

**Vivo, provocador,
sorprendente:
dimensiones
emocionales
de los materiales
bio-sinérgicos
para un diseño
socialmente
significativo**

**Alive, Provocative,
Surprising:
Emotional
Dimensions of
Bio-Synergistic
Materials for
Socially
Meaningful Design**

POLITECNICO DI MILANO
DEPARTAMENTO DE DISEÑO
MILÁN, ITALIA
stefano.parisi@polimi.it

Stefano Parisi

POLITECNICO DI MILANO
DESIGN DEPARTMENT
MILAN, ITALY
stefano.parisi@polimi.it

UNIVERSIDAD DE UTRECHT
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
UTRECHT, PAÍSES BAJOS
s.shetty@uu.nl

Shomali Shetty

UTRECHT UNIVERSITY
BIOLOGY DEPARTMENT
UTRECHT, NETHERLANDS
s.shetty@uu.nl

DISEÑA | 17 AGOSTO 2020
ISSN

0718-8447 2452-4298
(impreso) (electrónico)

COPYRIGHT: CC BY-SA 3.0 CL
**Artículo de investigación
original**

Recepción 17 JUN 2020
Aceptación 10 AGO 2020

Cómo citar este artículo:

Parisi, S., & Shetty, S. (2020).
Vivo, provocador, sorprendente:
dimensiones emocionales
de los materiales bio-
sinérgicos para un diseño
socialmente significativo.
Diseña, (17), 128-159.
[https://doi.org/10.7764/
disena.17.128-159](https://doi.org/10.7764/disena.17.128-159)

DISEÑA | 17 AUGUST 2020
ISSN

0718-8447 2452-4298
(print) (electronic)

COPYRIGHT: CC BY-SA 3.0 CL
**Original
Research Article**

Reception JUN 17 2020
Acceptance AUG 10 2020

How to cite this article:

Parisi, S., & Shetty, S. (2020).
Alive, Provocative, Surprising:
Emotional Dimensions of
Bio-Synergistic Materials for
Socially Meaningful Design.
Diseña, (17), 128-159.
[https://doi.org/10.7764/
disena.17.128-159](https://doi.org/10.7764/disena.17.128-159)

Stefano Parisi Licenciado (BS) en Diseño de Productos, Politecnico di Milano. MSc en Diseño de Productos para la Innovación, Politecnico di Milano. Doctor (c), Politecnico di Milano. Es investigador en el Departamento de Diseño del Politecnico di Milano y miembro del Materials Experience Lab y del DIY Materials Research Group. Trabaja en experiencia con materiales emergentes. Su investigación se centra en la innovación en diseño, la enseñanza y las metodologías de transferencia de conocimiento sobre materiales emergentes para el diseño, en particular los que tienen cualidades híbridas, dinámicas e interactivas. Algunas de sus publicaciones más recientes son “The Hybrid Dimension of Material Design: Two Case Studies of a Do-it-yourself Approach for the Development of Interactive, Connected, and Smart Materials” (con M. Holzbach y V. Rognoli; *Advances in Intelligent Systems and Computing* 1131, Springer, 2020), “Design for ICS Materials: A Tentative Methodology for Interactive, Connected, Smart Materials Applied to Yacht Design” (con A. Bionda, A. Ratti y V. Rognoli; *Advances in Intelligent Systems and Computing* 903, Springer, 2020) y “Material Tinkering. An Inspirational Approach for Experiential Learning and Envisioning in Product Design Education” (*The Design Journal*, vol. 20, sup. 1).

Shonali Shetty Licenciada en Diseño Integrado, Köln International School of Design. PGD, Marketing y Comunicación avanzados. BBM en Administración de Empresas, Universidad de Bangalore. Colabora como investigadora en el Departamento de Biología de la Universidad de Utrecht. También es académica de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Utrecht, donde ejerce la docencia en temas como las humanidades, el diseño circular y el diseño centrado en las personas. Fundó el estudio de diseño MeshLabs (con sede en Róterdam), enfocado en impulsar narrativas transculturales y bio-inspiradas a través del diseño. Como diseñadora crítica, está interesada en cerrar la brecha que distingue entre naturaleza y cultura, proponiendo escenarios alternativos que adoptan un enfoque de diseño más que humano. Creados en colaboración con biólogos, sus proyectos “Man and Fungi” (2020) y “Project AeR” (2018) son ejemplos de dicha integración.

