figura 2 presenta la historia de la producción mundial y la curva de la producción futura basada en las reservas comprobadas por área del mundo (Ivanhoe 1995). No es de sorprender que este cuadro coincida con la hoja de ruta de la política militar estadounidense en los últimos años y en los años futuros.

Figura 2: Historia de producción y curva de producción futura basada en reservas futuras por área



Fuente: Ivanhoe 1995.

No hay expertos que vean la posibilidad a mediano plazo de un *quick fix* —rápido arreglo— tecnológico para el problema. Hay que reiterar que la macroeconomía mundial es un sistema de alta ganancia y es totalmente dependiente del flujo de petróleo, lo que hace que sea extraordinariamente sensible a todas las perturbaciones políticas que impactan este flujo. Por ejemplo, el anunciado bombardeo de las plantas de energía nuclear de Irán por parte de los Estados Unidos o Israel empujará el precio muy por encima

de los 100 dólares por barril de petróleo y, sin embargo, estos países no dejan de contemplar tal idea seriamente. Los dos países se ubican dentro de sistemas simbólicos de creencias con altos grados de coherencia interna que parecen aislarlos de las realidades del medio ambiente biofísico (Stepp, Jones y otros 2003). Dichos sistemas de creencias operan en función de una dinámica interna que los lleva en una dirección divergente a la realidad simbólica consensual que gobierna el comportamiento de los otros países del mundo.

El gas natural líquido es la segunda gran fuente de energía y, rápidamente, está aumentando en importancia como un alivio para la escasez de petróleo. Sin embargo, la evolución de la extracción del gas es casi un reflejo de esa misma evolución para el petróleo. Longwell (2002) resume la historia de las reservas y el futuro de la extracción del gas y del petróleo, y ve que la demanda de gas aumenta con la misma tasa que la demanda de petróleo. Las reservas de gas llegaron a su pico en 1980 en Estados Unidos, diez años después de las de petróleo, pero desde entonces las dos han ido disminuyendo en tasas similares. Actualmente hay una crisis de gas en Norteamérica ya que su producción está en declive y los precios están aumentando tan rápidamente que cerca de 20% de las plantas productoras de fertilizantes están cerradas y 30% son casi inoperantes (Heinberg 2004). Los Estados Unidos han importado el 16% del gas que usa Canadá, pero ahora la producción ahí también declina.¹⁴

El analista Andrew McKillop (2004) señala que el impacto de los altos precios se sentirá antes y más fuertemente en las economías intensas de los países de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCED) y no en los países importadores del tercer mundo, como se podría pensar. Aún así, las economías de la OCED probablemente seguirán expandiéndose hasta que el precio esté por encima de los 75 dólares por barril. Solo cuando el precio sobrepase los 100 dólares por barril se

¹⁴ En este contexto podemos entender porqué George W. Bush se interesó tanto en asistir a la juramentación del presidente Toledo en el 2001. La implementación de la producción y exportación del gas de Camisea es de importancia vital para los EE. UU. Notamos que tanto el presidente de los Estados Unidos, como el vicepresidente, Dick Cheney tienen interés personal en la participación de los socios Halliburton (KBR) y Hunt Oil en este proyecto.

producirá la gran contracción económica y la caída descontrolada del precio en los países de la OCED, con la ausencia de aventuras bélicas, huelgas, entre otros. Sin embargo, desde mi punto de vista, el escenario más probable es el de una mayor rivalidad política entre las potencias que cuentan con armas nucleares para respaldarse, pues el superdesarrollo de países como China, Pakistán e India se correlaciona con su transformación en sistemas políticos de alta ganancia. Estos países van a defender sus accesos a la energía fósil que sus economías necesitan, al igual que los Estados Unidos, la Unión Europea y el Japón.¹⁵

Sin embargo, hay que insistir en que la militarización de la crisis de energía mayormente provoca resultados contrarios. En los países productores de petróleo hay una conciencia generalizada, tanto por parte de los gobiernos como por parte de los grupos de resistencia, de que el petróleo es el arma de defensa más potente contra las ambiciones imperiales (Whitney 2004). Los trabajadores de los campos de petróleo, como en Nigeria y Noruega, tampoco son reacios a ejercer su nuevo poder para influir en situaciones locales y regionales. En el Perú mismo hay que entender la casi guerra entre Cañete y Chíncha sobre el gas de Camisea como otra expresión de la crisis del pico de petróleo. En términos de la ciencia de la complejidad se trata de un fenómeno crítico que es invariante de escala, reverbera por todos los niveles del sistema y se expresa de maneras distintas de acuerdo con la estructura del sistema en cada nivel; pero la causalidad fundamental del fenómeno sigue siendo la misma.

La transición energética involucra una transición socioeconómica en los países del mundo desde una organización tipo SAG a una de tipo SBG; y esta transición va a ocurrir venga lo que venga. Los países de la OCED son mucho más dependientes en la energía fósil que son los países del tercer mundo. Los primeros tienen un uso de alrededor de 25 barriles por cápita —bca— al año en los Estados Unidos y Canadá y de 10 a 12 bca en la Unión Europea, Japón, Corea, Taiwán y Singapur (McKillop 2004). Los países de

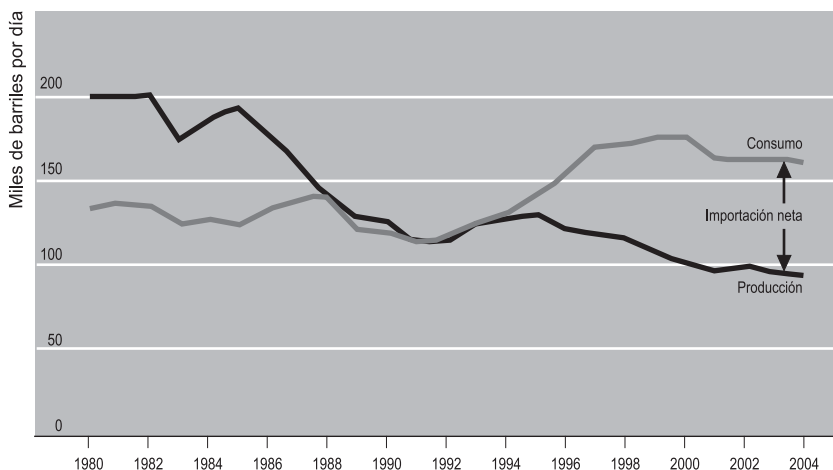
¹⁵ Si Japón todavía no tiene su arsenal atómico lo puede construir en muy poco tiempo, lo mismo que Brasil, Indonesia, Corea, entre otros. En la Unión Europea, Francia e Inglaterra, hace ya tiempo que cuentan con arsenales nucleares.

gran crecimiento económico del tercer mundo como China, India, Pakistán y Brasil, usan de 1,25 a 2,5 bca y los otros un poco menos. En principio, entonces, la transición debería ser menos perjudicial para estos países que para los países del OCED. En la próxima sección revisamos la situación en el Perú.

4. Energía y alimentos en el Perú

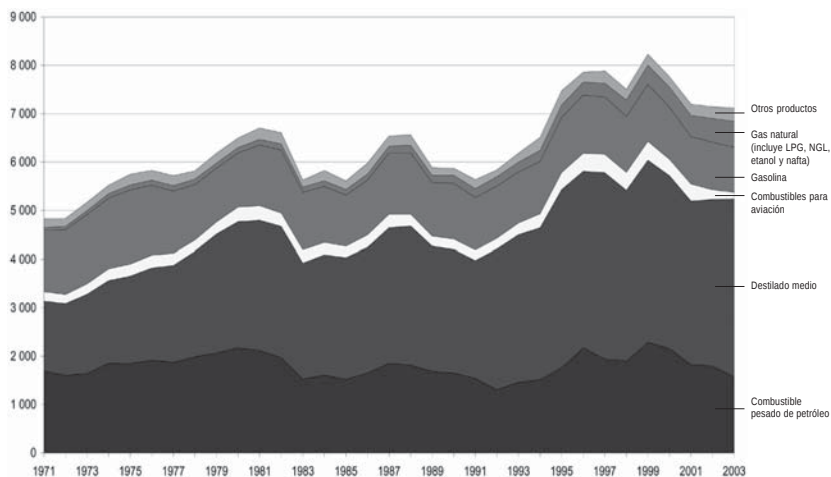
La evolución de la producción, el consumo, la importación y la exportación del petróleo en las últimas dos décadas en el Perú, está resumida en el gráfico de la figura 3, que proviene de la Energy Information Agency del Department of Energy de los Estados Unidos (2003). Como es posible observar, entre 1988 y 1994 el Perú pasó de ser un país exportador de petróleo a ser un importador. Ya que las reservas que quedan van agotándose, el crecimiento económico que se pronostica va a ocasionar que el balance en lo referente al petróleo sea aún más negativo.

Figura 3: Producción y consumo de petróleo entre 1980 y 2004 en barriles por día en el Perú



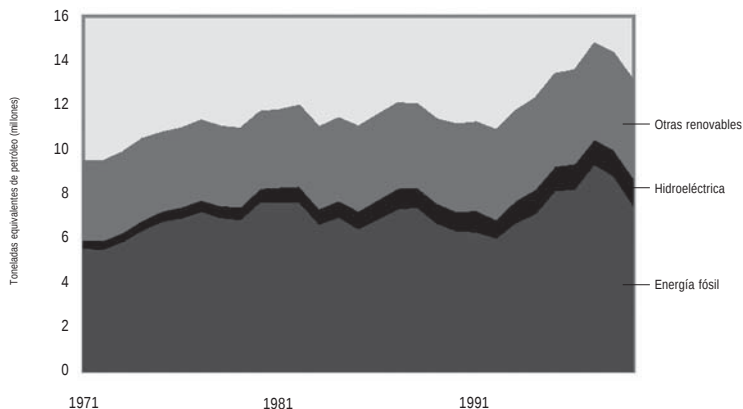
Fuente: Energy Information Agency.

Figura 4: Evolución del consumo de combustibles petroleros del 1971 a 2001 en miles de toneladas equivalentes de petróleo en el Perú



Fuente: International Energy Agency 2003.

Figura 5: Evolución del consumo de energía por fuente de 1971 a 1999 en el Perú



Fuente: Earth Trends Peru 2003a.

En la figura 5 se ve la evolución del consumo total de energía en el Perú. Los mismos datos han sido tomados de base para la figura 4.¹⁶ Del promedio total de 12.231.000 toneladas equivalentes de petróleo (TEP)¹⁷ de energía consumidas entre el 2000 y el 2001, 2.250.000 TEP vienen de «otras renovables» (leña y bosta principalmente en el caso del Perú) y 1.451.000 TEP de la hidroelectricidad. En total, 3.700.000 TEP (30%) vienen de fuentes de energía renovables (Earth Trends 2003a). Los 2.250.000 TEP de biomasa renovable son la fuente más importante de energía en las zonas rurales de la sierra, donde la agricultura no industrial predomina, pues la subsistencia de los agricultores depende de ella. También hay una gran población urbana que depende de la leña para cocinar.

En general, la situación energética en el Perú muestra las mismas tendencias y susceptibilidades del sistema global. La producción nacional de energía fósil disminuye, al mismo tiempo que el consumo aumenta a través de cada vez mayores importaciones (figura 3). El costo de los combustibles importados está aumentando ahora y, dado el acoplamiento estrecho del país al sistema global, los precios de estos aumentan. La tendencia a un mayor acoplamiento se observa en el crecimiento del porcentaje de petróleo importado con respecto a las importaciones totales en las últimas décadas: de 3,7% en los años 80 se pasó a 9,7% en los años 90.

¹⁶ Las cifras para el consumo y uso de combustibles fósiles en el Perú varían significativamente de acuerdo con la fuente. La página web de *Earth Trends* contiene datos bastante completos acerca de la energía, la agricultura y otros aspectos de los países del mundo que provienen de una amplia gama de fuentes oficiales. Los datos aquí citados acerca de la energía provienen de la *International Energy Agency* (IEA), pero hay que pagar para obtenerlos -a diferencia de lo que sucede en el caso de *Earth Trends*. En general, es posible notar que las cifras para el Perú muestran un número de discrepancias internas. En comunicación con Amy Cassara de *Earth Trends*, se me informó que la IEA ha hecho una seria revisión de los datos para el Perú en los últimos años. Parece verosímil que los errores se deban, siguiendo el esquema de Laherrère, al manejo político de los datos por parte de los petroleros y/o del gobierno. Con el fin de minimizar los errores, las cifras que presento aquí son promediados de los datos de varias fuentes.

¹⁷ La Tonelada Equivalente de Petróleo es una unidad de energía aglutinada, que es igual a 10 millones de kilocalorías o 41,87 gigajulios.

El gas de Camisea no va a influir mucho en esta situación de dependencia. De los 34.000 bbl/día (1.178.950 TEP/año) que se producen, solo unos 12.000 bbl/día (416.000 TEP/año) quedarán para uso nacional, mientras 22.000 (762.850 TEP/año) serán exportados principalmente a los Estados Unidos (American International Group 2004). Por lo tanto, se seguirá importando más de 100.000 bbl/día (3.500.000 TEP/año) de la energía fósil no renovable, es decir más de la mitad de lo que se consume (7.842.500 TEP/año). La situación general está resumida en el gráfico de la figura 4, que presenta la evolución del consumo de productos petroleros (el LPG refiere a gas natural).

Al mismo tiempo, el Perú sigue aumentando las exportaciones e importaciones de alimentos del exterior. En los años 1998 a 2000, las importaciones netas de cereales junto a la ayuda alimenticia extranjera llegaron a representar el 43,9% del consumo total (Earth Trends 2003b). En este período, las importaciones y las exportaciones agrícolas se duplicaron con respecto al período 1989-1991. A la vez, el balance comercial negativo para el país ha subido de 270,4 millones de dólares en el período 1989-1991 a un promedio de 443,9 millones de dólares en 1998-2001¹⁸ (FAO 2002).

En los últimos diez años, el Perú ha experimentado una expansión en la exportación de productos agrícolas no tradicionales —lo cual podemos ver en la figura 6—, principalmente el espárrago —graficado en figuras 7 y 8—. En el año 2001, el espárrago ocupa el primer lugar entre las exportaciones no tradicionales con 140 millones de dólares, seguido por la cebolla con 11 millones de dólares. Al parecer, en los últimos años se ha vuelto a tener una balanza positiva en el comercio agrario internacional (Agronoticias 2004); sin embargo, la tendencia general hacia un mayor acoplamiento continúa: para el año 2003, se importó productos por el valor de 554 millones de dólares o $554 \text{ E}+6$ ¹⁹ de dólares y se exportó 570 $\text{E}+6$ de

¹⁸ Esta cifra incluye las importaciones extraordinarias que se hicieron para hacer frente a los estragos que dejó el Fenómeno de El Niño en 1998. Sin embargo, las perturbaciones al sistema debido al fenómeno ENSO son un componente de la realidad ecolimática nacional y tienen que tomarse en cuenta.

Figura 6: Exportaciones agropecuarias tradicionales y no tradicionales entre 1990 y 2001 (US\$ millones)

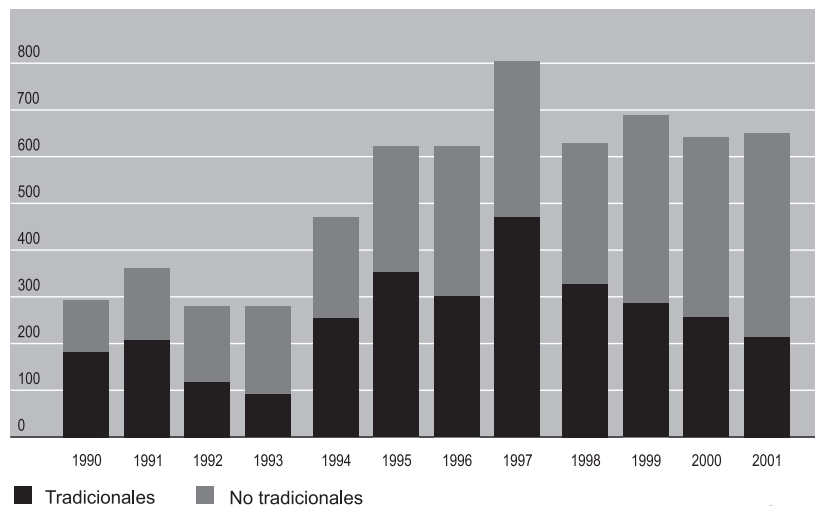


Figura 7: Producción de espárragos de 1990 a 2001

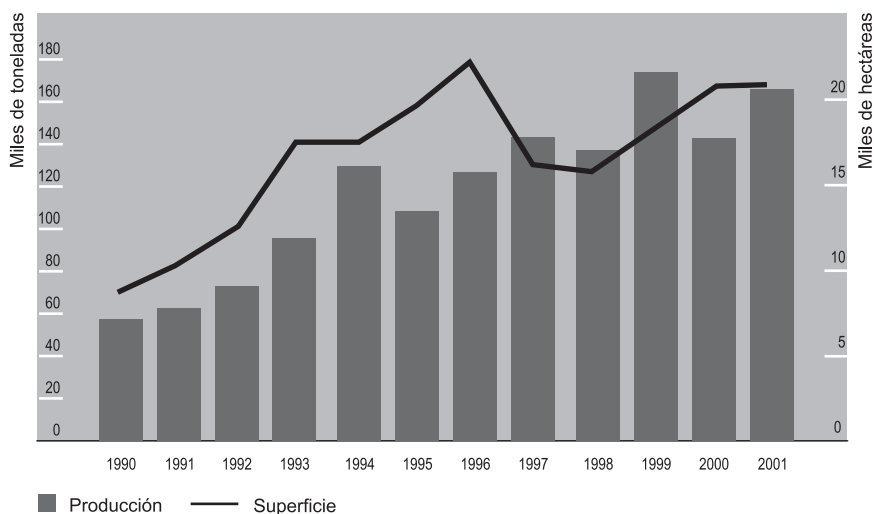
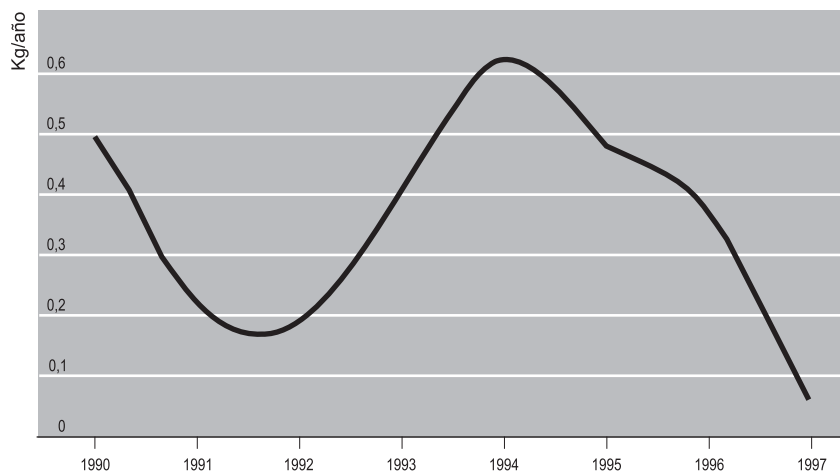


Figura 8: Consumo nacional de espárragos 1990 a 1997



Fuente: Portal Agrario 2003.

dólares. La mayoría de alimentos que se importan vienen de los Estados Unidos.

El espárrago es un cultivo netamente agroindustrial. En todas las fases de producción consume grandes cantidades de energía subsidiaria. Según el Portal Agrario del Ministerio de Agricultura (2003), la mitad de los gastos para el productor vienen en forma de insumos. Dada la ausencia de datos accesibles acerca del consumo de energía en las diferentes fases, no se puede hacer un cálculo de la energía gastada en producir los fardos comestibles de la planta; sin embargo, las fuentes internacionales enfatizan que es un cultivo de alta intensidad energética (Mayberry 2000). A su vez, es curioso notar que mientras la producción de este cultivo se expande, su consumo en el Perú disminuye (figura 8). Actualmente el Perú dedica 511.000 TEP a la agricultura —4,2% del total— y la mayor parte de esto va a la agroindustria. De esta cifra, 270.000 TEP provienen de

¹⁹ En la notación científica $1E+6 = 10^6 = 1$ millón, tal que se refiere a 554 millones de dólares, igualmente $1E+3 =$ mil, etc.

productos petroleros y 85.000 TEP de la electricidad. No hay cifras disponibles, pero es razonable suponer que la mitad va al cultivo del espárrago. Los 152.000 TEP restantes podrían consistir en la leña directamente consumida en la agricultura, aunque no hay cómo saber la repartición de esta entre la agricultura campesina y la agricultura industrial.

Es probable que los precios de la energía sigan subiendo como lo han venido haciendo en los últimos años. Sin embargo, aun si solo aumenta 10% al año, el costo sería 2,6 veces más en diez años y diez veces más en 25 años.²⁰ Dado que gran parte de los fertilizantes se hacen en base de productos petroleros, el costo de estos también tiene que tomarse en cuenta. Smil (citado en Gunther 2000) estima que la veta de fosfato disponible a unos 20.000 Teragramos²¹ y que contiene 13% de P_2O_5 dará una extracción de fósforo puro de $\sim 2,600$ Tg. El uso se estima en unos 20 Tg/año. Tomando como base las cifras de Smil, las reservas de fósforo tendrían una vida media de 130 años, según los precios de la energía en el año 2000.

Existe bastante incertidumbre acerca de la cantidad de reservas de fósforo que se pueden extraer y de su contenido promedio de fósforo. Además, la extracción representa un uso muy intensivo de energía que va de 18 a 32 MJ/kg P según la calidad de la fuente. Al igual que para la extracción de combustible fósiles, la ganancia energética disminuye con el tiempo a la vez que disminuyen las reservas. Gunther calcula una tasa de crecimiento anual de 5% en el precio de la energía y un aumento anual de 3% en la energía que se utiliza para su extracción, lo que hace que el precio se multiplique por 10 en los próximos 25 años y por 38 en los próximos 50 años.

Actualmente el Perú importa unas 300 kt —kilotoneladas— de fertilizantes por año (Earth Trends 2003), lo que representa el triple de lo que se importaba de 1960 a 1985, como se puede ver en la figura 9. Así, curiosamente, la producción nacional de fertilizantes ha disminuido con-

²⁰ El alza del precio del petróleo, obviamente, no seguirá la forma de una curva continua sino consistirá de pulsaciones de siempre mayor amplitud.