Stefano Parisi BS in Product Design, Politecnico di Milano. MSc in Product Design for Innovation, Politecnico di Milano. PhD Candidate, Politecnico di Milano. He is a Research Fellow at the Design Department of the Politecnico di Milano and a member of the Materials Experience Lab and the DIY Materials Research Group. He works in emerging materials experience. His research is focused on innovative design, teaching, and knowledge transfer methodologies for emerging materials for design, in particular the ones having a hybrid, dynamic and interactive qualities. Some of his most recent publications are ‘The Hybrid Dimension of Material Design: Two Case Studies of a Do-it-yourself Approach for the Development of Interactive, Connected, and Smart Materials’ (with M. Holzbach and V. Rognoli; *Advances in Intelligent Systems and Computing* 1131, Springer, 2020), ‘Design for ICS Materials: A Tentative Methodology for Interactive, Connected, and Smart Materials Applied to Yacht Design’ (with A. Bionda, A. Ratti, and V. Rognoli; *Advances in Intelligent Systems and Computing* 903, Springer, 2020), and ‘Material Tinkering. An Inspirational Approach for Experiential Learning and Envisioning in Product Design Education’ (*The Design Journal*, Vol. 20, sup. 1).

Shonali Shetty BA in Integrated Design, Köln International School of Design. PGD, Advanced Marketing & Communication. BBM in Business Management, Bangalore University. She is a Collaborative Researcher at the University of Utrecht Department of Biology. She is also a Faculty Member at the University of Utrecht Applied Sciences, where she lectures on topics such as humanities, and human-centered and circular design. She founded the Design Studio MeshLabs, which is based in Rotterdam and focuses on driving forward transcultural and bio-inspired narratives through design. As a norm-critical designer, she is keen on bridging the gap between nature and culture, proposing alternative scenarios that take on a more-than-human approach to design. Created in collaboration with biologists, her projects ‘Man and Fungi’ (2020) and ‘Project AeR’ (2018) are examples of such integration of culture and nature.

RESUMEN La polinización cruzada entre biología y electrónica está haciendo emerger nuevos materiales con cualidades híbridas, dinámicas e interactivas. En este artículo exploratorio intentamos una definición y una taxonomía original de los *materiales bio-sinérgicos*. Analizando los mejores ejemplos dentro de la taxonomía, argumentamos que ellos suscitan experiencias materiales emergentes relacionadas con el hecho de estar vivos y ser provocadores y sorprendentes, desplegando en los usuarios un conjunto único de emociones, sentimientos y experiencias. Tales experiencias promueven un cambio en los valores de la sociedad, abordando un

Palabras clave:

Materiales bio-sinérgicos
Bio-diseño
Interactividad
Dinamismo
Imperfección

complejo sistema de valores relacionados con la interdependencia, la conciencia ambiental, las colaboraciones multi-especies, el cuidado, la transitoriedad y la imperfección. Además, re-centran los enfoques de diseño, pasando del diseño antropocéntrico al diseño “más que humano”. Los hallazgos se articulan en un marco original de materiales bio-sinérgicos para un diseño socialmente significativo. Esta investigación preliminar puede extenderse a un robusto tema de investigación, catalizando implicaciones positivas para la naturaleza, la tecnología y la sociedad.

ABSTRACT Novel materials with hybrid, dynamic, and interactive qualities are emerging due to the cross-pollination between biology and electronics. In this exploratory article, we propose an original and tentative definition and taxonomy of *Bio-Synergistic materials*. By analyzing the best examples within the taxonomy, we argue that they elicit emerging materials experiences related to being alive, provocative, and surprising, unfolding a unique set of emotions, feelings, and experiences for users. Such experiences promote a shift in values in society, addressing a complex system of values related to inter-

Keywords:

Bio-Synergistic materials
Bio-design
Interactivity
Dynamism
Imperfection

dependence, environmental consciousness, multi-species collaborations, caring, transience, and imperfection, and re-centering design approaches from being anthropocentric to becoming more-than-human. The findings are articulated in an original framework of Bio-Synergistic materials for socially meaningful design. This preliminary investigation may be extended into a solid research theme, catalyzing positive implications for nature, technology, and society.

INTRODUCCIÓN

Debido a la polinización cruzada entre diseño, ingeniería de materiales, biología y electrónica, están surgiendo nuevos materiales con propiedades dinámicas y estructuras híbridas. Algunos ejemplos son los materiales bio-basados similares a la piel que integran componentes electrónicos, o los materiales bio-luminescentes que reaccionan a estímulos gracias al uso de organismos vivos. Dichos materiales pueden cambiar radicalmente la forma en que damos forma a nuestra materialidad, así como también la manera en que percibimos nuestro mundo. De hecho, para usuarios y diseñadores la novedad de estos materiales no radica solo en las posibilidades técnicas y prácticas que podrían configurar un espacio híbrido, sino también en las experiencias que podrían generar. Suscitán una nueva estética relacionada con la imperfección, la temporalidad y la agencia de entidades no humanas, desplegando un complejo sistema de emociones, sentimientos y experiencias difíciles de captar y articular debido a su novedad. Las nuevas estéticas promovidas por estos materiales pueden fomentar el establecimiento de nuevas emociones y comportamientos en la sociedad. Cuando se integran al proceso de diseño, estas emociones tienen el potencial de crear experiencias positivas y un diseño socialmente significativo.

Actualmente, la industria y la academia carecen de teorías y de un marco sistemático para comprender a fondo este género de materiales y su impacto en la sociedad. Los materiales biológicos, interactivos e inteligentes se han estudiado en gran medida desde la perspectiva de las experiencias con materiales (Barati et al., 2019; Camere & Karana, 2017; Karana et al., 2018; Rognoli, 2015), y el diseño positivo los ha explorado a fondo desde la perspectiva de la experiencia con productos (Desmet, 2013; Desmet & Hekkert, 2007). En este artículo, reunimos estos campos de diseño cuyo interés va en aumento y pretendemos ofrecer una forma original de estructurar la literatura, una taxonomía apoyada en una selección de ejemplos y un marco conceptual novedoso. Esta contribución presentará un nuevo marco para abordar la categoría emergente y en evolución de los *materiales bio-sinérgicos*, los que

INTRODUCTION

Novel materials with dynamic properties and hybrid structures are emerging due to the cross-pollination between design, material engineering, biology, and electronics. Examples are bio-based skin-like materials with embedded electronics, or bio-luminescent materials reacting to stimuli, thanks to the use of living organisms. Such materials may radically change the way we could shape our materiality, but also the way we could perceive our world. Indeed, the novelty about these materials for users and designers is not only from the point of view of technical possibilities and practices of shaping a hybrid space, but also from the point of view of the experiences they can generate. They elicit new aesthetics related to imperfection, temporality, and agency of non-human entities, unfolding a complex system of emotions, feelings, and experiences difficult to grasp and articulate due to their novelty. The new aesthetics elicited by such materials may encourage the establishment of new emotions and behaviors in society. When integrated into the design process, these emotions can have the potential to create positive experiences and socially meaningful design.

Currently, industry and academia are lacking theories and a systematic frame for an in-depth understanding of this genre of materials and its impact on society. Bio-based, interactive, and smart materials have been studied to a great extent from a materials experiences perspective (Barati et al., 2019; Camere & Karana, 2017; Karana et al., 2018; Rognoli, 2015), and positive design has thoroughly explored them from a product experience perspective (Desmet, 2013; Desmet & Hekkert, 2007). In this article, we bring together these increasingly interesting fields of design and aim to propose an original structuring of the literature, a taxonomy supported by selected examples, and a novel framework. This contribution will present a new framing to approach the emerging and evolving category of *Bio-Synergistic materials*, as they will likely shift from demonstrative work

probablemente pasen del trabajo demostrativo y la investigación al uso cotidiano y corriente. Este nuevo marco será beneficioso para los diseñadores, investigadores y estudiantes que asumen el reto de comprender, desarrollar o aplicar estos materiales, o incluso para los consumidores, ya que les permitirá comprender mejor los materiales y replantear su relación con la materialidad.