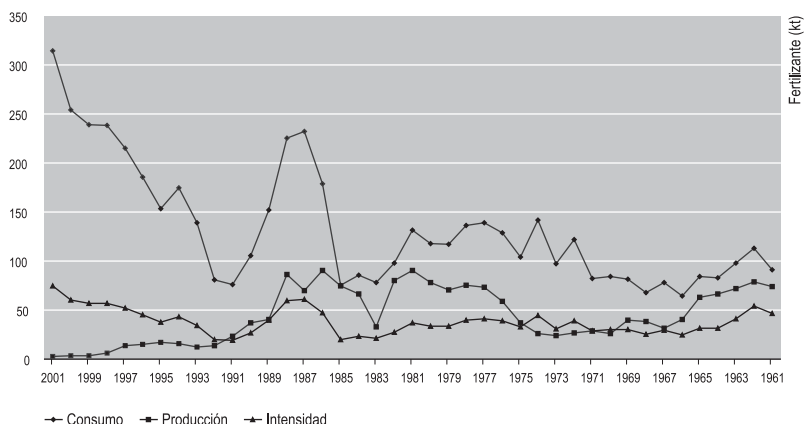
²¹ 1 Tg = 1 millón de toneladas métricas

tinuamente desde 90,3 kt en 1986 a solo 2,8 kt en 2001, mientras la intensidad del uso de fertilizantes ha subido desde unos 22 kt/ha a principios de los años 90 a casi 75 kt/ha en 2001, casi al nivel de los Estados Unidos —110 kt/ha—, e incluso a un nivel mayor que el de Canadá —53,2 kt/ha— en el mismo año (Earth Trends 2003b).

En el caso del fósforo, el Perú no depende de las reservas internacionales, pues cuenta con las de Bayóvar en Piura. Bayóvar, con reservas probadas de 258 millones de toneladas (258 Tg) a una concentración de 30.5% y quizá 10.000 millones de toneladas de reservas potenciales, representa aproximadamente el 15% de las reservas mundiales de fósforo (Aguirre 1999). Sin embargo, el punto central es que mientras el Perú mantenga este estrecho acoplamiento al sistema económico global, será este sistema el que determinará la evolución de la producción del fosfato y de los costos para el agricultor. El sistema, de alguna manera, opera para aumentar la importación y el uso de los fertilizantes extranjeros y busca reducir drásticamente la producción de la enorme veta nacional de Bayóvar (figura 9). A pesar de que el fosfato de Bayóvar no es de la mejor calidad, Aguirre ha demostrado que cuando se le utiliza en combinación con fertilizantes orgánicos se consiguen rendimientos agrícolas casi iguales a los conseguidos con fertilizantes importados.²² La dependencia de la agroindustria peruana de las materias primas elaboradas en otros países está bien documentada por la Oficina de Información Agraria del Ministerio de Agricultura (2000).

²² Sin embargo, con respecto a los suelos nacionales: «Caracterizados como Andosoles háplicos y vítricos (Zamora y Bao 1969), los suelos de la Sierra Sur, exhiben como características esenciales elevada acidez, escasa disponibilidad de P, alta fijación de fosfatos y lenta mineralización de materia orgánica. Estas características conciden con la utilización de fuentes de P de baja solubilidad y prolongado efecto residual, como es la Roca Fosfatada de Bayóvar» (Aguirre 1999:224). La investigación de Aguirre muestra que al combinar la roca fosfato de Bayóvar con fuentes orgánicas se obtiene resultados semejantes a algunas fuentes comerciales.

Figura 9: El uso de fertilizantes en el Perú de 1961 a 2001 en kilotoneladas por año: consumo, producción e intensidad (kt por hectárea)



Fuente: Earth Trends 2003b. | Elaboración propia.

La dependencia en la importación de productos agrícolas para alimentar a la población urbana y costera del Perú no es viable a mediano plazo, pues estos productos también son productos agroindustriales que requieren una alta inversión energética. En los países de origen, estos solo son económicamente viables por los enormes subsidios monetarios otorgados para pagar a los productores por el uso de esa energía en todas las fases de la agricultura. En Pimentel, Hurd y otros (1973) se muestra que desde 1945 hasta 1970 los rendimientos del maíz en los Estados Unidos subieron desde $3,43 \text{ E}+6 \text{ kcal/acre}^{23}$ a $8,16 \text{ E}+6 \text{ kcal/acre}$, es decir el 240%. Sin embargo, la energía invertida²⁴ saltó desde $0,93 \text{ E}+6 \text{ kcal/acre}$

²³ 1 acre = 0,4ha

²⁴ Hay que recordar que estas cifras fueron calculadas tomando en cuenta todas las fuentes de energía que se invierten en la agricultura, es decir, incluyen, por ejemplo, la energía de soporte que se gasta en el transporte de todos los insumos y las cosechas. También se incluye la energía gastada en procesar los productos en las comidas, el empaquetamiento, la refrigeración en los almacenes y los supermercados, el uso de gasolina en las compras semanales, etc. Igualmente se incluye la energía humana de los trabajadores y en la conmutación a sus estaciones de trabajo. La agricultura es un sistema que tiene como fin

a 2,90 E+6 kcal/acre (» 80 galones de gasolina por acre) en los mismos años, lo que representa un aumento de 312%. Es decir, la ganancia energética amainó de 3,7 a 2,82. En 1994, Pimentel y Giampietro estimaron que por cada kcal de energía alimenticia cosechada en los Estados Unidos, se tiene que invertir 0,7 kcal de energía subsidiaria para cultivarla, lo que hace que la ganancia energética sea solo 1,4. Pfeiffer (2003) estima que ahora esto puede estar aún más cerca a 1.

En esta época del pico energético, la agroindustria de los países ricos ha entrado en fuerte crisis. Los agricultores y sus congresistas en los Estados Unidos están reclamando algún tipo de alivio frente al alza del precio del petróleo (House Agriculture Committee 2004); es decir que piden aún más subsidios, mientras se exige lo contrario para el tercer mundo. Sin embargo, en realidad, para la agricultura en Norteamérica y Europa va a ser difícil sobrevivir tal como está organizada —como un sistema de muy alta ganancia—, mucho menos va a poder exportar lo suficiente para alimentar la población del Perú y los otros países *en desarrollo*.

Aquí solo estoy tratando el problema agrícola desde el punto de vista de la energía; sin embargo, hay amplia documentación científica sobre las muchas otras susceptibilidades de la agricultura en los Estados Unidos y la Unión Europea. La triste realidad de la otrora sólida agricultura de Argentina luego de la transición agroindustrial a la producción tipo monocultivo de soya transgénica, ejemplifica los resultados de los errores en los que puede incurrir un país de efectuar una nueva política agraria sin una evaluación y un monitoreo científico adecuado (Branford 2004).

El mundo ha entrado ya en un proceso de transición energética: la transición organizacional de un sistema de alta ganancia a un sistema de baja ganancia energética. La elaboración de un sistema en el proceso de aumentar su ganancia es relativamente simple; pues con mayor accesibilidad a más energía para la población, los individuos se sienten más libres de restricciones y pueden satisfacer sus necesidades con más facilidad. El

alimentar a personas y todos los gastos de energía en ese sistema tienen que ser contabilizados (Odum 1981: 165-223 y Pimentel 1973: 443-49).

sistema capitalista occidental ha estado aumentando su ganancia casi continuamente desde el siglo XVI, pues siempre ha ido accediendo a fuentes de energía de mayor ganancia.

El proceso del colonialismo ha efectuado una retroalimentación positiva, en tanto que el acceso a reservorios más ricos en energía y los productos resultantes de esa han sostenido una expansión colonial continua. Las colonias siempre fueron muy ricas en toda clase de productos alimenticios nuevos —como el maíz y la papa en América— que proveyeron nuevas energías para el proceso industrial y en reservorios de materias que podían utilizarse para elaborar máquinas para acceder tanto a más energía aún como a nuevos productos que permitieron todavía más libertad de acción. El oro y la plata de las colonias facilitaron la concentración de riqueza y la movilización de siempre mayores concentraciones de energía. El uso de toda esta energía concentrada en la agricultura permitió tremendos aumentos en los rendimientos agrícolas y la consiguiente reducción de mano de obra dedicada en los campos de cultivo.

A partir de todo este desarrollo emergió una cultura con una filosofía de alta ganancia que ha seguido elaborándose en la forma de nuevas jerarquías económicas, políticas y militares hasta la actualidad. Esta filosofía o cosmovisión de alta ganancia ha llegado a su culmen con el neoliberalismo. No toma en cuenta otras maneras de organizar la sociedad y el mundo. Se considera toda propuesta alternativa como ideológica.

En este contexto, el problema para el Perú no es si va a transformarse a un sistema de baja ganancia o no, sino cuándo y cómo lo va a hacer. A pesar de su dependencia energética y alimenticia, el Perú está en buenas condiciones para reajustarse a la transición energética con problemas relativamente menores que los de los países de la OCED y los otros que son casi totalmente dependientes de combustibles energéticos exógenos. Como he indicado anteriormente, el país tiene grandes fuentes de energía renovable en forma de leña y bosta, y el aporte hidroeléctrico es significativo. Se puede optimizar el uso y la renovación ecológica de la leña y del carbón vegetal producido de ella; en Cuba, por ejemplo, se ha mejorado la productividad económica-energética de la leña en un 50% (Morales, Pérez, Rivera y otros s/f) y en otras partes del mundo ya se ha comenzado usar el etano en casos en forma híbrida, es decir, con gasolina (CREST). En el Perú

se han dado algunos pasos iniciales en este rumbo. El etano es el gas combustible más simple y puede generarse de biomasa renovable de muchas distintas maneras.

Aunque las reservas petroleras del país están en declive y el precio de su extracción va aumentando, hay muchas maneras de racionalizar su uso y optimizar su distribución. Como ya he indicado, con un buen manejo de la enorme reserva de fosfatos en Bayóvar se alivia sustancialmente el problema del encarecimiento continuo de este fertilizante. El Perú también cuenta con un alto potencial para la producción y el uso de energía de fuentes geotérmicas, siendo uno de los 39 países del mundo que podrían satisfacer todos sus requisitos de energía con esta fuente (Gawel y otros 1999).

Desde hace unos diez años el CEPAL ha venido promocionando el aprovechamiento de este potencial (Coviello), pero hasta la fecha los gobiernos del Perú no lo han tomado en serio. La energía geotérmica es solo una de las maneras de aprovechar el tremendo potencial energético de la cordillera andina. Rocha (s/f) ha calculado la contribución energética de los 723,37 km² de glaciares de la cordillera en Huaraz: de la descongelación anual de 9,91 E+8 m³ de hielo se producen 2,65 E+16 J de energía geopotencial y 4,89 E+15 J de energía química.²⁵ La energía geopotencial equivale a 633.06,6 toneladas equivalentes de petróleo por año y representa una cantidad mayor que los 511.000 TEP que se dedican anualmente a la agricultura.

Entonces, el problema para el Perú en esta época de transición no es estrictamente un problema de la escasez de energía sino un problema de organización social, política, económica y tecnológica, pues dicha organización no es capaz de manejar y aprovechar el tremendo potencial energético de la Cordillera de los Andes. Debido a que el sentido de la información se genera en la organización del sistema, esta opera para

²⁵ El análisis de Rocha va más allá de la producción de esta energía, mediante el modelo de Odum ha calculado la «[...] cantidad total de flujos energéticos que fueron requeridos para su creación» (Rocha 2004). Existen 23.6E+20 julios equivalentes de energía solar de los que la naturaleza ha dotado al Perú.

impedir la conceptualización del problema y de las opciones de las que se dispone. Esto se debe a que la clase política y gran parte de la población del sector *moderno* del país han asimilado la cosmovisión de un sistema de alta ganancia. Solo pueden concebir soluciones a los problemas en términos de mayor acoplamiento al sistema económico global. Se toma como una base axiomática que el único camino realista es el de estrechar el acoplamiento del país a este sistema y, en particular, al país que más ejemplifica las características de este: los Estados Unidos. Como ya se ha visto, ese sistema ya ha entrado en crisis terminal.²⁶

El país tiene una buena base histórica en la organización agrícola de baja ganancia que es mantenida por las comunidades campesinas andinas y también, en cierto grado, por el gran sector que vive en las ciudades y en la costa y que tiene poco acceso a la energía barata. Aquí no voy a revisar la problemática de la agricultura andina y campesina pues ya hay una literatura científica extensa, solo hay que resaltar que no se necesitan grandes inversiones energéticas para efectuar mejoras significativas. En el Perú, el 25% de las tierras agrícolas están ubicadas en las pendientes de la sierra andina donde vive el 50% de la población; que contribuye con el 21% de la producción agrícola total, pero con el 50% de la producción de papa y 20% del maíz, es decir, con respecto a la papa esta población es autosuficiente (Altieri 1999: 199). He concluido ya antes (Earls 1989, 1996, 1998) que dada la heterogeneidad ambiental y la incertidumbre climática y microclimática, estos terrenos solo pueden ser cultivados exitosamente por medio de la *sociotecnología* compleja que se ha desarrollado en el curso de la historia andina.

Altieri (1999), mediante una revisión de unos 200 proyectos de desarrollo sostenible en comunidades campesinas, concluyó que aunque el desarrollo agroecológico en las comunidades no ofrece una panacea para el problema alimenticio, la introducción de nuevas técnicas apropiadas sí ha dado lugar a incrementos significativos en las cosechas. Es importante notar que en los países andinos estas mejorías a menudo

²⁶ Sin embargo, quiero enfatizar que la globalización informática actúa para difundir las numerosas nuevas ideas que van generándose acerca de la misma crisis.

resultan de la reintroducción de tecnologías autóctonas de manejo ambiental que fueron abandonados en el curso de la historia colonial y republicana (De la Torre y Burger 1986; Earls 1989; Lajo y otros 1982; Rivas y otros 1999; Erickson y Chandler 1989; Llerena y otros 2004, entre otros).

En este trabajo no estoy presentando un nuevo modelo de desarrollo, solo he querido mostrar que el modelo actual basado en el acoplamiento estrecho al sistema global —que ha entrado en una crisis profunda— ya no es viable. El Perú tiene que elaborar un modelo alternativo de desarrollo que tome en cuenta los cambios violentos en proceso que hay en el mundo y que permita reorientar la agricultura del país de acuerdo con las posibilidades y las constricciones que son consistentes con la organización de un sistema de baja ganancia energética. Este modelo incorporará la información sistémica necesaria para aflojar el acoplamiento en las diferentes esferas de interacción con el sistema global que no son viables pero también para estrechar los lazos de cooperación organizativa y científica en la búsqueda de nuevas soluciones (Holling 2004). La transición no va a ser suave, pero si a eso le sumamos el impacto de las fuerzas exógenas del sistema global al que estamos acoplados, los resultados serán catastróficos para el país.

Capítulo III

El carácter de la agricultura andina

Una versión preliminar de este capítulo fue presentada en la Conferencia: «Agricultura inca y cooperación e investigación israelí», auspiciada por la PUCP y la Embajada del Perú en Israel, realizada en el Volcani Centre, Bet-Dagan, Israel, 1998.

Introducción

Hay un enigma evidente que subyace a la mayor parte de la discusión sobre la agricultura andina: ¿cómo se las arreglaron los incas para conseguir los enormes rendimientos agrícolas que informan las crónicas de Cieza de León y otros, confirmados por el trabajo arqueológico (Morris 1981: 327-406)?; y ¿por qué casi todos los intentos por elevar la productividad agrícola en alta montaña con tecnología exclusivamente occidental, colonial y moderna, han fracasado?

Para una primera aproximación debería notarse que desde la colonia la gran mayoría de haciendas se han ubicado sobre las áreas de riberas costeras y planas, sobre la parte inferior de los valles interandinos más amplios (Mantaro, Cajamarca, Cochabamba, etc.) así como en ciertas áreas de las planicies alto andinas —usadas principalmente para la actividad pastoril—. Estas son precisamente las áreas menos comunes o atípicas de la geografía de los Andes y es en las únicas en las cuales han sido implementadas con éxito las estrategias agrícolas occidentales, caracterizadas por la alta tecnificación, el monocultivo, entre otras.¹ Las que más

¹ Hasta la Reforma Agraria de finales de los 60 e inicios de los 70, la producción agropecuaria de las haciendas ubicadas en las áreas accidentadas y empinadas de los Andes, no fue directamente manejadas por sus propietarios. La producción en estas haciendas estaba a cargo de los propios campesinos andinos que allí vivían, utilizando técnicas andinas tradicionales, y cada año los propietarios recibían una porción de la cosecha. Por tanto, a

abundan son las áreas inclinadas y accidentadas, en las cuales se ubican la mayoría de comunidades campesinas andinas hoy en día. En este trabajo trataremos de presentar algunas de las razones que podrían explicar esta circunstancia aparentemente enigmática.

Muchos autores, comenzando por algunos de los cronistas, seguidos por antropólogos, arqueólogos, historiadores, agrónomos y otros hasta la actualidad, han reconocido que hay cierto carácter especial en la agricultura andina prehispánica. En este artículo demostraré que este carácter especial tiene mucho que ver con la naturaleza de las condiciones climáticas en las altitudes de la zona tropical andina y con los modelos organizativos que se relacionan con ella. Uno de los primeros intentos sistemáticos de interpretar la calidad y la evolución de la civilización andina en relación con la estructura del ambiente se debió a Carl Troll (1980), cuyo trabajo ha sido una fuente constante de inspiración para muchos estudiosos de este problema, incluyendo al autor de este estudio. La característica clave de este ambiente está mejor expresada por un término, la diversidad. No sostengo que el ambiente determine la cultura inca y andina, pero como Flannery y otros resaltaron en 1989, la cultura no es neutralmente adaptable. La situación ecoclimática en las zonas altas impone restricciones sobre lo que puede hacerse y lo que no. Un sistema agrícola viable en el ambiente andino es aquel que puede mantener su propia estabilidad frente a la muy alta incertidumbre generada por esta diversidad.²

En la primera parte de este artículo me referiré a esta diversidad y los principales principios físicos subyacentes a ella. Primero haré un breve recuento de la diversidad espacial andina y de los gradientes climáticos asociados a ella; luego de esto será discutido el factor de la diversidad temporal y el riesgo. En la segunda trataré de las estrategias de administración de incertidumbre ecoclimática que fueron incorporadas en la organización socioeconómica del incanato y en algo de su desarrollo preinca, muchas de las cuales continúan siendo empleadas en las comunidades

estas haciendas es mejor verlas como una forma particular de agricultura andina adaptada al sistema de la hacienda, antes que como una implementación de la agricultura europea.

² Para una discusión general de la evolución de las estrategias del manejo por parte de las sociedades andinas véase a W. Isbell (1978: 303-313).

autóctonas andinas modernas. En la tercera parte describiré cómo la experimentación constante es un requisito para la viabilidad agrícola en los Andes y describiré algunos resultados de mi estudio del sitio experimental agrícola inca de Moray. En el transcurso de la discusión de estos puntos se aclarará lo que quiero decir respecto al carácter de la agricultura andina e inca.

1. Ecoclimatología en altas altitudes

Hay varias gradientes climáticas de las que surgen las condiciones ecoclimáticas en la sierra alta de los Andes peruanos sur y centrales, condiciones muy diferentes de aquellas en lugares cercanos al nivel del mar. Las condiciones atmosféricas sobre la costa desértica y la selva lluviosa tropical están caracterizadas por su alta humedad y el estrecho rango de las fluctuaciones de temperatura diarias. En las zonas altas el aire es en general seco y la evapotranspiración es alta. Se puede tener una buena idea de la diversidad climática y espacial en los Andes tropicales a partir de la clasificación hecha por Holdridge de los sistemas ecoclimáticos del mundo en las denominadas zonas de vida. De acuerdo con este esquema, las ecologías del mundo están agrupadas en 104 zonas de vida (Holdridge 1947). Puesto de manera muy sencilla, las zonas de vida son definidas en relación con la intersección de tres factores: la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración. Una clase determinada de asociaciones de plantas caracteriza cada zona de vida. Aplicando este esquema al Perú, Joseph Tosi definió 84 zonas de vida distribuidas en todo el país (Tosi y ONERN 1978); por lo tanto el Perú, con solamente 0,86% de área del mundo cuenta con el 80% de sus zonas de vida, es decir tiene la diversidad por unidad de área más grande que cualquier país en el mundo entero. Flannery, Marcus y Reynolds sostienen:

Tan complejas son las gradientes ambientales entre picos de montaña coronados de nieves y el piso de ribereño de las cuencas, que todas las descripciones publicadas son simplificaciones. La mente humana normalmente reduce una cantidad desalentadora de información ambiental a un conjunto de modelos o categoría ideales y esto es tan válido para los

ecólogos occidentales que han estudiado los Andes como lo es para los indios. (Flannery, Marcus y Reynolds 1989:11)

Como el párrafo anterior implica, la complejidad es mucho mayor de lo que cualquier clasificación podría sugerir. Ocurre que las zonas de vida o cualquier otra clasificación ecológica forman un mosaico en el área andina. Las zonas están distribuidas de manera discontinua y el número visible y el emplazamiento de zonas depende de la escala de resolución usada en el trabajo. El mapa ecológico del Perú (Tosi y ONERN 1976) está en una escala de 1:1.000.000. En una escala 1:100.000 la mayoría de las zonas representadas en la escala más alta se abrirían en un mosaico de zonas más pequeñas; debería ocurrir que lo señalado en la escala mayor sea lo más representativo, pero en realidad estaría mezclado con otras zonas mucho más pequeñas. De acuerdo con mi experiencia, la incoherencia se repite a una resolución de 1:10.000. A decir verdad, mi investigación en Bolivia sugiere que está involucrado un proceso de reiteración de autosemejanza fractal, tal como la que se ve al explorar un litoral en niveles de resolución diferentes. En cada nivel de escala el patrón es similar, aunque hay diferencia en los detalles. En los Andes peruanos centrales, en donde el terreno es más accidentado, el número de niveles de resolución visibles aumenta.

Ahora me referiré brevemente a las gradientes ecoclimáticas de las que surge tanta diversidad en los Andes.