Después de una revisión de la literatura sobre las nociones básicas, definimos tentativamente los materiales bio-sinérgicos. En este artículo, nuestro objetivo es extender la categorización de materiales interactivos, conectados e inteligentes (materiales ICS, por sus siglas en inglés) (Parisi, Spallazzo, et al., 2018) para incluir los materiales bio-sinérgicos. Lo hacemos proponiendo una taxonomía original y tentativa de los materiales bio-sinérgicos con una selección de ejemplos y conceptos desarrollados en la intersección de la fabricación de materiales, la biología sintética y la computación. El enfoque que usamos en la selección de ejemplos es inclusivo, por lo que incorpora proyectos que varían en complejidad. Este enfoque inclusivo da valor al potencial de diversidad y riqueza que se encuentra en esta área de diseño y nos permite desarrollar una taxonomía de materiales que se inspira y se basa en marcos existentes, ya sea en nuestro trabajo anterior o en trabajos relacionados de otros investigadores. Luego, discutimos cuáles son los principales patrones experienciales y las dimensiones emocionales que tales materiales permiten y conllevan, a saber, que están vivos y son provocativos y sorprendentes. También discutimos y articulamos los nuevos valores que promueven en la sociedad: imperfección, mutabilidad, interdependencia y cuidado, lo que lleva a la conciencia ambiental y a colaboraciones de multi-especies, así como a re-centrar los enfoques de diseño, que dejan de ser antropocéntricos y pasan a convertirse en “más que humanos”. Para lograr eso, recopilamos los hallazgos de nuestras observaciones y los articulamos en un marco original de materiales bio-sinérgicos para un diseño socialmente significativo.

and research to everyday and mainstream usage. This new framing would be beneficial for designers, researchers, and students who take the challenge of understanding, developing, or applying these materials, or even for the consumers, since it allows them to better understand materials and reframe their relation to materiality.

After a literature review on grounding notions, we tentatively define Bio-Synergistic materials. In this article, we aim to extend the categorization of Interactive, Connected, and Smart materials (ICS materials) (Parisi, Spallazzo, et al., 2018) to include Bio-Synergistic materials. We do this by proposing an original and tentative taxonomy of Bio-Synergistic materials with a selection of examples and concepts developed in the intersection of materials making, synthetic biology, and computing. The approach we used in the selection of examples is inclusive, thus it incorporates projects that vary in complexity. This inclusive approach gives value to the potential diversity and richness found in this design area and allows us to develop a taxonomy of materials that is inspired and grounded on existing frameworks, in either our previous work, or related works by other scholars. Then, we discuss what are the main experiential patterns and emotional dimensions that such materials enable and entail – i.e., alive, provocative, surprising. We also discuss and articulate the new values they promote in society – i.e., imperfection, impermanence, interdependence, caring; leading to environmental consciousness and multi-species collaborations, and re-centering design approaches from being anthropocentric to becoming more-than-human. To accomplish that, we gather the findings from our observations and articulate them in an original framework of Bio-Synergistic materials for socially meaningful design.

REVISIÓN DE LA LITERATURA: UN MARCO PARA LOS MATERIALES BIO-SINÉRGICOS Y SUS IMPLICACIONES SOCIALMENTE SIGNIFICATIVAS

Antes de presentar la definición tentativa y la taxonomía de los materiales bio-sinérgicos, presentaremos las principales nociones y los conceptos que inspiran y fundamentan este artículo. Comenzamos con una visión general del giro hacia la sensorialidad y la experiencia que se observa en los materiales para el diseño. Luego, describimos la agencia de los materiales para dar forma a la estética, los valores y los comportamientos, y presentamos el concepto de lo “más que humano”, que lleva a una nueva perspectiva transicional e interdependiente. A continuación, describimos la materialidad emergente, caracterizada por ser híbrida, dinámica e interactiva. Finalmente, reportamos las definiciones de materiales interactivos e inteligentes que se encuentran en este campo, y presentamos el giro desde los materiales interactivos electrónicos hacia los materiales interactivos bio-basados.

Sensorialidad y experiencia con los materiales: de la estética a los valores sociales

Convencionalmente, los diseñadores han observado los materiales en función de su perfil “duro”, es decir, de sus características técnicas, siguiendo un enfoque “cientificista” y derivado de la ingeniería (Ashby et al., 2007). En los últimos años, los investigadores y profesionales del diseño han comenzado a reconocer la influencia de los sentidos y la percepción en la apreciación y la aceptación de los materiales. Manzini (1986), Cornish (1987) y Ashby y Johnson (2002) introdujeron un enfoque diferente para considerar los materiales de diseño: el relacionado con la sensorialidad, la percepción, la emoción, la personalidad, los significados culturales y, en última instancia, la experiencia. En este sentido, se elaboró y definió una noción clave: la dimensión expresivo-sensorial (Rognoli, 2004, 2010), noción que considera la dimensión sensorial, cualitativa y subjetiva de los materiales, caracterizando la percepción, la interpretación y la afectividad suscitada por los artefactos. A través de las cualidades expresivo-sensoriales de los materiales, los diseñadores pueden

LITERATURE REVIEW: A FRAMEWORK FOR BIO-SYNERGISTIC MATERIALS AND THEIR SO- CIALY MEANINGFUL IMPLICATIONS

Before presenting the tentative definition and taxonomy of Bio-Synergistic materials, we will present the main notions and concepts this article is inspired and grounded on. We start with an overview of the shift towards sensoriality and experience, in materials for design. Then, the agency of materials to shape aesthetics, values, and behaviors is described and the concept of more-than-human is presented, leading to a novel transitional and interdependent perspective. Next, emerging materiality characterized by being hybrid, dynamic, and interactive is described. Finally, definitions of interactive and smart materials found in this field are reported, and the shift from electronic to bio-based interactive materials is presented.

Materials sensoriality and experience: from aesthetics to social values

Conventionally, materials have been observed by designers based on their ‘hard’ profile, i.e., their technical characteristics, complying with an engineering-derived and ‘Science-led’ approach (Ashby et al., 2007). In recent years, design scholars and practitioners have started to acknowledge the leverage of senses and perception in the scope of materials appreciation and acceptance. Manzini (1986), Cornish (1987), and Ashby and Johnson (2002) introduced a different angle to consider materials for design: the one related to sensoriality, perception, emotion, personality, cultural meanings, and, ultimately, experience. To this extent, a key notion was elaborated and defined: the expressive-sensorial dimension (Rognoli, 2004, 2010), a notion that considers the sensorial, qualitative, and subjective dimension of materials, characterizing artifact perception, interpretation, and affectivity. Through the expressive-sensorial qualities of materials, designers can enhance or transfer a set of emotional references to the arti-

potenciar o transferir un conjunto de referencias emocionales al artefacto, desencadenando una experiencia particular (Rognoli & Ayala García, 2018).

A medida que la materialidad impacta en la definición de “experiencia del producto” (Desmet & Hekkert, 2007), el concepto de “experiencia con los materiales” surge como «la experiencia que las personas tienen a través y con los materiales» (Karana et al., 2008; Karana, Pedgley, et al., 2015). La experiencia con los materiales se enmarca en capas interdependientes, a saber, capas de experiencia “sensorial”, “afectiva”, “interpretativa” y “performativa” (Giaccardi & Karana, 2015), definidas respectivamente como las maneras en que las personas perciben los materiales, cómo los materiales suscitan emociones, cómo los materiales evocan significados y conceptos abstractos, y cómo los materiales dan forma a modos de hacer, acciones físicas y prácticas. Al sintonizar conscientemente estas capas de experiencia, los diseñadores asumen un rol protagónico, contribuyendo a crear experiencias y estéticas significativas, a conocer la apreciación de las personas sobre materiales específicos y a mejorar los valores y los comportamientos en la sociedad (Bahrudin & Aurisicchio, 2018; Buetow & Wallis, 2019; Kagan, 2011).