1.1. La gradiente de la presión atmosférica

La presión atmosférica al nivel del mar es de aproximadamente 1.013 milibares (mb) y disminuye con la altitud de acuerdo con una función, la cual en el rango altitudinal de los Andes puede ser considerada como lineal. A los 5.500 metros sobre el nivel del mar (msnm) la presión está aproximadamente a la mitad de su valor al nivel del mar. La presión atmosférica aproximada desde el nivel del mar hasta los 5.500 m se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 1: Altitud y presión del aire

Altitud (msnm)	Presión barométrica aproximada (mb)
0	1.013
1.000	895
2.000	795
3.000	700
4.000	620
5.000	550
5.500	515

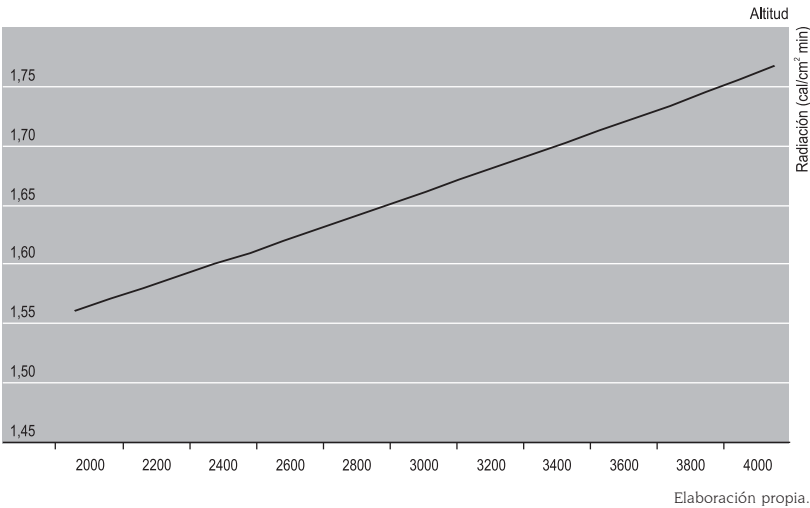
1.2. La gradiente de la radiación solar

El polvo en suspensión y la contaminación del aire en las altitudes más bajas hacen poco significativo hablar de tendencias generales con la gradiente de radiación solar como ocurre con la presión atmosférica. Sin embargo, han sido obtenidos en la sierra un número razonable de registros experimentales. El físico suizo P. Ambrossetti realizó una buena aproximación empírica en la región de Ayacucho en 1979 para la capa de 2.000 a 4.000 msnm en la banda de onda corta de 03-3 μ . El siguiente gráfico (figura 1) representa la energía de la radiación directa entrante al mediodía para los períodos en los que el Sol pasa cerca del cenit a los 13° de latitud, momento en el cual la radiación directa alcanza a 1,63 cal/cm²/min. (a 2.700 msnm) y la radiación global³ alcanza un valor de 1,7cal/cm²/min. En días completamente nublados la radiación global desciende a la mitad de este valor, sin embargo para el año entero el valor está casi constantemente ligeramente por debajo de 0,8 cal/cm²/min. Mientras las horas promedio de exposición solar directa caen aproximadamente 50% de lo teóricamente posible en la estación lluviosa, el promedio de radiación global diaria es casi el 90% del valor con cielo claro en los mismos meses. Esto es porque la radiación difusa atmosférica (Raleigh) está mayormente en las longitu-

³ La radiación global es la suma de la radiación directa y la radiación de onda corta difusa.

des de onda más cortas (si esto no fuera cierto encontraríamos difícil ver en días nublados). Mientras la ecuación empírica usada puede parecer que da resultados exagerados, en Puno se han registrado $1,72 \text{ cal/cm}^2/\text{min.}$ a 3.852 metros de altitud (Grace 1983). El hecho sorprendente es que la radiación a grandes altitudes con cielo claro es mucho más cercana al valor de la constante solar⁴ que a los valores registrados cerca del nivel del mar en las inmediaciones de Lima.

Figura 1: Gradiente de la radiación solar máxima en relación con la altitud para cielo despejado a medio día



La gradiente de radiación solar entrante está relacionada con la gradiente de presión atmosférica. El aire menos denso en mayores altitudes es incapaz de atrapar y conservar tanta energía de la radiación solar entrante como en las altitudes más bajas, de modo que el aire es más fresco

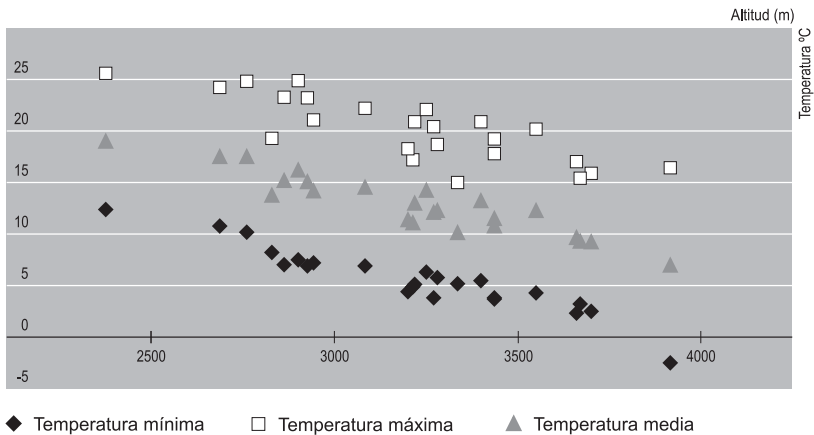
⁴ La constante solar es la radiación solar recibida en el exterior de la atmósfera. Las observaciones por satélite han demostrado que varía desde 1,93 hasta 1,98 $\text{cal/cm}^2/\text{min.}$, dependiendo del comportamiento energético del Sol mismo.

y el suelo más caliente a la luz del Sol. La baja densidad del aire también aumenta la emisión de radiación térmica nocturna saliente: «El microclima de niveles altos [altitudes] es por consiguiente no solo más extremado en su mayor recepción de calor durante el día sino también su pérdida de calor en la noche es mayor» (Geiger 1959: 21).

1.3. La gradiente de temperatura

En los Andes centrales y sur del Perú la temperatura del aire registrada a 1,5 m sobre el nivel del suelo disminuye en 6,4°C por cada kilómetro de altitud durante la temporada de siembra que es relativamente seca y un grado menos en los meses más lluviosos. En la figura 2 he representado gráficamente los promedios de las temperaturas para el mes de octubre de un período de 20 años, para 24 estaciones ubicadas en las áreas interan-

Figura 2: Promedios de temperatura máxima, mínima y media de octubre calculados en base a 20 años de datos en 24 estaciones de diferentes altitudes del Perú sur central



Elaboración propia.

dinas de los departamentos de Ayacucho, Apurímac, Cuzco y Huancavelica⁵ (según datos del SENAMHI). La correlación inversa entre el promedio de temperaturas mínimas, medias y máximas del aire con la altitud está clara. Sin embargo no hay correlación entre el rango de temperaturas promedio diurnas con la altitud como se podría esperar de las consideraciones teóricas. Esto es atribuible a la gran influencia de las particularidades topoclimáticas de los mesoambientes locales.

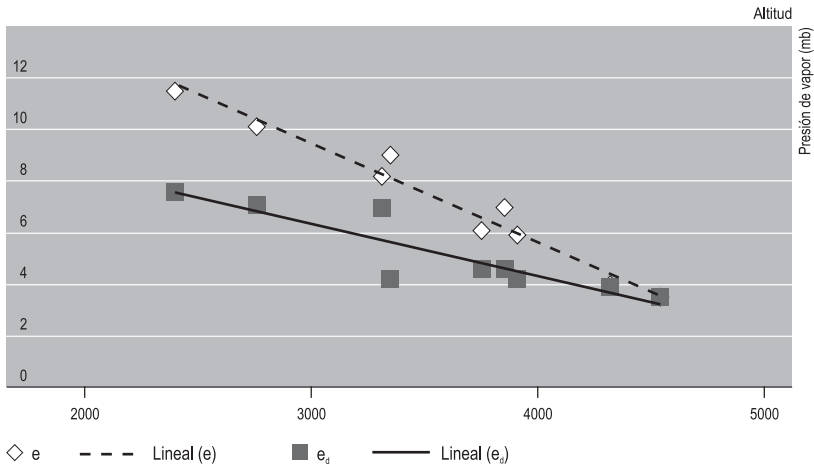
1.4. Humedad aérea

La cantidad de vapor de agua (e) en el aire disminuye con la altitud debido a la disminución de la presión atmosférica y la temperatura. Sin embargo, ya que la presión de vapor saturada (e_s) es básicamente una función de la temperatura y disminuye por ello con la altitud, el déficit de presión de vapor ($e_d = e_s - e$) disminuye mucho más despacio. En la figura 3 he representado gráficamente los valores registrados para e_d y e en 9 estaciones interandinas comparables a las condiciones geográficas y sociales más arriba citadas, pero donde la humedad ha sido registrada por psicrómetros (Frére, Rea, Rijks 1975). Debido a la escasez de datos fácilmente disponibles he incluido dos estaciones, una en la región del altiplano y otra en la montaña de Puno para conseguir una mínima muestra estadísticamente representativa para estimar las tendencias. En la estación más alta, Paucarani a 4.541 msnm los valores medios de e_d y e son iguales a 3,5 mb donde las dos líneas de tendencia se intersectan. Los autores antes citados remarcan que cuando la saturación de vapor de agua es calculada en relación con las temperaturas mínimas, los valores obtenidos para e son aproximadamente los mismos que aquellos calculados para e_s para las temperaturas mínimas. Esto implica que la humedad en altas altitudes es impulsada por las temperaturas aéreas mínimas. En las regiones costeras húmedas la diferencia entre promedios Tmin, Tmax solo es de aproxima-

⁵ Las estaciones fueron elegidas como representativas de las condiciones climáticas de las áreas con altas concentraciones de comunidades indígenas actuales.

damente 6°C o 7°C, mientras que en altitudes mayores las fluctuaciones diurnas promedian aproximadamente los 15°C.

Figura 3: Promedios anuales de la humedad y déficit de saturación en la sierra sur



Se indican las tendencias de regresión lineal de la humedad (e) y el déficit (e_s) según la altitud.

Elaboración propia.

1.5. La altitud y la incertidumbre

En las grandes altitudes la variabilidad climática es mucho mayor que en altitudes más bajas. Rudolf Geiger señala que en las regiones más altas de montaña, con densidad atmosférica y densidad de vapor de agua más bajas, así como con más alta radiación solar y contrarradiación termal que al nivel del mar, la influencia de la temperatura del suelo sobre el crecimiento de las plantas es mucho más importante que la temperatura del aire. Microclimas completamente diferentes pueden coexistir porque las diferencias relativamente pequeñas en la composición del suelo, el color y la textura del mismo, así como la variabilidad entre sombra y sol, etc., disminuyen los efectos homogeneizadores de la advección y conducción térmica.

Las pequeñas diferencias en la temperatura del suelo originan pronunciadas diferencias en los procesos metabólicos de las plantas y en la duración de sus ciclos vegetativos. Como Geiger sostiene:

En montañas altas con sus temperaturas bajas, el mundo de las plantas puede crecer solamente cerca del suelo, y la medida en que la temperatura del suelo excede a la del aire aumenta con la altitud. (Geiger 1959:35)

1.6. La incertidumbre y la predictibilidad

En este acápite me referiré al problema de la incertidumbre temporal andina en relación con el importante, original y sistemática investigación que realizó B. Winterhalder en 1988 sobre el tema de la ecoclimatología andina y la predictibilidad.

El trabajo de Winterhalder se enfocó en la aparente incongruencia de vastos sistemas de terrazas agrícolas irrigadas en las laderas occidentales como las del valle del Colca y vastos sistemas de terrazas sin irrigación sobre las laderas orientales como en Sandia. Su interés tendía a determinar hasta que punto esta muy importante diferencia tecnológica agrícola podía ser explicada en términos de los regímenes climáticos diferentes. Para caracterizar el inicio y término de las estaciones agrícolas climáticamente adecuadas, estableció un tanto arbitrariamente, como él mismo admite, una precipitación mensual de $\geq 64\text{mm}$ y una temperatura mínima de $\geq 0^{\circ}\text{C}$. Copió de los registros de SENAMHI los datos existentes de precipitación mensual y temperatura de 84 estaciones ubicadas cerca del *transecto* —corte transversal— dibujado perpendicularmente al eje de la cordillera andina en los departamentos de Arequipa, Cuzco y Puno en el sur del Perú, y que cubren un rango altitudinal desde cerca al nivel del mar hasta los 4.600 m de las tres provincias geoecológicas llamadas ladera occidental seca, altiplano y ladera oriental húmeda, y estableció un índice de predictibilidad que se extiende desde cero para condiciones totalmente imprevisibles hasta uno para condiciones totalmente predecibles.⁶ El índice tiene dos componentes: la

⁶ Este índice de predictibilidad tiene mucho en común con la medida de redundancia como la definió Shannon en la Teoría de la Información.

constancia, que expresa la variabilidad interanual, y la contingencia, que expresa la variabilidad mes a mes en una escala estacionaria. Aquí me referiré solamente del índice de predictibilidad compuesto.

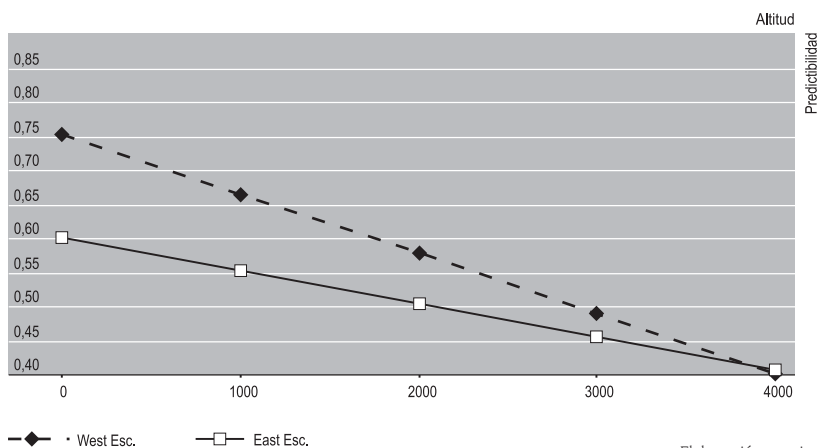
El análisis de los datos de Winterhalder muestra que para la ladera occidental (desde el desierto costero de las tierras bajas hasta la divisoria de aguas) la precipitación aumenta con la altitud, mientras las temperaturas mínimas disminuyen. Por otro lado, la precipitación disminuye con la altitud en la ladera oriental (desde la selva tropical de tierra baja hasta la divisoria de aguas), mientras la temperatura del aire disminuye en menor medida que en el Occidente, a la misma altitud. En ambos casos las regresiones son significativas más allá del nivel de predictibilidad del 1%. Para la región del altiplano, la regresión de la precipitación sobre la altitud carece de significación estadística, lo cual se debería básicamente a que los efectos topográficos locales enmascaran la relación más general con la altitud. Para el altiplano oriental he registrado una precipitación de 75 mm en el mes de noviembre de 1997 en una estación a 4.100 msnm, mientras en otra estación distante menos de 1 km, a 3.960 msnm, la precipitación era solamente de 15 mm. Por otro lado, las temperaturas indican la misma alta correlación con la altitud, como se grafica en la figura 3.

Las regresiones hechas por Winterhalder de los índices de previsibilidad derivados de la precipitación sobre la altitud para ambas regiones son significativas para los mismos niveles que para la precipitación.⁷

En la figura 4 he representado gráficamente el índice de predictibilidad de la precipitación usando las ecuaciones de regresión lineales de Winterhalder tanto para la ladera oriental como para la occidental. Es importante que para ambas regiones geoecológicas la predictibilidad disminuya a pesar del hecho de que las gradientes pluviales globales correspondientes son inversas. La incertidumbre pluvial aumenta con la altitud, más rápidamente en las laderas occidentales que en las orientales debido a la humedad global mayor de la última, pero a los 4.000 m ambos

⁷ Es muy interesante que él encuentre que una regresión cuadrática polinomial proporciona un mejor ajuste para la precipitación/altitud en la ladera occidental que una regresión lineal. Tan solo puedo decir que este es otro factor más que demuestra nuestra ignorancia de la ecoclimatología.

Figura 4: Predictibilidad de la precipitación en relación con la altitud en las dos pendientes andinas según Winterhalder

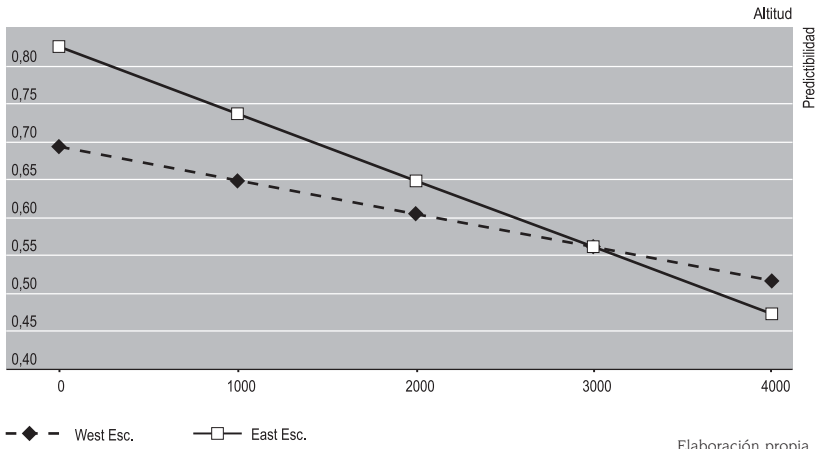


convergen al valor de 0,4. En la región del altiplano los índices tanto de precipitación como de temperatura mínima no indican ninguna correlación con la altitud, la predictibilidad pluvial sobre el altiplano es muy regular, con un valor de solo 0,5. Los datos para la ladera occidental llevan a Winterhalder a la convincente conclusión de que en altas altitudes la irrigación es empleada para reducir las irregularidades mensuales en la distribución del agua. Las irrigaciones en la costa son obviamente usadas por razones muy diferentes: la precipitación es tan predecible que, con la excepción de los años de el Niño, se sabe que no habrá suficiente lluvia.

Con respecto a la predictibilidad de la temperatura mínima el cuadro es similar. Winterhalder escogió el valor de $T_{min} \geq 0^{\circ}\text{C}$ porque a temperaturas más bajas la certidumbre de que escarchará hace que la siembra de la mayoría de los cultivos sea impracticable. En la figura 5 la relación de la predictibilidad de T_{min} con la altitud es representada gráficamente para ambas laderas.

El cuadro es similar tanto para la incertidumbre de la temperatura mínima como para la precipitación, con la importante diferencia de que la predictibilidad disminuye más bruscamente en la ladera oriental que en la occidental.

Figura 5: Predictibilidad de la temperatura mínima con respecto a la altitud para ambas vertientes según Winterhalder



Winterhalder se refiere luego al inicio y conclusión de las temporadas agrícolas en las diferentes altitudes de los Andes, en relación con los resultados dados en el cuadro de arriba. La temporada agrícola es definida por constricciones en la disponibilidad de agua y por la temperatura. En las partes más bajas de la ladera oriental la estación lluviosa dura 12 meses; se acorta cuando la altitud se incrementa y se reduce a aproximadamente cinco a seis meses en el altiplano y en las altitudes medianas de las laderas occidentales, debajo de lo cual disminuye rápidamente hasta cero en las laderas más bajas de Arequipa. Para la mayoría de las áreas orientales, el altiplano y las laderas occidentales superiores, el período de precipitación adecuado está incluido en el período de las condiciones térmicas apropiadas, aunque ajustadamente en las regiones más altas y en la parte superior de las laderas occidentales. En la ladera occidental, a altitudes de 4.000 a 3.000 m la temporada lluviosa se reduce de tres a cuatro meses hasta cero, en tanto que la temporada térmica se amplía rápidamente hasta 12 meses. Como Winterhalder plantea: «El agua abundante de las elevaciones más altas es trasladada una corta distancia ladera abajo hacia condiciones térmicas favorables, donde se puede aumentar la cantidad de agua, tan restringida por la duración de las lluvias» (Winterhalder 1994).

Dejaré la discusión de estos resultados para la siguiente sección de este artículo en la que el tema principal son las estrategias básicas para el manejo de la incertidumbre empleadas por el Estado Inca y los gobiernos preincaicos que las desarrollaron. Esto se debe en parte a que Winterhalder llega a conclusiones similares a las mías en publicaciones previas, y en parte debido a los resultados de mi investigación sobre la administración de agua en el altiplano oriental y sus valles adyacentes. Será necesario mencionar las pruebas arqueológicas, etnohistóricas y etnográficas para llegar a conclusiones más generales.

1.7. Una conclusión ecoclimática general para los Andes

A la luz de las discusiones anteriores podemos llegar a una conclusión. En primer lugar, hay un incremento en la diversidad espacial y temporal con la altitud en los Andes. Esto puede ser explicado en relación con los factores señalados por Geiger y adecuadamente ilustrados por el trabajo de Winterhalder y otros. La baja presión y la sequedad del aire reducen la interacción entre los fotones de radiación entrantes y las moléculas del aire, entonces una proporción mayor de fotones a mayor altura interactúa directamente con la superficie del suelo. Por lo tanto, las diferencias de color, humedad y textura de la superficie con sus diferentes reflectividades —albedo— se traducen en una significativa diferenciación de temperaturas de superficie y una diferenciación correspondiente en la cubierta de biomasa. En la noche, la altura del horizonte aparente, incluyendo cualquier arbusto y árboles cercanos, el albedo de superficie en la banda térmica infrarroja y el grado de la nubosidad del cielo condicionan la probabilidad de las heladas.⁸

⁸ He visto los efectos de fuertes heladas en campos de menos de 100 metros cuadrados de superficie. En algunas partes las plantas estaban totalmente negras debido a la quemadura del frío, mientras otras adyacentes estaban totalmente ilesas. La protección microclimática contra las heladas por parte de los andenes se me hizo notoria en Puno, cuando vi que todas las plantas cultivadas a una distancia de menos de 3 m de la pared de la terraza estaban totalmente verdes después de una noche de helada, mientras aquellas un poco más alejadas estaban totalmente negras. Una línea corría paralela a la pared, separando las plantas sin quemar de aquellas congeladas.

El ambiente de montaña origina vigorosas y rápidas fluctuaciones de temperatura. Una nube circulante hace que la temperatura del aire caiga aproximadamente 10°C a 15°C en unos minutos, y 20°C de diferencias diurnas son normales. Encima de una altitud de aproximadamente 2.200 m no hay época del año totalmente libre de heladas. Si Winterhalter hubiera usado temperaturas de superficie para su estudio en lugar de temperaturas aéreas, indudablemente habría encontrado índices de incertidumbre más pronunciados que aquellos deducidos a partir de las temperaturas del aire.

2. Tecnologías de manejo de riesgos: la estrategia del paralelismo masivo

Lo que denomino paralelismo masivo es una expresión que he tomado prestada de la terminología informática y su significado se aclarará al final del artículo, por el momento puede entenderse este como el hecho de emprender muchas acciones diferentes para enfrentar posibles contingencias. El paralelismo masivo toma en los Andes muchas formas, una de las más conocidas es la de tener acceso al mayor número posible de tierras para cultivar —chacras— y cultivos, y el más amplio rango de condiciones ecoclimáticas posible; por ello no es inusual que una familia tenga 30 o más chacras dispersas. De este modo pueden estar seguros de que cuando fracase la cosecha en algunos lugares, la cosecha del conjunto cubrirá la pérdida, ya que hay que presuponer que algo se perderá en algún lugar por la incertidumbre climática de los Andes. El cultivo múltiple en la misma chacra es casi universal, algunas plantas resisten las condiciones desfavorables mejor que otras; pero debido a que uno nunca puede estar seguro qué condiciones van a darse, es lógico sembrar asociaciones de cultivo formadas por plantas con diferentes clases de resistencia para diferentes formas de tensión —estrés—. Esta táctica es probablemente muy antigua y ayuda a explicar la enorme variedad de plantas alimenticias cultivadas. Otra táctica ampliamente usada es la siembra escalonada del mismo cultivo: a menudo el mismo tipo de semilla es sembrado hasta en tres

intervalos temporales, quizás en tres meses, por lo tanto si una helada o una granizada arruinan una o dos de las cosechas, otra de ellas sobrevivirá.