Adoptar una perspectiva más que humana: transicional e interdependiente

El concepto de lo “más que humano” —o “post-humano”— quita al ser humano de la posición central, ofreciendo una perspectiva neutral y simbiótica. El análisis crítico de las distinciones normativas y estructurales y las desigualdades entre las categorías de lo humano y lo no humano es clave en el post-humanismo. Esto también lo señalan los teóricos de los sistemas vivos que trabajan en la intersección de la dimensión biológica, la dimensión social y la dimensión cognitiva (Braidotti, 2019; Capra y Luisi, 2014). Esta perspectiva neutral sobre la condición humana ofrece un espectro a través del cual podemos capturar la complejidad de los procesos en curso (Braidotti, 2019; Escobar, 2018). En este contexto, la creación de experiencias significativas requerirá alejarse de las dicotomías existentes y abrazar la complejidad de tales sistemas ecológicos.

fact, triggering a particular experience (Rognoli & Ayala García, 2018).

As materiality impacts in the definition of ‘product experience’ (Desmet & Hekkert, 2007), the concept of ‘materials experience’ arises as “the experience that people have through and with materials” (Karana et al., 2008; Karana, Pedgley, et al., 2015). Materials experience is framed into interdependent layers, namely ‘sensorial’, ‘affective’, ‘interpretive’, and ‘performative’ layers of experience (Giaccardi & Karana, 2015), respectively defined as how people sense materials, how materials elicit emotions, how materials evoke meanings and abstract concepts, and how materials shape ways of doing, physical actions, and practices.

By consciously tuning these layers of experience, designers have a powerful role in contributing to the creation of meaningful experiences and aesthetics, meeting people’s appreciation about specific materials, and enhancing values and behaviors in society (Bahrudin & Aurisicchio, 2018; Buetow & Wallis, 2019; Kagan, 2011).

Taking a more-than-human perspective: Transitional and Interdependent

The concept of more-than-human — or ‘post-human’ — removes the human being from the central position, offering a neutral and symbiotic perspective. The critical analysis of the normative structural distinctions and inequalities among categories of humans and non-humans is key in post-humanities. This is also noted by living system theorists who focus on the intersection of the biological dimension, the social dimension, and the cognitive dimension (Braidotti, 2019; Capra & Luisi, 2014). This neutral perspective on the human condition offers a spectrum through which we can capture the complexity of ongoing processes (Braidotti, 2019; Escobar, 2018). In this context, creating meaningful experiences will require getting away from existing dichotomies and embracing the complexity of such ecological

La dicotomía cultura/naturaleza es discutida por los eco-filósofos (Guattari, 2000; Ingold, 2000; Morton, 2010). Desde una perspectiva cultural, la sostenibilidad puede entenderse como la búsqueda de conjuntos alternativos de valores y conocimientos sobre el mundo. La introducción de nuevos materiales sostenibles a menudo espera ser “superior” a sus contrapartes insostenibles. Esta comparación se realiza en virtud de la estética, la función y el desempeño, es decir, de atributos que pueden denominarse “valores racionales capitalistas” (Bahrudin & Aurisicchio, 2018; Escobar, 2018). Escobar ha ahondado en el circuito capitalista de producción y consumo perfecto, en el que hoy se posiciona el diseño (2018). Él enfatiza el desafío que tienen los diseñadores para crear un nuevo sistema mientras trabajan al interior de uno antiguo. Aboga por diseñadores de transición que puedan trabajar con elementos dispares como el lugar, la agencia distribuida, el cambio de paradigma, la dinámica planetaria y una nueva mentalidad que acerque la producción y el consumo (Escobar, 2018). Este cambio de valores también se procura en el *Transition Design Framework* (TDF) definido por Escobar (2018). El TDF destaca la relación simbiótica entre los mundos social y natural. En un contexto similar, el concepto de “realismo agencial” va un paso más allá, tomando en cuenta el mundo como un todo en lugar de separar los ámbitos social y natural, enfatizando el entrelazamiento de ambos y las inagotables intra-acciones e interrelaciones (Barad, 2007). Esto está en línea con el argumento post-humano de ir más allá de la imagen universalista del hombre y el excepcionalismo humano, y con el giro materialista del nuevo materialismo. Los nuevos materialistas destacan incansablemente que la materia es “viva”, “animada”, “vibrante” y “dinámica”, tiene “agencia” y, por tanto, es “activa” (Braidotti, 2019; Gamble et al., 2019). A un nivel más general, esta interdependencia también ha sido destacada por la Teoría de Gaia (Lovelock, 2000) y la Teoría del Actor-Red (Latour, 2005).