Asimismo, los indicadores ecológicos son siempre observados. Estos pueden ser básicamente catalogados como indicadores biológicos y meteorológicos. Muchas plantas y animales son genéticamente programados para una gran sensibilidad a las condiciones climáticas incipientes. Por ejemplo, los patos salvajes en la región del lago Titicaca parecen prever los incrementos y caídas en el nivel de la superficie del agua; hacen sus nidos más altos si intuyen un aumento en el nivel y más bajos si intuyen un descenso. Las peculiares condiciones atmosféricas pueden dar lugar a algunos fenómenos visuales extraños, por ejemplo un arco iris más bien redondo se formará a veces alrededor del Sol, lo que puede indicar el inicio de una temporada seca. Sin embargo, de acuerdo con su énfasis en el paralelismo masivo. La gente no está satisfecha con una sola observación, sino observa el comportamiento de tantas entidades diferentes como sea posible y hacen un balance de sus diferentes pronósticos para llegar a los mejores criterios para la toma de decisiones. En el nivel local por lo menos, hay medios muy eficaces empleados para llegar a un consenso rápidamente entre todos los afectados por la decisión. Esto garantiza la coordinación que la actividad agrícola requiere en el mundo andino.

Estas consideraciones subyacen en la base del diseño y uso de toda tecnología agrícola andina y su operación organizada, lo cual veremos en siguientes subsecciones. La forma como se hace esto involucra algunos procedimientos muy complicados que no pueden ser abordados aquí y que pueden revisarse en los estudios de Araujo y Earls (Araujo 1988; Earls 1991b, 1992, 1996).

El sistema agrícola inca es básicamente una síntesis de las técnicas, tecnologías y estrategias desarrolladas durante varios milenios por un gran número de entidades socioculturales en las diferentes subáreas del ambiente andino. En la discusión anterior del trabajo de Winterhalder se mostró que la irrigación en las tierras altas —en particular en la ladera occidental— tenía el propósito básico de atenuar el riesgo debido a la impredecibilidad térmica y pluvial, transportando el excedente hídrico desde zonas de gran altitud hacia áreas más bajas. El valle del Colca tiene una provisión de agua natural escasa e incierta (300 mm - 400 mm), pero

cuenta con una temporada termalmente adecuada mucho más larga. Las laderas de en medio de este valle están cubiertas de grandes sistemas de terrazas agrícolas, denominadas andenes, muy bien hechas. Antes de entrar directamente en el tema de la agricultura incaica debo dar brevemente una idea general de algunos patrones generales de los sistemas agrícolas preincaicos; porque algunos de estos patrones fueron mantenidos durante el incanato y continúan en uso actualmente, y también porque muchas de las innovaciones incaicas no pueden ser aclaradas fuera de su contexto histórico.

Todas las cuencas de la costa suroeste del Perú están caracterizadas por sistemas de andenes a gran escala. Sin embargo, los estudios arqueológicos efectuados en el valle del Colca, bien resumidos e interpretados por John Treacy (1994), indican que los andenes más antiguos de este valle eran cultivados sin irrigación; el manejo de la escorrentía de la precipitación lleva la provisión de agua.⁹ Esta forma de agricultura continuó en el período de la incorporación de la región al Imperio Wari después del siglo VII d. de C. Este período temprano fue caracterizado por una alternancia general entre fases húmedas y secas,¹⁰ pero seguidas por un período muy húmedo bastante largo que duró entre los 760 y 1040 d. de C. Parece que una agricultura basada en la dirección de la escorrentía, que involucra tecnología de control de agua muy sofisticada habría estado disponible para cultivos resistentes a la sequía y con un poco más de precipitación que los 300 mm a 400 mm del valle de hoy en día, aunque parece que la irrigación de andenes o la reconstrucción de algunos más viejos para irrigarlos, se inició en este período. Desde 1160 a 1500 d. de C. hubo una prolongada fase seca en la que tuvo lugar una transformación general hacia la agricul-

⁹ Aunque es necesaria mucha más investigación, es muy probable que estas conclusiones se apliquen a los sistemas de terrazas de toda la costa sur de la ladera occidental. Es interesante que al norte de Lima haya muy pocas terrazas en los valles occidentales. Sin embargo, nosotros hemos observado buenos sistemas en los valles interandinos del Callejón de Huaylas en Huallpamayo, Ancash. Es aún más interesante que estos parezcan estar asociados con cerámica y arquitectura que inmediatamente depredó la expansión wari en el área.

¹⁰ Este dato se tomó de un estudio de núcleos de hielo en el glaciar Quelccaya, cercano al Cuzco. (Thompson, Mosley-Thompson, Bolzan y Koci 1985).

tura en terrazas irrigadas. La ocupación inca fue marcada por la intensificación de esta transformación que ya entonces estaba en marcha.

Este patrón de desarrollo agrícola, que va desde un estadio temprano de agricultura de terrazas irrigadas por el manejo de la escorrentía de precipitación en las épocas tempranas de Wari hacia un sistema basado en la irrigación, es similar en otras partes del Perú. Sin embargo para la mayor parte del altiplano y los grandes sistemas de terrazas esculpidos en la escarpa oriental, el control de la escorrentía del agua nunca fue reemplazado por andenes irrigados, excepto a lo largo de algunos fondos de valle más secos, que parecerían haber sido de especial interés para los incas.¹¹ Debe notarse que la irrigación extensiva fue empleada en los valles costeros al menos un millar de años antes de que empezara a ser implementada en las tierras altas. No debe pensarse que la irrigación no fue practicada hasta más tarde porque no sabían como hacerla, fue solo que no la consideraron necesaria. Farrington (1980) ha demostrado que la irrigación inca de la sierra hizo uso extensivo de flujos supercríticos en los canales, mientras que esto generalmente no se llevó a cabo en los sistemas costeros. Como Mitchell (1981) y otros han demostrado, y de acuerdo con el argumento de Winterhalder, la irrigación de tierras altas es básicamente para el control de riesgos, mientras que en los lugares más secos cercanos a la costa no podría haber habido ninguna agricultura sin irrigación. Como es usual en los Andes, ninguna explicación en términos de un solo factor es satisfactoria. Un área con lluvia mínima pero suficiente para la agricultura y que utiliza la irrigación para atenuar el riesgo, puede descubrir con el inicio de las condiciones más secas que la agricultura es imposible sin riego.

Sobre las laderas de valle y la montaña oriental como los valles de Sandia en el Perú, y de Charazani, Mocomoco y Ambana en Bolivia (Camino, Recharte y Bidegaray 1981; Dollfus, Saignes, Heran y otros 1980; Schulte 1996) vastos sistemas de andenes sin riego fueron esculpidos para

¹¹ Al respecto hay que notar que según la población aymara de la zona el actual cambio climático está trayendo una severa sequía en las partes bajas de las laderas de los valles. Esto está ocurriendo precisamente en los mismos lugares donde los incas introdujeron la irrigación durante el largo período seco que sobrevino durante su hegemonía política.

la producción agrícola. Estos fueron trabajados por una combinación de rotación sectorial y descanso —*aynoqa*, *layme*, *manda*—, y con el control del agua por una jerarquía de canales: los canales más profundos corresponden a los cauces de los torrentes naturales intermitentes y son amurallados artificialmente, los canales superiores son más pequeños y tienen cursos que son modificados rápidamente por las personas que los trabajan. En condiciones de sequía el agua es canalizada hacia las parcelas cultivadas y cuando el agua es excesiva son vueltas a excavar rápidamente con herramientas de mano como la *raucana* para desviar el agua a los canales de drenaje más grandes.¹²

2.1. Algunos importantes desarrollos tecnológicos agrícolas andinos

La administración de la lluvia y otras fuentes de agua fue exhaustivamente desarrollada en el altiplano en asociación con otras tecnologías agrícolas. Solo mencionaré los dos ejemplos más conocidos de estas: los campos elevados o *camellones* (*waruwaru* en quechua y *sukka qolla* en aymara), y las *qocha*.¹³

La agricultura de campos elevados es practicada en muchas partes del mundo. Fue usada en Dinamarca en los períodos previkings y vikingos y es muy utilizada actualmente en las altas mesetas húmedas de Papúa Nueva Guinea; así como también practicada en muchas otras partes de Sudamérica donde el drenaje natural es insuficiente, o donde la estación de lluvia es breve pero intensa y seguida por una larga temporada seca. Consiste en cavar canales de drenaje en fajas a través del suelo y en apilar la tierra en cumbres para formar cimas en las que se sembrarán los cultivos. Las elevaciones y los canales varían entre aproximadamente uno y tres metros de ancho, y la cumbre se extiende de 80 a 150 cm por encima del

¹² Mi investigación en esta zona fue apoyada por la ONG Ricerca e Cooperazione, la PUCP y CITPA.

¹³ Excavaciones circulares artificiales destinadas a captar el agua en los períodos de lluvia y enfrentar los períodos secos. El espejo de agua servirá para proteger las plantas sembradas a su alrededor contra las heladas.

fondo del canal. El estudio más sistemático sobre esto se atribuye al arqueólogo Clark Erickson (1986, 1987, 1992, 1993), quien investigó en el Perú y Bolivia. Aunque estos sistemas son multifuncionales considero que su principal función está en relación con la administración del riesgo. El nivel de agua del lago Titicaca puede variar interanualmente tanto como un metro; entonces, en las estaciones de lluvias fuertes, cuando la superficie de crecida y las aguas se expanden más de 200 m desde la orilla, los cultivos sembrados no se inundan. Al mismo tiempo para niveles de agua bajos en el lago, las partes inferiores de los canales nunca están totalmente secas y el agua es conservada en la base de las elevaciones para ser transportada lentamente hacia arriba por capilaridad. Los orígenes de estos sistemas de *sukka qolla* pueden ser rastreados aproximadamente 3.000 años, hasta los más tempranos centros ceremoniales a gran escala en la región circundante del Titicaca en el altiplano. Erickson sin embargo hace una argumentación muy enérgica de que su construcción, mantenimiento y dirección eran el resultado de la coordinación entre grupos locales de agricultores antes que el resultado de la planificación dirigida por el Estado.¹⁴

La *qocha* por su parte, es un sistema tecnológico totalmente diferente que está ubicado a bastante distancia de las riberas del lago. Fueron investigadas primero por Jorge Flores y Percy Paz (1983), y estudios adicionales fueron llevados a cabo por Rosas (1986), pero a diferencia de los campos elevados su uso nunca fue interrumpido y son activamente empleados actualmente. Consisten en depresiones cóncavas geométricamente regulares que han sido cavadas en la llanura o bien son concavidades naturales remodeladas y se extienden aproximadamente 20 a 60 m de ancho. Los lados de las *qocha* son trabajados en 2 ó 3 niveles radiales

¹⁴ Debe anotarse que a continuación de la incorporación del altiplano al Estado Inca los campos elevados se abandonaron. Aparentemente los incas decidieron que el área era ideal para el pastoreo de camélidos y que los requerimientos agrícolas podrían satisfacerse con la construcción intensiva de andenes y los valles altamente productivos del este del lago. Los incas también extendieron el área de andenes en las colinas circundantes. Los sistemas yacían abandonados por cientos de años hasta que Erickson inició el Programa de restauración arqueológica aplicada, que fue tan exitoso que aún hay varias ONG y agencias gubernamentales de desarrollo involucradas en su restauración, aunque desafortunadamente a menudo sin el cuidado que caracterizó al trabajo inicial.

compuestos de surcos con los cultivos plantados sobre las elevaciones bastante pequeñas del medio. Las *qocha* son interconectadas por complicados sistemas de canales, de modo que son como una sarta de cuentas. El agua viene de la escorrentía de las lluvias que caen en la cuenca alta que está detrás de ellas. El control de los niveles de agua en las *qocha* es efectuado por un complejo sistema de diques y represas que son abiertos y cerrados según las condiciones lo exijan, y el exceso de agua es derivado a los arroyos y ríos que finalmente drenan en el lago Titicaca. Como ocurre con los campos elevados, estas estructuras pueden ser mejor comprendidas como un sistema de control de riesgos. Muchas *qocha* pueden ser usadas como reservorios para almacenar agua en períodos secos y para plantar cuando esté más húmedo. A menudo las dos funciones están combinadas: el agua es guardada en la base mientras las laderas son cultivadas. Flores estimó que también se originaron en el pasado muy distante, probablemente en la misma época que el *sukka qolla*.¹⁵

2.2. El control del espacio vertical

Fue básicamente gracias al antropólogo John Murra que la administración del espacio vertical fue reconocida como un factor fundamental que subyace a la agricultura andina e inca. Con un rango altitudinal agrícola que se extendió desde el nivel del mar hasta los 4.400m en las *punas* del noreste boliviano, es obvio que la mayoría de cultivos solamente estarían adaptados a cierto rango de altitudes, pero fue Murra el que relacionó esto con las formas organizativas documentadas en las fuentes coloniales españolas (Murra 1964, 1972, 1975). Relacionó las diferentes prácticas organizativas y asociaciones de cultivos con lo que él llamó *pisos ecológicos* y la estrategia

¹⁵ Inge Schejellerup (1986) ha descrito una muy interesante estructura en Atuén en el departamento de Amazonas a una altitud de aproximadamente 3.000 m Tanto los campos elevados como los andenes dependiendo de la pendiente parecen una inmensa qocha. Sus datos de C¹⁴ así como varios aspectos de la construcción muestran que los incas lo usaron, pero su origen es probablemente preincaico. Además ella describe otros artefactos agrícolas distintivos en la misma región.

andina de adquirir el máximo número posible de estos y los productos asociados a ellos. Murra ha mostrado como estos funcionaron en los pequeños señoríos y en los grandes reinos preincaicos del altiplano. Los pisos ecológicos, particularmente en áreas del sur peruano y norte boliviano estaban muy a menudo en territorios discontinuos como islas de un archipiélago. El reino lupaca, cuyo centro estaba en el altiplano, tenía *pisos* tanto en los valles costeros como en el bosque tropical oriental. El trabajo arqueológico reciente muestra que esta práctica es tan vieja como el período de formación de las civilizaciones andinas.

Siguiendo a Murra, Mayer y Fonseca (1979, 1988) han refinado adicionalmente el concepto del control vertical con la idea de *zonas de producción*. Cada zona de producción se caracteriza por una particular asociación de cultivos y una tecnología apropiada para la producción de los mismos, su propio sistema administrativo que balancea los requisitos del control comunal y las preferencias individuales, un calendario para la coordinación de las actividades productivas, y un sistema de tenencia de la tierra (Mayer 1985: 45-84). En muchos casos las diferentes zonas de producción están separadas por límites amurallados —artificiales—, particularmente porque la rotación de pastizales pone a menudo a los animales de pastoreo en una zona adyacente a otra donde las cosechas están madurando. Mientras hay una correspondencia aproximada entre los pisos ecológicos y las zonas de producción, atribuible a la verticalidad de la ecología andina en sí misma, Fonseca y Mayer (1988) dan ejemplos de la reasignación de las tierras en tres *pisos* naturales a cuatro zonas de producción. Las zonas de producción son construcciones mucho más artificiales que los pisos.

Mi interpretación de la literatura arqueológica (Kolata 1993; Schreiber 1991, 1992, Meddins 1991; Parsons, Hastings y Matos 1998) es que la administración vertical estilo *pisos* es más antigua y por un largo período fue el patrón social básico de la adaptación andina en el terreno abrupto y variado del Perú central. Esta forma de administración permanece en la mayor parte de la región más al sur de los alrededores del lago Titicaca, aunque también se observa en otras regiones. En el siglo VII la mayor parte de esta región fue incluida en la expansión de Imperio Wari. Los wari hicieron drásticos cambios en la mayoría de sistemas productivos locales (Parsons 1998), de los cuales los más significativos fueron la construcción

masiva de enormes andenes en las laderas de los valles y los sistemas de irrigación. Las laderas de los valles por lo menos en la región de Ayacucho, no parecen haber sido cultivadas en el período pre Wari, la agricultura de secano fue utilizada en las favorables tierras de la puna más baja (3.800-4.000 m) y en los más amplios fondos de los valles (Schreiber 1991, 1992; Meddins 1991). Estas son precisamente las áreas donde sistemas agrícolas estilo europeo serían después capaces de establecerse, como se menciona en una sección previa. La agricultura de laderas sobre andenes es quizás la más importante zona de producción y su práctica implica una zonificación similar de las regiones adyacentes. Por lo tanto, lo que yo postulo tentativamente es que el sistema de zonas de producción fue básicamente una innovación Wari. En sus últimas etapas el vecino Estado sureño de Tiwanaku adaptó el sistema en las laderas más irregulares de los valles de su territorio, en particular en los valles antes mencionados de la ladera oriental.¹⁶ Sin embargo, como Murra y otros han mostrado, el estilo de archipiélago vertical predominó en el área entera.

La actividad agrícola en los Andes involucra la administración simultánea de varios ciclos calendáricos en paralelo. Jorgen Golte (1980) entendió el estudio de este problema. Las actividades realizadas con diferentes asociaciones de cultivos en las diferentes zonas de producción necesitan ser altamente coordinadas con el propósito de que las actividades necesarias sean efectuadas de acuerdo con las diferentes etapas de los ciclos vegetativos de los cultivos. Esto es sumamente complicado, ya que a menudo una muy pequeña unidad política puede estar compuesta de cinco o más zonas de producción, cada una con su particular asociación de cultivos y con una infraestructura tecnológica que requiere un constante trabajo de mantenimiento. En cada zona los cultivos que constituyen una asociación requieren atención y trabajo en momentos diferentes que

¹⁶ En las alturas del pueblo de Italaque, en el valle de Mocomoco al este de Bolivia, hemos registrado un sitio con una plaza hundida rectangular y central, muy similar a la gran plaza hundida de Kallasasaya en la ciudad de Tiahuanaku. El sitio está situado en lo alto de una colina con lados rodeados de andenes, los cuales, junto con el sitio en sí mismo, parecen formar un único sistema. En el sitio encontramos cerámica fina lo que podría indicar, tomadas en el contexto de la estructura total, que el sitio forma parte de Tiawanaku.

cualquier otra zona, mientras que las cosechas y actividades pastoriles en diferentes zonas ocurren al mismo tiempo.

Esto lleva a que, por una parte, el tiempo y la planificación productiva deben ser organizados de tal manera que el máximo número de actividades diferentes sea combinado en un solo ciclo para evitar la fragmentación del tiempo de trabajo; y, por otra, las unidades sociales comprometidas en la producción deben ser constituidas de tal manera que puedan manejar los requisitos de actividades simultáneas en áreas que pueden ser totalmente dispersas. Golte propuso que unidades compuestas solo de grupos familiares nucleares no eran adecuadas para estas condiciones. El trabajo hecho por otros investigadores ha verificado esta proposición (Araujo 1988; de la Cadena 1986; Earls 1992a, 1992b, 1996; Isbell 1996; Mayer s/f). La unidad social fundamental está compuesta de varias familias conectadas en un conjunto complejo de obligaciones interrelacionadas y reciprocidades mutuas. Aunque estas interrelaciones generalmente son expresadas en términos de relaciones de parentesco, este no las determina. La organización social de estos grupos es sumamente compleja y no puedo tratarla aquí. Mientras la mayor parte de investigaciones acerca de esta ha sido efectuada en modernas comunidades aymaras y quechuas, es interesante que W. Isbell (1996) haya usado evidencias arqueológicas para demostrar que este patrón multifamiliar funcionó para varias configuraciones socioculturales andinas como Wari, Tiwanaku, y el mismo Estado Inca.

Debe también enfatizarse que la alta incertidumbre que caracteriza el ambiente ecoclimático de las tierras altas requiere que toda planificación tenga que tomar en cuenta contingencias climáticas no previsibles. Una temporada que empiece con lluvia suficiente y temperatura adecuada puede convertirse en cualquier momento en una temporada seca, y si esto ocurre con cielos claros los cultivos son a menudo perdidos por las heladas. Los brotes de enfermedades de plantas no son infrecuentes y cada determinado número de años los enjambres de langostas, bandadas de loros y otras criaturas pueden eliminar la cosecha o parte de ella. Eventos recurrentes pero imprevisibles como el Niño ocurren en años en los cuales por demasiada o muy poca agua puede devastarse una cosecha. Los sistemas de planificación agrícola andinos deben implicar la posibili-

dad de replantear los ciclos de trabajo agrícola cuando tales eventos tienen lugar (Earls 1975, 1989, 1991, 1992, 1996).

2.3. Coordinación y agricultura de laderas

La coordinación eficaz es un requisito para cosechar exitosamente en las empinadas laderas de los hondos valles andinos. Como ya he mencionado, en la región sur de Ayacucho las laderas del valle estaban en gran parte sin cultivar antes de su incorporación al Imperio Wari y que la agricultura de estilo europeo nunca pudo establecerse en las mismas áreas. La introducción de andenes sobre estas laderas profundiza los suelos, reduce la erosión, y da lugar a microclimas más estables y de menor riesgo. Sin embargo, ¿cómo explicar el abandono de los monumentales sistemas de andenes incas de las laderas del valle de Urubamba y otras partes? Me refiero específicamente a los sistemas incas de alta tecnología de Pisac y Ollantaytambo. A partir de las pruebas documentales y arqueológicas disponibles podemos concluir que estos sistemas fueron abandonados poco después de la invasión española y los terrenos se incorporaron en encomiendas y repartimientos coloniales. Los canales que llevaban el agua a los andenes fueron bloqueados y el agua fue canalizada directamente a las terrazas más amplias y planas a lo largo de la ribera del río.

En primer lugar estas terrazas fueron tierras del Estado Inca y eran trabajadas por agricultores especializados reclutados de regiones muy distantes bajo el sistema de *mitmaq* llamados *yanakuna*. Luego del colapso del gobierno inca estos especialistas huyeron rápidamente a sus tierras de origen; las personas de los grupos locales cercanos nunca cultivaron estas tierras y no hicieron ningún reclamo de ellas.¹⁷ Llego a la conclusión,

¹⁷ En 1994 conversé con integrantes de las comunidades de Willoq y Patacancha, cerca de Ollantaytambo, acerca de este tema y del abandono generalizado de los vastos programas de extensión agrícola que ellos atribuyen a los incas. Ellos explicaron que los inmensos sistemas de andenes nunca fueron suyos, y los distinguían de las más rústicas terrazas del Intermedio tardío que según aseguran, pertenecieron a sus antepasados. Cuando se les pregunta por qué los incas nunca terminaron sus planes, los comuneros simplemente dicen que «el tiempo se les pasó».

entonces, de que los españoles abandonaron estos andenes porque no supieron como trabajarlos ventajosamente y que los pueblos cercanos no tenían conocimiento alguno acerca de ellos.

Esto lleva a la siguiente pregunta, ¿qué hay en la agricultura sobre laderas empinadas, con los ricos suelos de los andenes incas, que los hace tan difíciles de cultivar? La respuesta estaría en el alto grado de coordinación necesario para su manejo. La andenería inca era principalmente empleada para el cultivo del maíz,¹⁸ y la duración de su ciclo vegetativo, como de la mayoría de las plantas, varía en función de la temperatura. Entonces, las plantas tendrían diferentes requisitos según la etapa de desarrollo que estuviesen pasando, de acuerdo con las temperaturas de los ambientes locales en la ladera. Ya que la agricultura inca en estos andenes habría sido el monocultivo del maíz, para obtener rendimientos máximos se necesitaba optimizar la coordinación entre la distribución del riego, los ciclos biológicos de las plantas y las labores agrícolas. Fue necesario, entonces, establecer una coherencia entre el orden agroecológico y la distribución topográfica de las temperaturas del ambiente para obtener una eficiencia máxima del trabajo agrícola. Esta obsesión por el orden se manifiesta en la homogeneidad de los suelos que a menudo fueron traídos de otros lugares y en los materiales de construcción, lo que reduce el *ruido* microclimático en los andenes.

Pese a las diferencias entre el ambiente montañoso del incanato y el de la sociedad maya clásica, consideraciones de estrategia militar también pueden haber influido en la agricultura inca, al igual que en la maya. Cómo señala Tainter (1988: 171-173) al contrario de las chacras dispersas que son difíciles de defender de ataques esporádicos, una agricultura concentrada e intensificada llevada a cabo por especialistas —en este caso por *mitmaq* semimilitarizados— sería eminentemente sensata. La ubicación de

¹⁸ Aunque muchas más plantas alimenticias fueron domesticadas en los Andes, aquí me he limitado a la discusión del cultivo del maíz. Esto es en parte porque se le dio una especial atención por parte tanto del Estado Inca como de los estados andinos más tempranos (Murra, 1975), y en parte por las limitaciones de tiempo y espacio disponibles. Mencionaré que en solo una comunidad aymara se cultivan alrededor de 100 variedades de papa totalmente distintas.

almacenes estatales —*qollqa*— en las inmediaciones de las zonas de agricultura intensiva es un patrón constante del incanato.

Ahora voy a presentar una reconstrucción hipotética de la organización inca del cultivo del maíz en andenes. Ya que no hay cifras apropiadas acerca de las variedades del maíz cultivadas por los incas, emplearé las cifras experimentales disponibles que hay para diferentes variedades de este cultivo (Earls 1979, 1989).

En la tabla 2 he colocado una lista de los rangos de altitud y los días transcurridos desde la siembra hasta la floración para las variedades de maíz andino reunidas en sitios experimentales agrícolas por Grobman, Salhuana y Sevilla (1961).

Los datos usados tienen la gran limitación de haber sido tomados de estaciones agrícolas ubicadas en los ambientes atípicos más planos, favoritos de agrónomos occidentales y las altitudes de las estaciones probablemente no reflejen los límites de los rangos óptimos de altitud para las variedades de maíz (Earls 1979, 1989: 359-367, 1991). En la tabla, tres columnas son usadas para las altitudes. La primera, Rango de altitud, da las altitudes del conjunto listadas por Grobman. La segunda columna, Δ Alt., especifica el rango de altitud a partir de la diferencia de las primeras cifras y corresponde al rango total como fue especificado por estos autores. El tercero, Alt., pone en una lista las altitudes para las que la duración del ciclo vegetal está dada. El tiempo del sembrío hasta la floración a diferentes altitudes con datos está dado en la columna Tiempo a flor. Para la tasa del crecimiento respecto a la altitud, dada en la última columna (demora en metros/día), las altitudes elegidas para el cálculo son aquellas entre las cuales el cambio en la duración del ciclo vegetativo es el más brusco. Por ejemplo, en el caso de la variedad Confite Puntiaquado el rango altitudinal en el número de metros verticales requeridos para una demora un día es de $3.000 - 2.500 = 500$ m. Por lo tanto, $114,7 - 83,7 = 31$ días, y $500/31 = 16,129$ m/día. Para esta planta entonces, por cada 16 m más arriba que se siembre, la maduración se retarda un día más. Si se usa todo el rango Δ Alt. de 1.000 m la demora sería $1000/53 = 18,9$ m/día, ($136,7 - 83,7 = 53$) pero dado que el rango de 1.000 m es mucho mayor que el de las otras variedades el cálculo para los 500 m parece más apropiado, pero admito que este criterio es bastante arbitrario.

Tabla 2: Días desde la siembra hasta la floración en función de la temperatura y la altitud para variedades de maíz de tierras altas según Grobman, Salhuana y Sevilla (1961: 356)

Variedad	Rango de altitud	Δ Alt.	Alt.	Tiempo a flor	Demora en metros/día
Confite punteagudo	2.500-3.500	1.000	250	78	
			2.500	83,7	
			3.000	114,7	16
			3.500	136,7	
Confite puneño	3.600-3.900	300	3.600	91	
			3.900	107	19
Huayleño	2.500-3.600	1.100	2.300	87	
			2.800	135	10
			3.200	143	
Morocho	2.000-3.500	1.500	2.300	104	
			2.800	149	11
			3.200	150	
Huancavelicano	2.200-3.500	1.300	2.800	121	
			3.200	140	21
Rabo de zorro	2.600-3.200	600	250	88	
			2.600	115	
			3.200	142	22
Cuzco	2.400-3.300	900	2.800	129	
			3.200	148	21
Marañón	2.000-3.000	1000	2.800	122	
			3.200	166	9

Elaboración propia.

Las tasas de crecimiento de las plantas sembradas por encima o debajo de sus límites óptimos de temperatura y altitud no están muy afectadas por cambios de altitud. Para Confite Punteagudo el tiempo al florecimiento solo aumenta unos seis días entre 250 m y 2.500 m de altitud, pero de ahí aumenta bruscamente a altitudes mayores (figura 6). En condiciones ideales la tasa de maduración está en función de la temperatura, que sigue una *curva logística*. La parte central de la curva con mayor

pendiente corresponde a la tasa de crecimiento en el rango de altitudes con temperaturas más favorables y las secciones más planas, tanto inferiores como superiores de la curva, corresponden a las condiciones de altitud más severas. El intervalo de altitud por el que son calculadas las tasas es el rango más favorable, como se determinó por estas restricciones. Donde solamente hay una altitud baja y una superior, he usado estas para el cálculo.

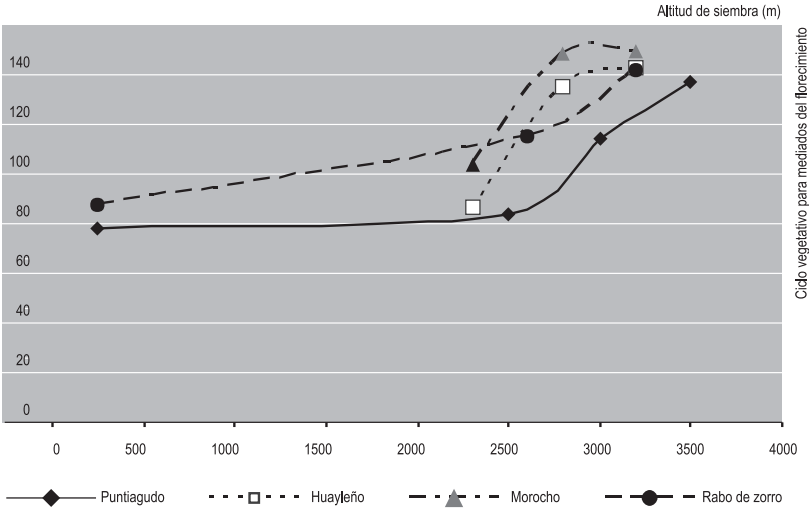
Los límites superiores e inferiores de este rango corresponderían a los *límites efectivos de producción* definidos por Brush (1974). Dentro de estos límites el crecimiento es biológicamente eficiente con altos rendimientos. El área fuera de estos límites, donde la planta crecerá pero es más susceptible al estrés ambiental, correspondería a sus *límites absolutos de producción*. En este rango los rendimientos de la planta serán menores y sujetos a mayor incertidumbre, de modo que solo se sembrará aquí cuando no hay otras opciones abiertas a los agricultores. Brush señala que los límites efectivos son fijados más por constricciones económicas que por constricciones biológicas. Demostraré más adelante cómo y por qué esta relación casi lineal entre altitud y tasa de crecimiento contribuye a la eficiencia de la producción dentro de los límites efectivos.

En la figura 6 el ciclo vegetativo para mediados del florecimiento es graficado para las cuatro variedades de maíz para las que hay más de dos puntos dados altitud/ciclo. Hay solo una variedad para la cual se tiene cuatro datos disponibles. Sin embargo, para dos variedades la duración del ciclo apenas cambia ante grandes aumentos en el rango altitudinal inferior, mientras que para los otros dos, las tasas de crecimiento se aplanan encima de cierta altitud. Gráficamente solo puede ser vislumbrado un patrón sigmoideo en el conjunto.

Para las ocho variedades, dentro de su rango óptimo, hay un promedio que alarga el tiempo de maduración en un día por cada 16 metros de aumento de altitud.¹⁹ Así, para un aumento de altitud de 500 m, el tiempo

¹⁹ Reportes etnográficos hacen que esta figura ($16 \text{ m} = 1 \text{ día}$) parezca conservadora. Una diferencia de dos meses es a mencionada a menudo para la duración del ciclo del maíz en los límites de su rango altitudinal (Camino y otros 1981, Mitchell 1981). Entre agrónomos se dice comúnmente que la tasa de crecimiento del maíz se duplica por cada 6°C de temperatura.

Figura 6: Tasas de crecimiento por altitud para 4 razas de maíz andino



Elaboración propia.

de maduración aumenta en un mes. Esto tiene implicancias importantes para el cronometraje de la irrigación. Las plantas de maíz tienen ciertos períodos críticos en su ciclo de vida en los cuales los requerimientos biológicos de la planta tienen que atenderse con subsidios de energía en la forma de labor agrícola. Los requisitos de agua de las plantas se incrementan drásticamente en la floración, si no reciben el agua suficiente en este momento el rendimiento puede reducirse en 50 ó 60%, por lo tanto la programación del riego tiene que asegurar que esto no ocurra; pero las fuentes de agua a menudo se encuentran en los manantiales de las pendientes de las montañas y usualmente tienen un caudal limitado. Frente a ello, el riego secuencial a diario de los cultivos en los andenes en fajas de 16 metros (unos 8 andenes de 2 m cada uno) optimiza el uso del agua disponible. Prácticas de este estilo están registradas en datos arqueológicos y etnográficos (Earls 1989: 364-67, Farrington 1980), aunque los detalles de la programación dependen del orden en que se han sembrado

las plantas y pueden variar.²⁰ Para los incas habría tenido la ventaja adicional de requerir menos mano de obra. De esta manera se ve cómo el manejo del rango de altitudes de alta tasa de crecimiento confiere ventajas y así se ajusta a la definición de Brush de límites efectivos de las zonas de producción.

Las diferencias de temperatura interanuales agravan la complejidad del problema. En Ayacucho, por ejemplo, el promedio de temperaturas para octubre —el mes en que el maíz suele ser sembrado— difirieron en 4°C de 1965 a 1966 (Segovia, 1977). Si la gradiente altitudinal de temperatura es traducida en grados centígrados, entonces una diferencia de un grado representa una extensión de nueve días hasta el florecimiento. Por lo tanto, la diferencia de cuatro grados representa una diferencia de 36 días en la duración del ciclo. Esta incertidumbre térmica interanual también debe ser tenida en cuenta en la programación de las actividades de labranza. Lluvias tempranas eventuales también amplifican la incertidumbre; la temperatura del suelo baja y cambia el ambiente inicial para el desarrollo temprano de plantas y por lo tanto el ciclo entero se prolonga, aunque luego puede ocurrir un período de sequía con cielo claro, lo cual eleva significativamente tanto las temperaturas del suelo como del aire. Sánchez (1971) llevó a cabo experimentos con maíz que mostraron que la duración del ciclo vegetativo era determinada por las condiciones climáticas imperantes durante el primer mes después de la siembra, siendo de particular importancia la temperatura. Esta sensibilidad es consistente con la preocupación mostrada por los campesinos modernos para establecer las condiciones iniciales más apropiadas para el sembrío. Mientras uno de los beneficios de terraplenar laderas es reducir las diferencias microclimáticas locales —suponiendo un patrón de construcción constante y con el mismo suelo—, lo cual permite a la gente hacer una relación lineal entre los ciclos de cultivo y altitud de la ladera para la planificación agrícola, todavía queda un proceso de toma de decisiones muy complejo.

²⁰ Dado que se necesita regar al momento de sembrar, el orden de sembrío está también limitado por la disponibilidad del agua y de la mano de obra.

Teniendo en cuenta esta complejidad y que la aparición de la agricultura intensiva en laderas en la historia andina es relativamente reciente (Wari e Inca), el fracaso de la agricultura al estilo europeo a mayores altitudes puede apreciarse mejor. También ayuda a explicar por qué los grandes sistemas estatales Wari e Inca desarrollaron tanto esfuerzo para desarrollar una infraestructura tecnológica apropiada, específicamente para agricultura de laderas.

El análisis presentado y la etnografía moderna en comunidades autóctonas (Rosas, 1983: 52-58) indican que las variedades de maíz fueron conscientemente aclimatadas a las condiciones *normalizadas* climáticamente, condiciones obtenidas en zonas de producción equivalentes pero espacialmente dispersas. Tal estandarización de zonas climáticas para cultivo facilitaría enormemente la planificación regional, pero implicaría una contabilidad muy cuidadosa del tiempo y el procesamiento de la información. Hay pruebas de que el Estado Inca estaba activamente comprometido en esta actividad (Earls 1982, 1991).

2.4. Tiempo

A decir de todos, los incas parecen haber estado obsesionados con el problema del tiempo. Aveni ha observado que mientras las crónicas de Mesoamérica apenas mencionan la actividad astronómica; las andinas están llenas de observaciones a los cuerpos celestes, como época del año y desde dónde eran observados. Sin embargo, el sistema astronómico andino nativo es tan diferente de los del hemisferio norte antiguo que las narraciones españolas acerca de él estaban generalmente equivocadas. Debemos nuestro conocimiento de astronomía inca a los más de 30 años de investigación que el antropólogo holandés Tom Zuidema ha dedicado a su estudio (Zuidema 1964, 1980a, 1980b, 1982a, 1982b, 1989a, 1989b, 1990, y Urton 1981). En este trabajo no intentaré explicar la astronomía incaica ni la estructura de su sistema calendárico, solo daré una breve descripción de la inmensa importancia práctica de la sincronización temporal para el Estado Inca. El trabajo de Zuidema sobre el sistema de ceques incaicos ha demostrado que este era una suerte de modelo del

paisaje para la programación de las actividades administrativas y ceremoniales en el cual estaba inmerso el sistema calendárico inca. Un documento colonial temprano anónimo relaciona las observaciones astronómicas con el cronometraje de los ciclos de irrigación sobre el sistema de ceques en la mayoría de zonas ecológicas alrededor del Cuzco (Earls 1976 y Sherbondy 1986).

En un imperio que se extendió más de 30 grados latitudinales, era esencial para el mantenimiento de la estabilidad política y económica la coordinación de actividades agrícolas sobre tierras del Estado (Earls 1982). El Estado tenía que saber cuándo, bajo qué circunstancias y hasta qué punto era necesaria una intervención para reparar los trastornos locales y regionales que surgiesen de una situación que conjugara la alta incertidumbre climática con los posibles fracasos de cosechas. Tierras sin usar o infrautilizadas, generalmente en laderas de valle, eran reclamadas por el Estado. Se implementaron también infraestructuras a gran escala, involucrando tanto la construcción de andenes y sistemas de irrigación como instalaciones de almacenamiento para comida (*qollqa*). Sin embargo, la creencia generalizada de que el Estado emprendió el trabajo de regular toda la actividad productiva agrícola es falsa; por el contrario, el Estado prefería dar la máxima autonomía a los sistemas regionales y locales para regular su propia producción; aunque en lugares que los incas consideraron vitales para sus intereses sí intervinieron con mano dura, como en el caso de la introducción de *mitmaq* semimilitarizados ya mencionado. En general, el Estado solamente insistió en que cierta cantidad de tiempo de trabajo estuviera dedicado a labrar las tierras estatales, al servicio militar y a otras tareas. Los productos de tierras del Estado fueron usados para alimentar la burocracia y para mantener la comida almacenada en los silos en un nivel suficiente. Gran parte de la burocracia estatal estaba dedicada a registrar toda información relevante con respecto a la producción local y la constante actualización de esto en los archivos centrales de quipus en Cuzco. El transporte de reservas de alimentos hacia regiones donde los límites de la suficiencia alimentaria eran excedidos por condiciones climáticas excepcionales u otras, y con frecuencia ubicados a una distancia considerable de los silos del Estado, involucraban a menudo una complicada planificación logística. La ayuda de comida tenía que llegar antes que

el hambre diera lugar al descontento social y político. Esto implicaba el cronometraje preciso en cada etapa. Este autor e Isbell han realizado un análisis detallado de la regulación agrícola inca (Earls 1975, 1982, 1989, e Isbell 1978).

2.5. Algunas conclusiones sobre la agricultura inca

Los puntos anteriores pueden resumirse en relación con el desarrollo de tecnologías agrícolas y organizaciones sociales que comparten la característica común de la atenuación del riesgo en el altamente incierto ambiente andino ya discutido en la segunda sección de este artículo. Los campos elevados de las orillas más planas del lago Titicaca minimizan el riesgo de pérdida de cosecha debida a la inundación y la sequía relacionada con las fuertes fluctuaciones en el nivel de superficie de agua del lago. Los sistemas de *qocha* utilizan la escorrentía de precipitación para garantizar una provisión de agua bastante continua para los cultivos sembrados entre ellos por medio de complicados mecanismos de captación de agua y drenaje. En los valles y las punas del oriente del altiplano se desarrollaron sistemas extensivos de terraplenes, en los cuales la provisión de agua y drenaje eran controlados por una jerarquía de canales y funcionaban de acuerdo con el patrón de la rotación sectorial (*aynoqa*, *laymi*). En las pendientes de los valles de los Andes centrales y occidentales la tecnología principal es la agricultura en andenes con riego. Sin embargo, de mayor importancia que estas tecnologías vistas como artefactos o máquinas es su articulación ecosocial coherente en un sistema global resiliente.²¹

El complejo sistema ecológico vertical es esencialmente una construcción artificial que se desarrolló por etapas en el transcurso de la historia andina y parece haber sido una innovación implementada básicamente en su forma actual por el Estado Wari. El cultivo del maíz con sistemas de terrazas irrigadas sobre las empinadas laderas de valle es

²¹ Entendemos como resiliencia a la capacidad del sistema de retornar a su estado inicial luego de una perturbación.

central a este sistema. La dirección de este complejo sistema requiere la coordinación fina de actividades por unidades familiares múltiples arraigadas en la organización social de las unidades locales. Este sistema básico era reproducido recursivamente en niveles más altos, hasta el Estado Inca mismo. En cada nivel, el sistema tenía que ser capaz de reestructurar su organización para enfrentar las frecuentes, bruscas y muy enérgicas fluctuaciones climáticas. El desarrollo de tecnologías agrícolas apropiadas para reducir el riesgo facilitó este proceso.

El proceso en su conjunto puede ser expresado mejor como una simplificación en la que un gran número de ecosistemas naturales era reemplazado artificialmente por un número más pequeño de ecosistemas equivalentes definidos por las zonas de producción y articulados de acuerdo con un calendario básico común que se arraigó en el sistema de ceques. En la sección final describiré el esfuerzo de los incas por reproducir un subconjunto de estas clases de equivalencias y las observaciones astronómicas del sistema calendario de ceques en solo una pequeña área, con el propósito adicional de refinar el *control* y la *regulación*²² del sistema agrícola.

3. Experimentación y control en el Estado Inca: Moray

Un conocido teorema de la cibernética, formulado por Conant y Ashby establece que «Todo buen regulador de un sistema debe ser un buen modelo de ese sistema» (Conant y Ashby 1970). Con esto en mente y las

²² Los términos *regulación* y *control* tienen connotaciones extremadamente anatemizadas en el mundo contemporáneo. Sin embargo, aquí estoy usando esos términos de acuerdo con su acepción cibernética. En Cibernética ambos términos son usados para designar el mecanismo incorporado en un sistema que opera para preservar la estabilidad del sistema cuando este es sometido a perturbaciones que le ocasionan inestabilidad. Estos mecanismos de control también funcionan para reajustar su organización interna, entonces una nueva configuración estable puede surgir cuando el patrón de perturbaciones externas cambia de manera consistente. Esta última función está implicada en la adaptabilidad del sistema. Por ello, este uso de las palabras no tiene nada en común con un patrón de interferencia central en asuntos locales.

consideraciones señaladas al final de la sección previa empecé a buscar un mecanismo que pudiera haberse desempeñado como un modelo del sistema agrícola. En 1975 el padre Henrique Urbano y algunos otros amigos me llevaron al sitio inca de Moray. De acuerdo con la tradición local campesina, Moray sirvió como una escuela agrícola inca y por eso hay climas diferentes sobre los diferentes niveles de terrazas. Teniendo en cuenta la excepcional estructura geométrica del sistema, llegué a la conclusión que si los incas hubieran estado comprometidos en la reproducción de la equivalencia de zonas de producción en alguna suerte de modelo, Moray sería el sitio donde experimentar para poner a prueba la idea.

Las condiciones que tenían que darse para que el sistema fuese considerado un centro inca para experimentación agrícola y control eran:

- a) Variación microclimática estadísticamente significativa para los diferentes niveles de andenes.
- b) Distribución de los microclimas consistente con la geometría del sistema y no atribuible a la posibilidad de variación natural.
- c) Identificación de mecanismos que permitieran que las condiciones climáticas sobre las terrazas sean modificadas artificialmente para admitir la experimentación controlada de cosechas.
- d) Inclusión de la observación de las fechas clave del calendario inca, como determinó el sistema ceque del Cuzco de Zuidema.

Por supuesto que incluso si el sistema obedece estas condiciones no garantiza automáticamente que los incas lo usaron de ese modo. No hay ninguna referencia de esto en las crónicas u otros documentos que digan que lo fue. Todo lo que puede decirse es que podía haber sido usado de esa manera y que tal uso es compatible con la lógica organizativa inca.²³

²³ La etapa inicial de esta investigación fue patrocinada por la U. S. National Science Foundation en 1976. El trabajo adicional fue financiado con una beca de la Australian National University a los arqueólogos Ian Farrington, Ken Heffernan y el autor (1985). En

3.1. Descripción del sitio

Moray está ubicado sobre una alta meseta (3.500 msnm) aproximadamente a siete kilómetros del pueblo de Maras e inmediatamente al sur del río Urubamba, en el Valle Sagrado de los Incas, aproximadamente 32 km al noroeste del Cuzco. Está situado en la base norte del cerro llamado Wayñuymarka (4.100 msnm), que forma parte de una división baja que separa la llanura de Maras de Anta, que está hacia el sur. El sitio fue construido como una serie de sumideros naturales o *dolinas* de varias profundidades cortadas en la piedra caliza cárstica de fuera de la meseta, en la cual eran moldeadas cuatro estructuras en forma de tazón, geométricamente regulares, llamadas *muyu*. Los flancos más bajos de la dolina más grande, Qechuyoq, son terraplenados en andenes y las partes remanentes reformadas extensivamente. Qechuyoq está a 70 metros de profundidad pero solamente los 28 metros más bajos están construidos en andenes. Siete andenes casi circulares dentro de él rodean los 15 metros más bajos. Los andenes más altos se desvían del modelo circular en los ejes oeste y sur, como medida desde el centro, y continúan alrededor de una pequeña llanura artificial denominada El Herraaje para reunirse en los mismos puntos. Las otras dos dolinas de menor profundidad (Simiyoy e Intiwatana muyoy) están totalmente andenadas, como lo están las áreas interconectadas. El cuarto muyu —Kuchi muyoy o Kuichi muyoy— nunca fue terminado.²⁴ Los elementos principales de Moray están presentados en la figura 7.

1993 - 1994 obtuve una beca de la Guggenheim Foundation para investigar otros aspectos del sistema. Deseo agradecer a estas instituciones por su apoyo, así como a la Embajada de Australia en Lima, al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Perú, a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, al Centro de Investigaciones de la Universidad del Pacífico y a la Pontificia Universidad Católica del Perú por sus contribuciones para el análisis de datos y el tiempo para escribir.

²⁴ El *muyu* más pequeño al sur de los otros fue abandonado mucho antes de completarse. El arqueólogo Ken Heffernan de la Australian National University halló que un gran número de herramientas de construcción fue desechado en una posición del terreno. Piedras parcialmente labradas están dispersadas alrededor del sitio.

Figura 7: Foto de Moray²⁵



²⁵ La foto fue tomada desde una avioneta por Bea Coolman en 1978.

Hasta hace aproximadamente 50 años Moray tenía su propio suministro de agua de irrigación desde un acuífero ubicado en el cerro de Wayñuymarka. Sin embargo, esta agua fue desviada al pueblo de Maras cuya agua potable era salobre.²⁶ Hasta entonces las partes del sitio eran cultivadas con papas y cebada. Los restos del sistema de irrigación antiguo son evidentemente visibles: el agua ingresa al sistema cerca de la parte más alta al sur y sigue por una serie de canales bien definidos, uno de los cuales cruza un acueducto elevado. La distribución del agua para las terrazas en cada *muyu* se hace por medio del típico conducto inca llamado *paqcha*, que son construidos en línea a lo largo de un solo radio, visto desde el centro del *muyu*. A cada lado de las *paqcha* hay escaleras ubicadas simétricamente en los muros y con una orientación que se invierte a cada nivel sucesivo, como puede verse en la figura 8b. El *paqcha* siempre trae agua a la parte más alta del andén, y desde aquí los canales llevan el agua alrededor de la base de las paredes del andén, al norte. También hay canales construidos paralelamente a estos sobre el borde de cada andén. En lluvias fuertes el agua excesiva filtra por el sistema en el eje norte; la vegetación natural en la parte norte de Qechuyoq era tan densa y con tantos helechos y otras plantas relacionadas con la humedad que solamente crecen en esta parte. En los últimos años todo este crecimiento ha desaparecido porque el INC del Cuzco está restituyendo el plan general del sitio por razones turísticas (figura 8). El sistema restaurado con la ubicación del *paqcha* y las escaleras está indicada en las figuras 8a y 8b.

3.2. Registros térmicos y análisis

Mi investigación inicial se centró en registrar las temperaturas del suelo y otros datos microclimáticos cerca de la superficie de los andenes en Qechuyoq a lo largo de dos radios del sistema al oeste y al norte del centro durante 12 *días período* (PD) sobre un ciclo anual. Además de ser la más

²⁶ Toda la gente de la zona resalta la gran pureza del agua original de Moray.

Figura 8a: Moray – Qechuyoq restaurado por el Instituto Nacional de Cultura, Cuzco con El Herraje visto del horizonte norte²⁷



²⁷ Fotos de las figuras 8a y 8b cortesía de Llama Travels, <http://www.llamatravel.com>

Figura 8b: Paqcha y escaleras de Qechuyoq visto de CS 9N

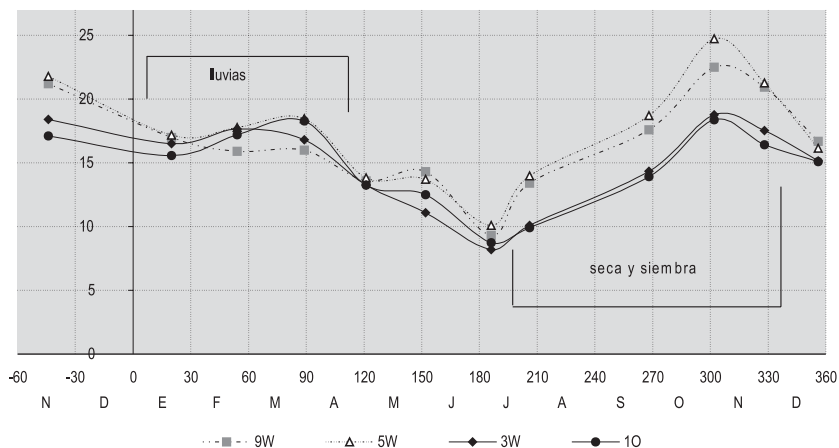
importante influencia sobre la vida de las plantas en esta altitud, más importante aún que las temperaturas del aire, las temperaturas de suelo (a -10 cm) son mucho más estables que las temperaturas del aire a 150 cm, las que siempre fluctúan debido a las nubes circulantes, las brisas y las lloviznas breves. No pude instalar y mantener una estación meteorológica estándar por la falta de seguridad en la zona. Cada número de PD se refiere al día promedio del período de días cuando las observaciones eran registradas, PD1 es el 1° de enero y PD365 el 31 de diciembre. Cuando las condiciones eran estables—mayormente en la estación seca—solamente hice las observaciones por un par de días, pero cuando el macroclima era variable extendí las lecturas los días suficientes para estar seguro de conseguir una muestra representativa.

Los termómetros se colocaron a diferentes niveles, en líneas a lo largo de los ejes oeste y norte de Qechuyoq, medidos desde el punto central designado IO. Me refiero a estos sitios como *climositios* (CS). Aquellos a lo

largo del eje oeste son llamados 2W, 3W, y así sucesivamente hasta 12W; CW hace referencia a las lecturas tomadas en el nivel de la meseta control oeste, y aquellos del norte 2N, 3N hasta 12N. Sin embargo, no todas las posiciones podían ser continuamente controladas. Las temperaturas del suelo fueron registradas a lo largo del año sobre los ejes oeste para los CS 1O, 3W, 5W, 7W, 9W, 12W. Algunos de estos se registraron solamente durante pocos meses debido a la avería de instrumentos y la demora para conseguir su reemplazo, sin embargo los CS 1O, 3W, 5W y 9W fueron registrados el año entero. En el caso del eje norte se cubrieron más niveles de andenes; para cada PD registré 1O, 3N, 5N, 7N, 9N y 12N, faltando solamente pocos PD por las razones mencionadas. En ciertas ocasiones puse todos los instrumentos a lo largo de uno u otro eje para distinguir mejor agrupaciones térmicas en los andenes. Cuando tenía suficientes termómetros para cubrir los sitios básicos registré los datos para otros climositos. Debido a que no podía hacer registrar los sitios simultáneamente he empleado técnicas de interpolación estadística y langrangiana para la interpretación adecuada y la presentación necesaria.

Como debería esperarse, el período de mayor diferenciación térmica corresponde a la estación de siembra, desde agosto hasta fines de noviembre. En la estación lluviosa, de diciembre a marzo y en los meses en que se seca que dura hasta junio, la diferenciación existe pero es mucho más débil debido al efecto homogeneizante del agua. En la figura 9 pueden observarse las temperaturas de suelo medias para los cuatro climositos registrados continuamente durante el año para el eje oeste.

El análisis detallado de los datos reveló una compleja estructura térmica. La tasa normal de cambio de temperatura con la altitud ($6^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$) desde el centro al borde no se cumple, en vez de ello el sistema es dividido en varios sectores térmicos, cada uno de los cuales consta de cuatro niveles de terrazas que son alineados vertical y radialmente. Los alineamientos radiales principales se establecen con los ejes norte y oeste. Los cuatro niveles más bajos (sector I) en ambos ejes están en general más fríos durante el año y muestran amplitudes diurnas más suaves que los cuatro del Sector II W (niveles 5W a 8W) o del Sector III W (niveles 9W a 12W). Durante la estación de siembra hay diferencias en T_s máxima de 10°C que ocurren entre los niveles cuarto y quinto del oeste con diferencias prome-

Figura 9: Temperaturas medias del suelo y ciclo anual – eje oeste


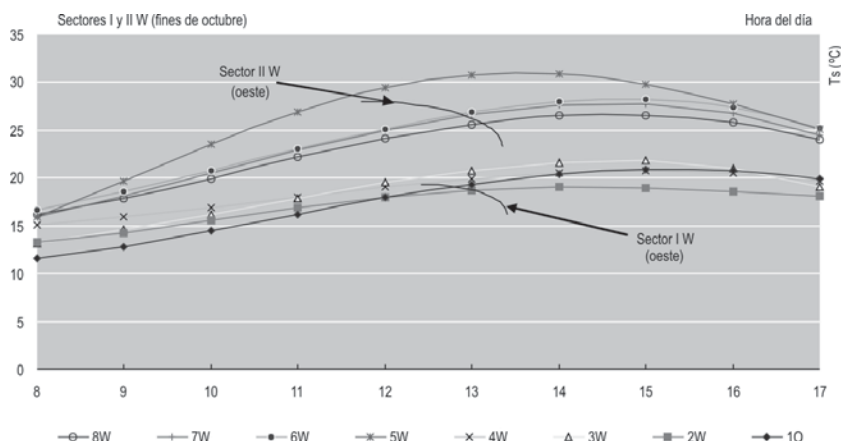
Elaboración propia.

dio diarias de 4 a 5°C; las curvas para el Sector III W son similares a las de CS 5W pero no muestran un patrón claro.

Para registrar mejor el sistema, en el día del tránsito del Sol por el cenit ubiqué un termómetro en cada andén del eje oeste. En esta latitud (13°19') esto ocurre el día 30 de octubre, el cual fue un día muy claro el año 1976. En la figura 10 las curvas Ts para los Sectores I y II se muestran gráficamente para ese día. Las curvas son suavizadas por la interpolación langrangiana de 3 de puntos que se usa para computar los valores de Ts en intervalos de una hora. Se ve claramente la diferenciación térmica entre los dos sectores. También es interesante que las temperaturas de los andenes del Sector IIW están linealmente correlacionadas con el ancho de los andenes correspondientes, con un nivel de confianza mayor del 99%.

En la figura 11 he representado gráficamente las temperaturas medias para cada par de sitios a los niveles correspondientes en ambos ejes. La curva para CS 10 es común en ambos ejes y puede verse que sigue un curso similar al par {3W, 3N}; los tres sitios pertenecen al Sector I. Igualmente las curvas anuales para {5W, 5N} están cercanamente agrupadas. Sin embargo las curvas {9W, 9N} son similares para la mayoría de los meses, pero

Figura 10: Temperaturas de suelos por niveles en el eje oeste de 10 a 8W el día de 30 de octubre de 1976



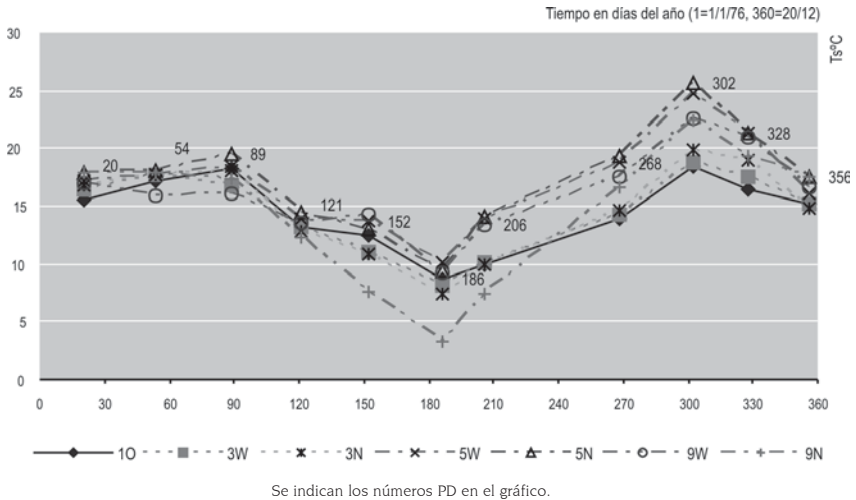
Elaboración propia.

para los meses cercanos al solsticio de invierno (21 de junio), 9N muestra una dramática caída en las temperaturas promedios de suelo, mientras que 9W sigue el mismo patrón de los otros sobre el mismo eje.

De las mediciones adicionales hechas en otros niveles sobre el eje del norte (CS 12N y la mayoría de 7N fueron registrados durante todo el año) alrededor del período del solsticio, encontré que los valores de Ts en el Sector III N (9 a 12N) tomaban valores sucesivamente más bajos en cada terraza ascendente. En la figura 12 he organizado e interpolado a partir de los datos registrados para mostrar las Ts promedio para todos los CS sobre el eje norte para el día del solsticio de invierno.

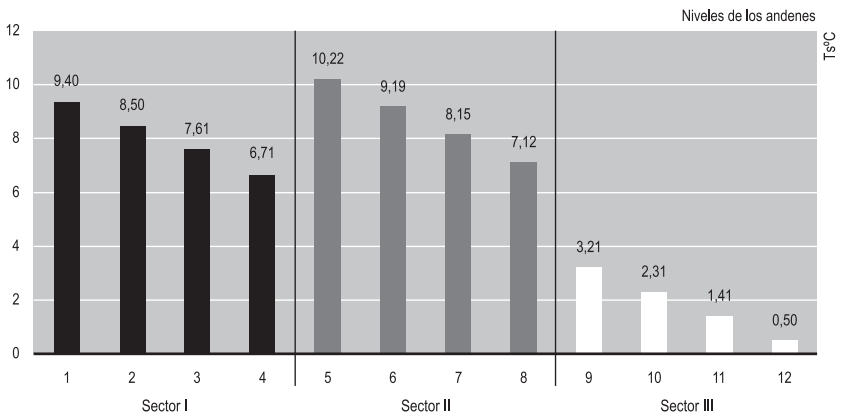
Sobre el eje norte la sectorización anual del microclima se muestra muy claramente. En el siguiente gráfico de superficie (figura 13) usé la interpolación polinomial lineal y lagrangiana para inferir las trayectorias de Ts anuales para todos los niveles desde 10 al 12N. El gráfico es probablemente más confiable que el del eje oeste, ya que hay más datos disponibles y las razones físicas para la caída de las temperaturas en el

Figura 11: Qechuyoq: Temperaturas medias de suelo en el eje norte (N) y oeste (W) (20/1-23/12/1976 por parejas {3W, 3N}, {5W, 5N} y {9W, 9N})



Elaboración propia.

Figura 12: Qechuyoq: Distribución de las temperaturas promedio del suelo en el día del solsticio de junio en los andenes en el eje norte (21/6/1976)

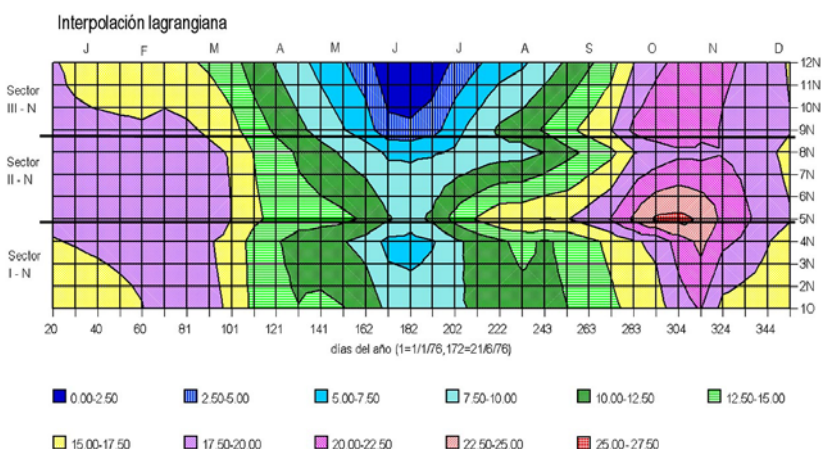


Elaboración propia.

Sector III N en la época del solsticio son comprendidas (Earls 1985, 1989). Como es visto por un observador desde los climositorios superiores del norte, el Sol parece pasar debajo del horizonte norte en los meses antes y después del día del solsticio (21 de junio) dando el efecto del lugar del Sol a mediodía con un segundo levantamiento en la tarde temprano (Earls y Silverblatt 1981). Para cada nivel sucesivamente más alto este efecto de doble levantamiento y doble puesta solar dura más tiempo. En 12N el suelo permanece totalmente en la sombra por más de un mes. La Ts aquí permanece justo encima de 0°C en este período y luego aumenta rápidamente sus promedios diarios desde 4°C, en agosto a 22°C en noviembre. Es interesante que para el montículo artificial cerca al eje norte al nivel 9 (9N), el efecto comienza casi exactamente un mes antes del solsticio y termina un mes después. El montículo se llama *Ñusta* (princesa en quechua) y es considerado sagrado.

El sector dispuesto en grupos de cuatro niveles de terrazas tiene paralelos significativos con la arquitectura del sistema. Dirigiéndose hacia

Figura 13: Gráfico de superficie de la estructura anual de las temperaturas del suelo en el eje norte de Moray



Elaboración propia.

arriba o abajo entre los andenes se construyeron escaleras de tres o cuatro pasos, hechas de piedras sobresalientes afuera de las paredes (*sayruna*). Como es típico en la mayoría de las estructuras de andenería inca, estas están orientadas en direcciones opuestas en cada nivel, formando un patrón en zigzag. Mientras estos generalmente son construidos a lo largo de una línea recta vista desde el centro, en Qechuyoq la línea hecha por la *sayruna* más baja se rompe después de cuatro niveles y aquella que empieza desde el quinto hacia arriba sigue una línea radial diferente. En el octavo nivel la pared del andén continúa alrededor del borde de la llanura artificial, como puede verse en la figura 8b. Aunque estos patrones estructurales podrían ser casuales, también pueden indicar que diferentes grupos de trabajo estuvieron asociados con los distintos sectores. Hay otras evidencias de que estos grupos de trabajo diferentes estuvieron relacionados con diferentes aspectos de la construcción del sistema, y están relacionados principalmente con los aparentemente errores observables.

3.3. Mecanismos posibles que constituyen los sectores

Ofreceré algunas hipótesis provisionales con respecto a las causas físicas para la diferenciación térmica entre los sectores. Ya he indicado que la sombra creada por el Sol sobre el borde norte de Qechuyoq durante el período de solsticio de junio explica adecuadamente la dramática caída de las temperaturas de suelo para los niveles superiores del Sector III N. Sin embargo, para la época del equinoccio de septiembre el Sol se ha movido lo suficientemente al sur de modo que la tierra de estas terrazas se pone tan tibia como sus homólogas del eje oeste.

Pero para los otros sectores la explicación es más especulativa. Las terrazas más bajas del Sector I están más frías que las correspondientes de los niveles del Sector II y sus oscilaciones térmicas diarias y estacionales están más atenuadas. Esto está probablemente relacionado con la circulación descendente de cualquier exceso de agua de riego o de lluvia. Sin embargo se puede ver en muchas partes de Moray áreas donde brota el agua subterránea, como es característico de las formaciones geológicas cársticas, algunos de estos afloramientos se convierten en manantiales en

las laderas bajas hacia el río Urubamba. Es posible entonces que el agua fluya a baja profundidad debajo de la base del sistema. Esta agua podría subir por capilaridad enfriando así los cuatro niveles más bajos. El estudio del año 1976 fue hecho en un año bastante mediano en lo que a precipitación se refiere, pero he notado que en otros años de condiciones mucho más secas las temperaturas del suelo llegan a ser menos homogéneas, con el tercer y cuarto nivel calentándose bastante más que la base en IO. Se necesitaría una excavación arqueológica del sistema muy seria para determinar la razón para el abrupto quiebre entre los niveles cuarto y quinto. Desafortunadamente el reciente proyecto de restauración todavía no ha incluido ningún estudio arqueológico que busque conocer el funcionamiento de este mecanismo. Hasta donde se ha hecho no hay manera de decidir entre las muchas especulaciones posibles, incluyendo las mías, que abundan.

La correlación entre el ancho de las terrazas y las temperaturas de suelo para el Sector II podría ser explicada por los mismos principios físicos que relacionan el calor, la temperatura de la superficie y el área superficial de exposición en receptores pasivos de calor solar. Esto, por supuesto, supone la misma humedad para cada andén.

3.4. Una breve nota sobre la astronomía en Moray

No trataré aquí los detalles de los resultados astronómicos y señales calendáricas construidas en Moray. Es suficiente decir que secuencias de eventos visuales especulares se producen en diferentes partes en Moray para señalar el día del solsticio de invierno. El mes sinódico lunar que precede al solsticio y el que le sigue están señalados por el inicio y final de la sombra que toca al extremo del montículo²⁸ artificial cercano al climo-

²⁸ Este montículo es llamado *Ñusta* (princesa) por los habitantes quechuas de las comunidades cercanas y es considerada sagrada como la hija de la *Pachamama* (Madre Tierra). Importantes sacrificios se ofrecieron al *Apu Moray* (señor Moray), quien es una importante deidad regional, ubicada justo debajo de la *Ñusta*. Se dice que debajo de Moray está el palacio de oro del Inca Wayna Qhapaq, quien es identificado con el mismo Sol.

sitio 9N. Este fenómeno es consistente con la reconstrucción del calendario inca hecha por Zuidema para este período. Los equinoccios —22 de septiembre y 21 de marzo— se definen por otra sombra, que para estas fechas forma una línea recta a través de las terrazas, pasando por el centro de Qechuyoq (1O) y este monóculo especial. (Earls 1989 y también el video documental sobre los eventos del solsticio: Taller de Antropología Visual de la Pontificia Universidad Católica del Perú «Moray: un laboratorio agrícola inca» hecho por él).

El sistema, entonces, cumple con el requisito de un control construido en tiempo real sin el cual no podía haber funcionado como un laboratorio agrícola. Gary Urton (1981a) encontró una extensión de este sistema astronómico y organización calendárica hasta nuestros días en la comunidad de Mismunay, que limita con Moray. Mostró que estos eran asombrosamente complicados y que se integran en cada aspecto de la vida social, religiosa y económica.

3.5. Algunas conclusiones e hipótesis

La experimentación agrícola es prácticamente universal en los Andes. En cada comunidad indígena hay muchas personas que experimentan continuamente con todas las plantas que obtienen en chacras especiales, generalmente ubicadas cerca de sus casas; pero algunos lo hacen en ciertas chacras en cada zona de producción donde tienen tierras de cultivo. Estas personas observan cómo plantas diferentes se producen bajo condiciones climáticas diferentes; cuán bien resisten las heladas, la precipitación excesiva o deficiente, los años calurosos o fríos; cómo se comportan al exponerse a diferentes enfermedades, insectos, hongos, etc. El comportamiento de un cultivo en un año más frío puede ser simulado sembrándolo a una mayor altitud y en un año más cálido sembrándolo a menor altitud. La reacción del cultivo ante la precipitación excesiva puede ser evaluada sembrándolo en un área caracterizada por la precipitación alta en un año normal —si efectivamente tal término tiene significado con la situación andina— y viceversa para la escasa precipitación. Simulación y experimentación son actividades rutinarias para el agricultor andino

nativo, de manera que Moray puede ser visto como una simple sistematización de la práctica andina tradicional.

Mi conclusión general, entonces, es que Moray fue construido como un centro de control y experimentación para los grandes sistemas de andenes estatales construidos por los incas en el norte del río Urubamba. Como se mencionó en una sección previa, estos andenes, de la misma manera que Moray, parecen no haber sido terminados. En otras partes he postulado (Earls 1989) que las terrazas de las laderas de Pisac, Ollantaytambo y posiblemente otras de la región, fueron diseñadas con el propósito deliberado de producir sectores de clases equivalentes ecológicamente. Cada uno se reprodujo en los sectores de Moray. En la fase de la investigación de 1993 - 1994 traté de usar imágenes de satélite y estudios de suelos para determinar si tales sectores a gran escala podían aún ser identificados. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de la cubierta vegetal resultante tanto de los intentos modernos de reutilización como de los proyectos arqueológicos de restauración de andenes, tales patrones no pudieron detectarse, si alguna vez existieron. Si el más serio —quizás el único— proyecto arqueológico dirigido por Ann Kendall (1996), se termina para un área de gran tamaño, entonces las condiciones para un nuevo intento de identificar los sectores postulados estarán dadas.

El sistema Moray probablemente haya sido usado para la simulación de toda clase de hipótesis sobre las condiciones climáticas y el desempeño de las plantas establecidas. Las plantas pueden ser cultivadas en diferentes sectores y posiciones, de forma que sus límites de tolerancia máximos y mínimos pueden ser establecidos para diferentes condiciones climáticas y estandarizados para las clases correspondientes por aclimatación. Bajo condiciones secas, simplemente dirigiendo el agua de irrigación excesiva a los cultivos, se pueden simular fuertes lluvias y torrentes. Los límites de marchitamiento pueden hallarse limitando el agua y ser probados para las diferentes variedades del maíz. Sus tasas de crecimiento pueden determinarse para diferentes temperaturas de suelo. Aquellos sectores que muestran gradientes termales empinadas, como el Sector II W y los Sectores II y III N, podrían usarse para determinar las tasas de crecimiento de variedades diferentes de maíz. Además, combinaciones de factores pueden ser investigados por variación de las temperaturas de suelo, insolación

y el agua para plantas de interés. Podía haber funcionado también para aclimatar maíz y otros cultivos a nuevas condiciones ecoclimáticas y para la creación de nuevas variedades y sub-variedades.²⁹

En vista del interés de los incas por el maíz, es importante mencionar que en un estudio palinográfico efectuado en Moray por un estudiante de Biología de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cuzco para su tesis, el polen de plantas domésticas encontrado y absolutamente identificado es de maíz y de *kantu*; flor muy apreciada por los incas que es casi siempre representada sobre los vasos de madera ceremoniales conocidos como queros. Ya que los documentos coloniales más tempranos referidos a la zona solamente mencionan el cultivo de papas y cebada introducida en el sitio, la cual persistió hasta que el agua de irrigación fue retirada, el descubrimiento del polen es consistente con la bien documentada asociación inca de maíz con andenes irrigados.

Quizás la más obvia conclusión que deriva de los datos y el análisis es que la gradiente termal a lo largo de los dos ejes no está en la tasa normal de declive de alrededor de $-6^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$. Para los 28 m de terrazas de Qechuyoq el promedio de temperatura debería reducirse en $0,168^{\circ}\text{C}$, suponiendo que la tasa de descenso para las temperaturas de suelo es la misma que para la temperatura de aire. En realidad, en muchas partes del sistema la tasa de variación está invertida. Como hemos visto en la sección 2, las temperaturas del suelo son más importantes que las temperaturas del aire para el metabolismo de las plantas en las altas altitudes. En la sección 2.3 los datos fueron presentados mostrando que el ciclo vegetativo de maíz aumenta en promedio un día por cada 16 m de aumento de altitud, dentro del rango de sus límites de tolerancia efectiva. Esto se traduce en un aumento de aproximadamente nueve días para una caída de

²⁹ Frére y otros discutieron un interesante experimento hecho con cuatro variedades de maíz boliviano en Italia. La más pronunciada variabilidad estacional en la insolación en Italia tuvo importantes efectos en la precocidad de las plantas. Dos de las variedades maduraron mucho más rápidamente, y dos más lentamente. Es posible que la influencia de esto pudo haber sido probada para la siembra temprana simultánea —agosto— de las mismas variedades en las terrazas más altas al norte y oeste con sus pronunciadas diferencias en los ritmos de exposición al Sol.

temperatura 1°C. También se ha señalado que hay evidencia experimental y etnográfica que indica que la temperatura promedio para el mes siguiente de la siembra condiciona la tasa de crecimiento durante el resto de ciclo.

En Moray hay dos períodos de diferenciación de temperatura promedio máxima: para el Sector III N esto ocurre alrededor del solsticio de invierno pero persiste hasta agosto, el mes de siembra temprana. En la mayoría de los otros sectores la mayor diferenciación corresponde a los meses para siembra regular —septiembre— y de siembra tardía —octubre y noviembre—. En estos meses la diferencia de temperaturas promedio de suelo entre sectores adyacentes puede alcanzar desde 3°C a 5°C, y en los sectores del Sector II de 2°C a 3°C. Esto se traduce en los ciclos vegetativos en diferencias desde pocas semanas hasta más de un mes, a rangos altitudinales *normales* de muchos cientos de metros. De conformidad con la generalizada preocupación andina con los requisitos sociales de la coordinación eficaz para la administración agrícola es probable que Moray pudiera haber sido usado como un lugar de entrenamiento para optimizar esto, por lo menos sobre tierras del Estado.

Para terminar esta sección debo señalar una limitación importante del sistema de Moray para los propósitos que le atribuyo. No hay ninguna diferencia significativa entre los valores mínimos Ts para los climositos del eje oeste en ningún PD registrado. Para el eje del norte solamente los sitios de 9N a 12N (Sector III N) tienen Ts mínimos significativamente diferentes —bajos— para los meses antes y después del solsticio de invierno. Los sectores más bajos tienen los mismos Ts mínimos el año entero, así como en el oeste. En agosto de 1985, con el uso de termógrafos Lambrecht, detecté 3°C de diferencia para Ts entre 1O y 10N en condiciones muy secas, pero la diferencia desapareció en una noche de precipitación moderada. Algunas mediciones hechas sobre el eje del sur mostraron que los Ts mínimos allí eran de 3°C a 5°C más altos que los otros en condiciones tanto secas como húmedas. Sin embargo, mi idea básica es que las heladas no son simuladas fácilmente dentro del sistema.

4. Algunas conclusiones generales sobre el carácter de la agricultura andina

En el transcurso de este trabajo se ha visto que la agricultura andina tiene un carácter especial distintivo. En cada escala, desde el nivel multifamiliar local y el nivel de comunidad hasta el del Estado Inca, se enfrentaron y administraron los mismos problemas de suelos pobres, diversidad espacial y geoecológica e incertidumbre climática básicamente de la misma manera. Aunque los detalles varían enormemente en niveles organizativos diferentes, y para los grupos étnicos con territorios en diferentes ecosistemas, así como tradiciones culturales diferentes, que están esparcidos en toda la región, los mismos principios básicos se ven en todas partes. El riesgo es atenuado por la diversificación espacial y temporal de faenas. La heterogeneidad espacial es reducida por sofisticados procedimientos de zonificación y tecnologías, la mayoría de las cuales trabajan también para reducir la incertidumbre climática. Experimentación, selección de cultivos y aclimatación son las características intrínsecas de la actividad agrícola rutinaria, desde la chacra familiar del campesino hasta los campos artificiales del Estado Inca en Moray. El tiempo es controlado por sofisticadas observaciones astronómicas que son muy diferentes a todo lo conocido en el hemisferio norte, y que suministran la base necesaria para la coordinación social requerida para la programación agrícola eficaz. La complejidad de esta coordinación es tal que la familia nuclear es una unidad productiva muy pequeña para las tareas requeridas, entonces las unidades familiares múltiples han sido la base de la actividad productiva por lo menos desde la consolidación del Imperio Wari.

En la jerga de computadoras podríamos hacer una distinción metafórica entre la programación occidental y andina en estos términos. La planificación agrícola occidental tiene mucho en común con la arquitectura computacional tipo serie de von Neumann. Múltiples tareas pueden hacerse, como todos los que manejan una PC saben, pero para efectuar simultáneamente trabajos complicados se requiere un gran poder de computación; si no la computadora se pone insufriblemente lenta. La programación andina del trabajo tiene mucho más en común con la computación de McCulloch inspirada en la arquitectura paralela neuronal.

Muchas cosas diferentes tienen que ser tomadas en cuenta simultáneamente y la valoración de la escena total para la decisión que se tome finalmente surge mediante un proceso iterativo de cambio, ponderando los diferentes factores involucrados hasta que emerja un cuadro coherente de la totalidad. El mismo trabajo puede hacerse, más rápidamente y con mucho menos poder computacional que lo que una máquina serial equivalente requeriría.

La metáfora de arriba es muy útil para apreciar las diferentes características de ambos sistemas agrícolas. Para resolver el mismo problema de trabajo un ingeniero occidental está culturalmente pre programado para buscar una solución en términos de una más alta entrada de energía. El *kamayoq* del inca, en cambio, haría grandes reuniones entre todos los involucrados hasta que emerja una solución satisfactoria para todos.³⁰ Él —o ella, ya que ciertos dominios administrativos agrícolas parecen haber estado bajo el control de mujeres— buscaría una solución organizativa. Los proyectos recientes de restauración de campos elevados de los gobiernos peruano y boliviano hacen uso extensivo de tractores para hacer tanto y tan rápidamente como sea posible, con el resultado de muchos campos malamente hechos e inestables, y muchos campesinos gravemente desilusionados y cínicos. El fracaso total de la revolución verde en los Andes, visto bajo esta luz, no es sorprendente.

Las presiones de orden económico del mundo exterior y particularmente en los años recientes de la globalización, han debilitado la cohesión social de las comunidades campesinas. En la región andina ha sido domesticada una mayor variedad de plantas alimenticias que en cualquier otra parte del mundo. Esta increíble biodiversidad, también una característica importante de la calidad de agricultura andina, constituye la base para la riqueza potencial de estos países en un mundo que está perdiendo rápidamente su biodiversidad. En los últimos años este potencial está

³⁰ En la terminología de Tainter et al (2003) la agricultura occidental se caracteriza como un sistema de alta ganancia energética y el sistema andino como un sistema de baja ganancia. Los sistemas agroindustriales de alta ganancia dependen enteramente en el subsidio de energía fósil barata (véase a Earls 2005).

revalorándose y se está haciendo un gran esfuerzo para la recuperación de muchos cultivos y variedades que están cerca de la extinción. Sin embargo, la preservación y producción continuas de estos cultivos están directamente relacionadas con la preservación de los principios de la organización social en la que surgieron. Con el beneficio de la información en curso y las revoluciones biogenéticas estos principios pueden ser actualizados fácilmente y adecuados a las necesidades tanto de los pueblos y países andinos como del mundo contemporáneo en general. Esta es la tarea principal para el futuro.

Bibliografía

ABEL, Tom

- 1998 «Complex Adaptive Systems, Evolutionism, and Ecology Within Anthropology Interdisciplinary Research for Understating Cultural and Ecological Dynamics». *Georgia Journal of Ecological Anthropology*, vol. 2, pp. 6-29.

ABEL, Tom y John R. SEPP

- 2003 «A New Ecosystem Ecology for Anthropology». *Conservation Ecology* 7 (3), 12 <http://www.consecol.org/vol7/iss3/art12>

ADAMS, Richard N.

- 1983 [1975] *Energía y estructura: una teoría del poder social*. México: Fondo de Cultura Económica.

AGRONOTICIAS

- 2004 <http://barrioperu.terra.com.pe/agronoticias/principal.html>

AGUIRRE Y., Guillermo

- 2002 «Evaluación de fuentes de fósforo en el rendimiento del cultivo de papa, con énfasis en roca fosfatada y fuentes orgánicas». *Anales científicos de la UNALM*, pp. 3. Lima.

ALTIERI, Miguel

- 1999 «Applying Agroecology to Enhance the Productivity of Peasant Farming Systems in Latin America Environment». *Development and Sustainability*, 1, pp. 197-217.

AMERICAN INTERNATIONAL GROUP (AIG)

- 2004 «Peru energy: Camisea flows forth». *The Economist Intelligence Unit*. 16/8/2004. <http://home.aigoline.com/cotent/0,1109,17797-653-ceo.00.html>

ARAUJO, Hilda

- 1988 «Aspectos sociales y culturales de las comunidades campesinas de la Sierra del Perú, a ser tomados en cuenta en la elaboración de sus programas de educación y capacitación». Tesis Doctoral. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- 1998 «Parentesco y representación iconográfica: el caso de las tablas pintadas de Sarhua, Ayacucho, Perú». En ARNOLD, Denise Y. (comp.). *Gente de carne y hueso*. La Paz-Bolivia.
- 2004 «Cosmología, religión y gestión de recursos en la comunidad aymara de Quillihuyu provincia de la Paz, Bolivia». Actas del X Congreso Latinoamericano sobre Religión y Etnicidad. San Cristóbal de las Casas, Chapas, México.

ARAUJO, Hilda, A. BRACK y E. GRILLO

- 1989 «Organización social andina y el manejo de los recursos en la Sierra». *Ecología, agricultura y autonomía campesina en los Andes: desarrollo rural y uso cuidadoso de los recursos naturales en la Sierra del Perú*. Lima: Fundación Alemana para el Desarrollo (DSE) e INP, Feldafing.

BAK, P.

- 1996 *How Nature Works: The Science of Self-organised Criticality*. New York: Copernicus.

BAR - YAM, Yaneer

- 1997 *Dynamics of Complex Systems*. Addison – Wesley.
<http://necsi.org/publications/dcs/index.html>

BBC News

1999. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/277036.stm>

BOSERUP, Ester

- 1965 *The Conditions of Agricultural Growth: The Economics of Agrarian Change under Population Pressure*. London: G. Allen and Unwin, Chicago Aldine.

BRANFORD, Sue

- 2004 «Argentina's bitter harvest». *New Scientis*, vol. 182, issue 2443, p. 40.

BROECKER, W. S.

- 2003 «Does the Trigger for Abrupt Climate Change in the Ocean or in the Atmosphere?». *Science* 300, pp. 1519-1522.

CADWELL, Joseph George

- 2003 *It's the Oil, Stupid! (Hubbert's Curve and World War III)*.
<http://www.foundation.bw/tsTheOil.htm>

CAMINO, A., J. RECHARTE y P. BIDEGARAY

- 1981 «Flexibilidad calendárica en la agricultura tradicional de las vertientes orientales de los Andes». En LECHTMAN y SOLDI (eds.). *Runakunap Kawsayninkupaq Rurasqankunaqa: la tecnología en el mundo andino*. México: UNAM.

CAMPELL, Colin J. y Jean LAHERRÈRE

- 1998 «The End of Cheap Oil». *Scientific American*, march, pp. 86-91.

CAMPELL, Colin J.

- 2002 «Forecasting Global oil Supply 2000 - 2059». *Hubbert Center Newsletters*, 02-3. <http://hubbert.mines.edu/news/Campell02-3pfd>

CHEN, Jing

- 2002 *Economic and Biological Evolution: An Analytic Thermodynamic Theory*. <http://web.unbc.ca/~chenj/thermo.pdf>

CONANT, R. y W. Ross ASHBY

- 1970 «Every good regulator of a system must also be a good model of that system». *Intern. Jour. of Systems Sciences*, 1(2): pp. 89-97.

CORELL, W. S.

- 2004 «Artic Climate Impact Assessment». <http://www.acia.uaf.edu/PDFs/Testimony.pdf>

COVIELLO, Manlio F.

- 2000 «Latin America and the Caribbean: Geothermal Resources Development». *IGA News* N° 41.
http://www.geothermie.de/iganews/no41/latin_america_and_the_caribbean.htm

CREST

- s/f Solstice Discussion Group.
<http://solstice.crest.org/discussiongroups/resources/stoves/Fuels/combustible.html>

De la CADENA, Marisol.

- 1986 «Cooperación y mercado en la organización comunal andina». *Revista Andina*, año 4, n.º 1. Cusco.

De la TORRE, Carlos y Manuel BURGA

- 1986 *Andes y camellones en el Perú andino: historia, presente y futuro*. Lima: CONCYTEC.

DOLLFUS, O., Th. SAIGNES, F. HERAN, A. FIORAVANTI MOLIERE y F. GRESLOU

- 1980 *Ambana: tierras y hombres*. La Paz: Instituto Francés de Estudios Andinos, Comité Nacional de Bolivia del MAB.

DELONG, J. B.

- 1998 «Estimating World GDP, One Million B.C. – Present».
http://econ161.berkeley.edu/TCEH/1998_Draft/World_GDP/Estimating_World_GDP.html

EARLS, John

- 1976 «La evolución de la administración ecológica inca». *Revista del Museo Nacional*, T. XLII 207-45, Lima.
- 1979 «Astronomía y ecología: la sincronización alimenticia del maíz». *Allpanchis* 14, pp. 117-135. Cusco.
- 1982 «La coordinación de la producción agrícola en el Tawantinsuyu». En LAJO M., R. AMES y C. SAMANIEGO (comp.) *Agricultura y alimentación: bases de un nuevo enfoque*. Lima: PUCP.
- 1986 «Experimentación agrícola en el Perú prehispánico y su factibilidad de reempleo». En DE LA TORRE C. y M. BURGA. *Andenes y camellones en el Perú Andino: historia presente y futuro*. Lima: CONCYTEC, pp. 301-330.
- 1989 *Planificación agrícola andina: bases para un manejo cibernético de sistemas de andenes*. Lima: COFIDE y Universidad del Pacífico.
- 1991a *Ecología y agronomía en los Andes*. La Paz: HISBOL.
- 1991b «La racionalidad cibernética de la administración en la comunidad campesina andina». Ponencia presentada en el Seminario multidisciplinario sobre la cognición y la racionalidad andina. Lima: Instituto Peruano de Investigación Científica e Instituto Goethe.
- 1992 «Viabilidad productiva de la comunidad andina». En ALIAGA J.A y J. ALBÓ (eds.). *Futuro de la comunidad campesina*. La Paz: CIPCA, pp.155-172.
- 1996 «Rotative Rank Hierarchy and Recursive Organization: The Andean Peasant Community as a Viable System». En Zuidema Reiner Tom *Structure, Knowledge, and Representation on the Andes: Studies, presented on the Occasion of his 70th Birthday*. *Journal of Steward Anthropological Society*, vol. 24, 1 y 2, pp. 297-320. Champaign, Illinois.

- 1998 «Aportes del conocimiento y las tecnologías andinas en el contexto de la aldea global». En ACEVEDO, J (ed.). *Desarrollo e interculturalidad en la zona andina*. Lima: Escuela para el Desarrollo, documento 13.
- 2004 «La agricultura peruana y la transición energética del siglo XXI». Ponencia presentada en el Simposio: *agricultura, ecología y desarrollo*, 40 años de Ciencias Sociales, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- 2005 «La gran crisis petrolera». *Coyuntura. Análisis Económico y Social de Actualidad*, Año 1, N°. 2, pp.10-12.

EARLS, John e Irene SILVERBLATT

- 1981 «La instrumentación de la cosmología Inca en el sitio arqueológico de Moray» En LECHTMAN y SOLDI (eds.) *Runakunap Kawsayninkupaq Ruras-qankunapa: La tecnología en el mundo andino*. México: UNAM.

EARTH,Trends

- 2003^a «Energy and Resources Peru».
http://earthtrends.wri.org/searchable_db/index.index.cfm?theme=6
- 2003b «Agriculture and Food Peru».
http://earthtrends.wri.org/searchable_db/index.index.cfm?theme=8

ENDERS, T. O.

- 1975 «OPEC and the Industrial Countries. The Next Ten Years». *Foreign Affairs*, July.

ENERGY INFORMATION AGENCY

- 2004 «Peru Country Analysis Brief.»
<http://www.eia.doe.gov/emeu/cabs/peru.html>

ERICKSON, Clark

- 1986 «Agricultura en camellones en la cuenca del lago Titicaca: aspectos técnicos y su futuro». En DE LA TORRE C. y M. BURGA (eds.). *Andenes y camellones en el Perú andino: historia presente y futuro*. Lima: CONCYTEC, pp. 331-50.
- 1987 «The Dating of Raised-Field Agriculture the Lake Titicaca Basin, Perú». DENEVAN, MATHEWON y KNAPP (eds.). *Pre-Hispanic Agriculture Fields in the Andean Region*. London: Bard International Series 359.
- 1992 «Applied Archaeology and Rural Development: Archaeology's Potential contribution to the Future» WEBBER (ed.). *Gifts to the Cayman: Essays in Honor of Donald W. Lathrap*, *Journal of Steward Anthropological Society*, vol. 20 (1, 2) pp.1-16.
- 1993 «The Social Organization of Prehispanic Raised – Field Agriculture in the lake Titicaca Basin». En SCARBOROUGH and ISAAC (eds.) *Research in*

Economy Anthropology: Economic Aspects of Water Management in the Prehispanic New World. Supplement 7, London: JAI Press, pp. 369-423.

FABER, M., H. NIEMES y G. STEPHAN

1987 *Entropy, Environment and Resources: an Essay in Physico-Economics*. Berlin: Springer-Verlag.

FAO

2002 World Bank World Development Indicators Country Peru.
http://www.fao.org/es/ess/compendium_2003/pdf/ESS_PER.pdf

FARRINGTON, Ian

1980 «Un entendimiento de sistemas de riego prehistórico en el Perú». *América Indígena* XL, 4. México.

FLANNERY, Kont, J. MARCUS y R. REYNOLDS

1989 *The Flocks of the Wamani: a Study of Llama Herders on the Punas of Ayacucho, Perú*. San Diego, California: Academic Press.

FLANNERY, Kont

1998 «The Ground Plans of Archaic States». En FEINMAN G.M. y Joyce MARCUS (eds.). *Archaic States*. Santa Fe, New México: School of American Research Press, pp.15.57.

FLORES OCHOA, Jorge y P. PAZ

1983 «El cultivo en Qocha en la puna surandina». En FRÍES. A. M (comp.). *Evolución y tecnología de la agricultura andina*. Cusco: IICA - CIID.

FRÉRE, M., J. REA y J. RIJKS

1975 *Estudio agroclimatológico de la zona andina*. Roma: FAO, UNESCO, PNUD.

GAWEL, K., M. REED y P. M. WRIGHT

1999 *Preliminary Report: Geothermal energy. The potential for clean power front the Earth*, Geothermal Energy Association.
<http://www.geo-energy.org/potentialReport.htm>

GEIGER, Rudolf

1959 *The Climate near the ground*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University. Press.

GELL - Mann, M.

- 1994 *The Quart and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*. New York: W. H. Freeman.

GEORGESCU - ROEGEN, N.

- 1971 *The Entropy Law and Economic Process*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- 1978 «Energy Analysis and Economic Valuation». *Southern Economic Journal*, 45, pp. 1023-1058.

GILL, R., A. y otros

- 2002 «Nonlinear grassland responses to past and future atmospheric CO₂». *Nature* 417, May 16, pp. 279-282.

GOLTE, Jürgen

- 1980 *La racionalidad de la organización andina*. Lima: IEP.

GRACE, B.

- 1983 *El clima del altiplano: Departamento de Puno*. Puno: INIPA – CIPA XV.

GROBMAN, A., W. SALHUANA y R. SEVILLA

- 1961 «Races of Maize in Peru: their origins, evolution and classification». *Publication 915 National Research Council*. Washington D.C.

GUNTER, Folke

- 2000 «Vulnerability in Agriculture: Energy use, Structure and Energy futures». Paper to Conference *Challenges for Science and Engineering in the 21st Century*. Stockholm: International Network of Engineers and Scientists for Global Responsibility.

HANSEN, J. y otros

- 2000 «Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97, pp. 9875-9880.

HANSON, R.

- 2000 «Long-term growth as a sequence of exponential modes». <http://hanson.gmu.edu/longgrow.html>

HEINBERG, Richard

- 2004 «Plan War and the Hubbert Oil Curve». *Z Magazine*, Apr 17. http://www.zmag.org/content/print_article.cfm?itemID=5351§ionID=36

HEYLIGHEN, F.

- 1996 «Self-organization». *Principia Cybernetic Web*.
<http://pespmc1.vub.ac.be/SELFORG.html>

HIRSCH, Robert L., Roger BEZDEK y Robert WENDLING

- 2005 *Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation and Risk Management*.
http://www.netl.doe.gov/publications/others/pdf/Oil_Peaking_NETL.pdf

HOLDRIDGE, Leslie R.

- 1947 «Determination of world plant formations from simple climatic data». *Science*, 105, pp. 367-368.

HOLLING, C. S.

- 2004 «From Complex Regions to Complex Worlds». *Ecology and Society* 9 (1):11.
<http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art11>

HOUSE AGRICULTURAL COMMITTEE

- 2004 News from the House Agricultural Committee, US House of Representatives, Washington. <http://agriculture.house.gov/press/108pr040322.html>

HUBBERT, M. King

- s/f <http://wolf.readinglitho.co.uk/mainpages/hubbert.html>

INSTITUTE FOR THE ANALYSIS OF GLOBAL SECURITY

- 2003 <http://www.iags.org/es060903.html>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

- 2003 http://www.iea.org/Textbase/stats/PDF_graphs/PEOIL.pdf

IPCC

- 2001a «Summary for Policy Makers, Report of Working Group 1». <http://www.ipcc.ch/pub/un/syrspanish/wg1sum.pdf>
2001b «Climate Change 2001: The Scientific Basis». Working Group 1
http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/spanish/pdf/wg1sum.pdf

ISBELL, William

- 1978 «Environmental Perturbations and the Origin of the Andean State». J. En REDMAN et. al. (eds). *Social Archaeology*. New York: The Academic Press.
1996 «Household and Ayni in the Andean Past». En ZUIDEMA Reiner Tom *Structure, Knowledge, and Representation on the Andes: Studies, presented on the Occasion of his 70th Birthday*. *Journal of Steward Anthropological Society*, vol. 24, I and 2.

IVANHOE, L. F.

1995 «Future world oil supplies: There is a finite limit». *World Oil*, octubre.

JANSSEN, M. A., T. A. KOHLER y M. SCHEFFER

2003 «Sunk-cost effects and vulnerability to collapse in ancient societies». *Current Anthropology* 44 (5), pp. 722-728.

JANSSEN, M. A. y M. SCHEFFER

2004 «Overexploitation of Renewable Resources by Ancient Societies and the Role of Sunk-Cost Effects». *Ecology and Society* 9 (1): 6. <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art6>

JOHANSEN, A.

s/f «Discrete scale invariance and other cooperative phenomena in spatially extended systems with threshold dynamics». Ph.D. thesis, Niels Bohr Institute. <http://www.nbi.dk/~johansen/pub.html>

JOHANSEN, A. y D. SORNETTE

1999 «Critical Crashes». *Risk*, vol. 12, n.º. 1, 91-94.

http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/9901/9901035.pdf

2001a «Finite-time singularity in the dynamics of the world population, economic and financial indices». *Physica A* 294 (3-4), pp. 465-502. http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0002/0002075.pdf

2001b «Log-periodic power law bubbles in Latin-American and Asian markets and correlated anti-bubbles». *Western stock markets: An empirical study. International Journal of Theoretical and Applied Finance*, 4(6), pp. 853-920. <http://arXiv.org/abs/cond-mat/9907270>

JOHANSEN, A., D. SORNETTE y O. LEDOIT

2004 «Predicting Financial Crashes using discrete scale invariance». *Risk*, vol.1, n.º 4, pp. 5-32. <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9903321>

JOHNSON, Allen W. y Timothy EARLE

1987 *The Revolution of Human Societies: From Foraging Group to Agrarian State*. California: Stanford University Press.

JOOS, Fortunate y otros

1999 «Global Warming and Marine Carbon Cycle Feedbacks on Future Atmospheric CO₂». *Science* 284, pp. 464-467.

KARL, T. R. y K. E.

s/f «Trenberth Modern Climate Change». *Science* 302, pp. 1719-1723.

KAUFFMAN, Stuart

- 1995 *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford: Oxford University Press.

KENDAL, Ann

- 1996 «An archaeological Perspective for Late Intermediate Period Inca Development in the Cusco Region». En ZUIDEMA Reiner Tom *Structure, Knowledge, and Representation on the Andes: Studies, presented on the Occasion of his 70th Birthday*. *Journal of Steward Anthropological Society*, vol. 24, I and 2, pp. 121-156.

KERR, Richard A.

- 1988 «The Next Oil Crisis Looms Large – and Perhaps Clouse». *Science*, vol. 281, n.º 5380, pp 1128-1131.

KLOMP, N. I. y D. G. GREEN

- 1996 «Complexity and Connectivity Ecosystems». *Complexity International* 3.

KOLATA, Alan

- 1993 *The Tiwanaku: portrait of an Andean Civilization*. Cambridge Massachusetts: Blackwell.

LAHERRÈRE, Jean

- 2001 «Forecasting future production from past discovery». *The global energy balance: Towards a sustainable energy future*. Seminario OPEP, OPEC y Viena. <http://www.hubbertpeak.com/laherrere/opec2001.pdf>

LAJO, Manuel, R. AMES y C. SAMANIEGO

- 1982 *Agricultura y alimentación: bases de un nuevo enfoque*. Lima: PUCP.

LLERENA, Carlos, A. Moshe INBAR y María A. BENAVIDES (comp)

- 2004 *Conservación y abandono de los andenes*. Lima: UNALM y Universidad de Haifa, Israel.

LONGWELL, Harry J.

- 2002 The Future of the Oil and Gas Industry: Past approaches". *New Challenges World Energy*, vol. 5, n.º 3. http://www.worldenergysource.com/articles/pdf/longwell_WE_v5n3.pdf

MARCUS, Joyce

- 1998 «The Peaks and Valleys of Ancient States». En FEINMAN G.M y Joyce MARCUS (eds.). *Archaic States*. Santa Fe, New Mexic: School of American Research Press, pp. 59-93.

MATURANA, Humberto y Francisco VARELA

1984 *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del entendimiento humano*. Santiago: Editorial Universitaria Santiago de Chile.

MAYBERRY, Keith S.

s/f *Simple cost to establish and produce asparagus*.
<http://www.agecon.ucdavis.edu/outreach/crop/Archives/asparagus.pdf>

MAYER, Enrique

1985 «Production Zones». En MASUDA Shozo, Izumi SHIMADA y Craig MORRIS. (eds.). *Andean Ecology and Civilization: An Interdisciplinary Perspective on Ecological Complementarity*. Tokio: University of Tokyo Press, pp. 45-84.

1994 «Recursos naturales medio ambiente, tecnología y desarrollo». En DAN-COURT Óscar, Enrique MAYER y Carlos MONGE (eds.). *Perú: El problema agrario en debate*: Lima: SEPIA V, pp. 479-533.

MAYER, Enrique y C. FONSECA

1979 *Sistemas agrarios en la cuenca del río Cañete*. Lima: HONREN.

MCKILLOP, Andrew

2004 «Energy transition and final energy crisis». *Vheadline.com Venezuela's Electronic News*, 10/10/2004.
<http://www.vheadline.com/readnews.asp?id=23067>

MEDDENS, Frank

1991 «A provincial perspective of Huari organization viewed from the Chichas/Soras Valley». En ISBELL W.H. y G.F. Mc EWAN (eds.). *Huari Administrative Structure Prehistoryc State architecture and State Government*. Washington DC: Dumbarton Oaks Research Library and Collection, pp. 215-231.

MITCHELL, William

1980a «Multi-Zone Agriculture in an Andean Village's». *Ayacucho Archaeological Project*, VI. New York: Academic Press.

1980b «Local ecology and the State: implications of contemporary quechua land use for the inca sequence of agricultural work». *Beyond the myths of culture: essays in cultural materialism*. New York: The Academic.

MONBIOT, George

2004 «America's war with itself». *Guardian*, 21st December.
<http://ww.monbiot.com/archives/2004/12/21/americas-war-with-itself/>

MORALES, F. y otros

- s/f «Secado natural de la madera».
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia20/HTML/articulo07.htm>

MORRIS, Craig

- 1981 «Tecnología y organización inca del almacenamiento de víveres en la sierra». En LECHTMAN y SOLDI (eds.). *Runakunap Kawsayninkupaq Ruras-qankunaqa: La tecnología en el mundo andino*, México: UNAM, pp. 327-406.

MURRA, John

- 1964 «Una apreciación etnológica de la visita». En MURRA, John (ed.) *Visita hecha a la Provincia de Chuquito por García Diez de San Miguel en el Año 1567* Lima: Documentos Regionales para la Etnología y Etnohistoria Andina. pp. 421-444.
- 1972 «El "control vertical" de un máximo de pisos ecológicos en las sociedades andinas». En ORTIZ DE ZÚÑIGA Iñigo. *Visita de la provincia de León de Huanuco*, T. 2. Huánuco: pp. 429-476.
- 1975 *Formaciones económicas y políticas del mundo andino*. Lima: Instituto de Estudios Peruanos.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL

- 2001 *Climate Change Science: An analysis of some key questions*. Washington: National Academy Press.

ODUM, Howard T.

- 1974 *Energy, Ecology and Economics*. Minnesotans For Sustainability.
http://www.mnforsustain.org/energy_ecology_economics_odum_ht_1973.htm
- 1980 *Ambiente energía y sociedad*. Barcelona: Blume.
- 1988-1975 *Energy Basis for Man and Nature*. New York: Mc Graw – Hill.
- 1988 «Self-Organization, Transformity and Information». *Science* Vol. 242, n.º 4882, pp. 1132-1139.
- 1996 *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley.

ODUM, Howard T. y Elisabeth C. ODUM

- 1981 *Energy Basis for Man and Nature*. New York: McGraw-Hill.

OFICINA DE INFORMACIÓN AGRARIA DEL MINISTERIO DE AGRICULTURA

- 2000 *Importación de fertilizantes plaguicidas y válvulas para riego utilizadas en la agricultura*. Lima.

- PARSONS, Jeffrey, R. M. HASTINGS y R. MATOS M.
1988 «Rebuilding the State in Highland Peru: Herder – Cultivator interaction during the Late Intermediate Period in the Tarama – Chinchaycocha Region». *Latin American Antiquity* 8 (4), pp. 317-341.
- PEARCE, Fred
2001 «Scenario 2». *New Scientist*, vol. 170, issue 2288, 28 April, pp. S8.
2003 «Expect a hot polluted future, says EU forecast». *New Scientist*, vol. 178, 2396, 8.
- PFEIFFER, Dale Allen
2003 «Eating Fossil Fuels». *The Wilderness Publications*.
<http://www.organicconsumers.org/corp/fossil-fuels.cfm>
- PIMENTEL, D. y otros
1973 «Food Production and the Energy Crises». *Science*, vol. 128, n.º 4111, pp. 443-449.
- PIMENTEL, D. y M. GIAMPIETRO
1994 «Food land population and the U.S. Economy, Carrying Capacity Network». <http://www.dieoff.com/page55.htm>
- PORTAL AGRARIO
2003 «Cultivos de importancia, Ministerio de Agricultura». [http://www.portalagrario.gob.pe/esparrago pro.shtml](http://www.portalagrario.gob.pe/esparrago%20pro.shtml)
- PUMAIN, Denise
2003 «Scaling Laws and Urban Systems». <http://www.santafe.edu/research/publications/workingpapers/04-02-002.pdf>
- PRIGOGINE, I.
1985 «La termodinámica de la vida». *Biología Molecular*. Biblioteca de divulgación científica, pp. 227-252. Madrid.
- REDMAN, C. L. y A. P. KINZING
2003 «Resilience of past landscapes: Resilience Theory, Society and the longue durée». *Conservation Ecology* 7 (1), 14.
<http://www.consecol.org/vol7/iss1/art14>
- RIFKIN, J.
1989 *Entropy: Into a greenhouse world*. New York: Bantam.

RIVAS, R. y otros

- 1999 *Promoción económica y tecnológica en los municipios de Mocomoco y Puerto Acosta: recuperación de andenes prehispánicos*. La Paz: Ricerca e Cooperazione y la Unión Europea.

ROCHA, Jorge

- 2003 «Using Emeryg Analysis in Ethnographic Field Research». *Field Methods*, vol. 13, n.º 3, agosto 2001, pp. 244-262.
- 2004 «Cambios en la percepción de los recursos naturales como resultado de la participación en la economía de mercado: una comunidad campesina de los Andes peruanos». *Antropológica* 22. Lima: PUCP.
- s/f «Evaluation of the Solar Transformity of Glacial Runoff on the Cordillera Blanca in the Peruvian Andes». Manuscrito.

ROSAS, Washington

- 1983 «El sistema agrícola andino de la comunidad de Amaru». En FRÍES, A. M. (ed.) *Evolución y tecnología de la agricultura Andina*. Cusco: IICA, CIID.
- 1986 «El sistema de cultivo en Ochoa». En DE LA TORRE C. y M. BURGA (eds.). *Andenes y camellones en el Perú andino: historia, presente y futuro*. Lima: CONCYTEC, pp.107-32.

SAHLINS, Marshall

- 1972 *Stone Age Economics*. Walter De Gruyter, Inc.

SANCHEZ, H.

- 1971 «Fenología del Maíz: Período vegetativo y efectos de ciertos factores ambientales sobre el ritmo de crecimiento». IV Conferencia sobre el Mejoramiento del Maíz en la zona andina, IICA – CIAT, Palmire.

SANDERS, D. R., S. H. IRWIN y R. M. LEUTHOLD

- 1997 «Noise Traders, Market Sentiment, and Futures Price Behaviour, Economics». Archive at WUSTL. <http://ideas.repec.org/p/wpa/wuwpfi/9707001.html>

SCHJELLERUP, I.

- 1986 «Andenes y camellones en la región de Chachapoyas». En DE LA TORRE C. y M. BURGA (eds.). *Andenes y camellones en el Perú andino: historia, presente y futuro*. Lima: CONCYTEC, pp.133-150.

SCHREIBER, K.

- 1991 «Jincamocco: a Huari administrative centre in the South Central Highlands of Peru». En ISBELL W.H. y G.F. MAC EWAN (eds.). *Huari Adminis-*

- trative structure: *Prehistoric State Architecture and State Government*. Washington DC: Dumbarton Oaks Research Library and Collection, pp.199-213.
- 1992 «Wari Imperialism in de Middle Horizon Peru». *Anthropological papers Museum of Antropology*. Ann Arbor: University of Michigan.
- SCHULTE, M.
- 1996 *Tecnología Agrícola Andina. El manejo de la diversidad ecológica en el valle Charazani*. La Paz: Ed. Plural.
- SHERBONDY, J.
- 1986 «Los ceques: Código de Canales en el Cusco Incaico». *Allpanchis* 27, pp. 39-74. Cusco.
- SKREBOWSKI, Chris
- 2004 En «Adam Porter first Signs of a Global Decline in Oil». *Al Jazeera* 25 de agosto. <http://English.aljazeera.net/NR/exeres/561306AC-83F7-4FCE-A7EE-3EDD1B5C6096.htm>
- SORNETTE, D.
- 1998 «Discrete scale invariance and complex dimensions». *Physics Reports* 297, pp. 239-270.
- 2002 «Predictability of catastrophic events: material rupture, earthquakes, turbulence, financial crashes and human birth». *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 99, SUPP1, pp. 2522-2529. http://www.pnas.org/cgi/reprint/99/sup1_1/2522
- 2003a «Scientific prediction of Catastrophes: A New Approach». *UCLA Earth and Space Sciences*. <http://www.ess.ucla.edu/faculty/sornette/catastrophies.asp>
- 2003b *Why Stock Markets Crash: Critical events in complex financial systems*. Princeton y Oxford: Princeton University Press.
- 2004a *Critical Phenomena in Natural Sciences (Chaos, Fractals, Self organization and Disorder: Concepts and Tools*. 2nd Editions, Springer, Verlag.
- 2004b «Sand pile Model». *Encyclopedia of Non-linear Sciences*. <http://www.ess.ucla.edu/faculty/sornette/OSX3463.pdf>
- SORNETTE, D., Y. MALEVERGNE y J. F. MUZY
- 2002 «Volatility fingerprints of large shocks: endogenous versus exogenous». *Risk Magazine*. <http://arXiv.org/abs/cond-mat/0204626>
- STEPP, J. R. y otros
- 2003 «Remarkable Proprieties of Human Ecosystems». *Conservation Ecology* 7,3,11. <http://www.consecol.org/vol7/iss3/art11>

SZEMINSKI, Jan

- 1997 *De las vidas del Inka Manqu Qhapaq*,. Trujillo, España: Ed. La Coria Fundación Xavier de la Salas.

TAINTER, J. A.

- 1996 «Complexity, Problem Solving, and Sustainable Societies». En COSTANZA R., S. OLMAN, J. M. ALIER, P.H. JASINKI, S. MAGEAU y O. SEGURA (eds.) *Getting Down to Earth: Practical Applications of Ecological Economics*. Island Press. <http://dioeff.org/page134.htm>
- 1998 *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge: Cambridge University Press.

TAINTER, J. A. y otros

- 2003 «Resource Transitions and Energy Gain: Context of Organization». *Ecology and Society* 7 (3), 4.
<http://www.ecologyandsociety.org/vol7/iss3/art4/main.html>

TEMPLET, Paul H.

- 1998 «Energy, economic diversity and development; an international empirical systems analysis». Paper at 17th World Energy Council Congress, Houston.
<http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications.html>

THOMPSON, L. G. y otros

- 1985 «A 1500 – Year Record of Tropical Precipitation in Ice cores from the Quelccaya Ice Cap, Peru». *Science* 229, pp. 971-973.

TOSSI, Joseph y ONERN

- 1976 *Mapa ecológico del Perú: guía explicativa*. Lima: ONERN.

TREACY, John

- 1994 *Las Chacras de Coporaque: anderia y riego en el valle del Colca*. Lima: IEP.

TROLL, Carl

- 1980 «Las culturas superiores andinas y el medio geográfico». *Allpanchis* 15, pp. 3-56.

URTON, Gary

- 1981a *At the Crossroads of the Earth and the Sky: an Andean Cosmology*. Austin: University of Texas, Institute. of Latin American Studies.
- 1981b «La orientación de la astronomía quechua e inca». En LECHTMAN y A. M. SOLDI (eds.) *Runakunap Kawsayninkupaq Rurasqankunapa: Las tecnologías en el mundo andino*. México: UNAM, pp. 457-489.

- 1984 «Chuta el espacio de la práctica social en Pacariqtambo, Perú». *Revista Andina* 2 N.1, pp. 7-56.
- Von FOERSTER, Heinz
- 1966 «The Numbers of the Man, past and future: A collection of estimates and a survey of models of the pattern of human population growth». Biological Computer Laboratory Report 13. University of Illinois.
- Von FOERSTER H, P. M. MORA y L. W. AMIOT
- 1961 «Doomsday». *Science*, 133, pp. 936-946.
- 1961 «Population Density and Growth». *Science* 133, pp. 1931-1937.
- WALDROP, M. Mitchell
- 1992 *Complexity: The emerging science at the edge of order and chaos*. New York: Simon & Schuster.
- WALKER, B. y W. STEFFEN (editores)
- 1997 «The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems». *Science*, 1, IGBP, Stockholm.
- Neurosciences*, vol. II, Rockefeller University Press, New York.
- WEISS, H. y R. S. BRADLEY
- 2001 «What drives societal collapse?». *Science* 291, pp. 609-610.
- WHITE, Leslie
- 1959 *The Evolution of Culture: the development of civilization to the fall of Rome*. New York: MacGraw – Hill.
- WHITNEY, Mike
- 2004 «Pandora's Government: The Oil Demons are Out of the Box». *Counterpunch*, 1 de octubre. <http://www.counterpunch.org/whitney10012004.html>
- WINSLOW, D. J.
- 1997 *Introduction to self-organized criticality and earthquakes*. www.geo.lsa.umich.edu/~ruff/Geo105.W97/SOC/SOCeq.html
- WINTERHALDER, B.
- 1994 «The ecological basis of water management in the central Andes: Rainfall and temperature in southern Peru». En MITCHELL, W.P. y D.W. GUILLET (eds.). *Irrigation at High Altitudes: The social organization of Water Control Systems in the Andes*. Washington, DC.: American Anthropological, pp. 21-67.

WOLF, Erick

1987 *Europa y la gente sin historia*. México: Fondo de Cultura Económica.

WOOD, John H., Gary R. LONG y David F. MOREHOUSE

2004 *Long – Term World Oil Supply Scenarios: The Future is neither as bleak nor Rosy as Some Assrt.* Energy. Information Agency, departments Energy, USA.
<http://www.eia.doe.gov/pub/oilgas/petroleum/featurearticles/2004/worldoilsupply/oilsupply04.html>

WORD.IQ

s/f «Definition of Hubbert peak». http://www.wordiq.com/definition/Hubbert_peak

ZUIDEMA, R. Tom

1964 *The Ceque System of Cusco: The Social Organization of the Capital of the Inca*. International Archives of Ethnography.

1980a «El calendario inca» En AVENI, Anthony. comp *Astronomía en la América Antigua*. México, Siglo XXI.

1980b «El Ushnu». *Revista de la Universidad Complutense*, vol. 2, Nº 117, pp. 317-62, Madrid.

1982a «The sidereal Lunar Calendar of the Incas». En *Archaeoastronomy in the New World*, ed. Aveni.

1982b «Catatichillay: The role of the Pleiades and of the Southern Cross and a and b Centauri in the calendar of the Incas». En AVENI, A. y URTON, G. (eds.) *Ethnoastronomy and Archaeoastronomy in the American Tropics*. New York: TRANS. N.Y. Academic. SCI n. 385: pp. 203-30.

1989a *Reyes y Guerreros: ensayo de Cultura Andina*. Lima: FOMCIENCIAS, CONCYTEC, Universidad de Illinois, Shell y el Instituto Francés de Estudios Andinos.

1989b «The Moieties of Cusco». En MAYBURY-LEWIS, D y ALMAGOR, U (eds.). *The Attraction of Opposites: Thought and Society in the Dualistic Mode*. Ann Arbor: The University of Michigan Press.

1990 *Inca Civilization in Cusco*. Austin: University of Texas Press.