Materiales híbridos, dinámicos e interactivos

La materialidad de los artefactos y el entorno cons-truido está cambiando hacia una dimensión novedo-

systems. The culture/nature dichotomy is well discussed by eco-philosophers (Guattari, 2000; Ingold, 2000; Morton, 2010). From a cultural perspective, sustainability can be understood as the search for alternative sets of values and knowledge of the world. The introduction of new sustainable materials often expects to be ‘superior’ to their unsustainable counterparts. This comparison is made based on aesthetics, function, and performance, that is, on attributes that can be referred to as capitalistic, rational values (Bahrudin & Aurisicchio, 2018; Escobar, 2018). Escobar has highlighted the capitalistic circuit of perfect production and consumption, in which design is positioned today (2018). He emphasizes the role of designers to create a new system while working within an old one. He advocates for transition designers who can work with disparate elements such as place, distributed agency, paradigm change, planetary dynamics, and a new mindset that brings production and consumption closer together (Escobar, 2018). This shift in values is also pointed out in the *Transition Design Framework* (TDF) defined by Escobar (2018). The TDF highlights the symbiotic relationship between the social and natural worlds. In a similar context, the concept of ‘agential realism’ goes a step further in taking into account the world as a whole, rather than separating social and natural realms, emphasizing on the entanglement of both and the inexhaustible intra-actions and interrelationships (Barad, 2007). This is in line with the post-human argument to go beyond the Universalist image of man and human exceptionalism, and the materialist turn of new materialism. New materialists routinely emphasize how matter is ‘alive’, ‘lively’, ‘vibrant’, ‘dynamic’, ‘agentic’, and thus ‘active’ (Braidotti, 2019; Gamble et al., 2019). At a more general level, such interdependency has also been sufficiently highlighted by Gaia Theory (Lovelock, 2000) and Actor-Network Theory (Latour, 2005).

sa, caracterizada por la hibridación, el dinamismo y la interactividad. Lo “híbrido” identifica entidades complejas formadas por componentes interdependientes de naturaleza diversificada, incluso contrastante: lo natural y lo sintético, lo físico y lo digital, lo analógico y lo computacional, lo inerte y lo vivo (Antonelli, 2008; Parisi et al., 2020). Lo “dinámico”, por su parte, refiere a todo tipo de materiales, incluso los tradicionales, ya que no se trata de entidades estáticas. Los atributos y características fluctúan con el tiempo, por ejemplo, los procesos de fabricación, la disponibilidad y el precio, pero también las asociaciones emocionales y de valor. El dinamismo también se relaciona con todos los cambios físicos que ocurren a lo largo del tiempo —por ejemplo, debido a la contaminación por el medio ambiente y el usuario—, alterando la estética y la percepción del material (Rognoli, 2015). El dinamismo puede capitalizarse con fines funcionales y estéticos mediante materiales inteligentes, es decir, materiales reactivos (Ritter, 2006), o integrados con microelectrónica. Finalmente, “inteligencia” se define como la capacidad de adaptarse a las circunstancias externas. De hecho, los materiales inteligentes responden a los estímulos externos cambiando reversiblemente sus cualidades. El concepto de *becoming materials* (Bergström et al., 2010) se centra en los materiales inteligentes como entidades transformables que tienen múltiples estados de expresión a lo largo del tiempo, que pueden ser controlados por los diseñadores para dar forma intencionalmente a las experiencias.

Por otro lado, los materiales son agentes transformadores, producen nuevas posibilidades, estimulan nuevos lenguajes de comunicación y desencadenan nuevas interacciones con el usuario, desempeñando un rol fundamental en la configuración del comportamiento y las prácticas sociales de las personas, promoviendo interacciones afectivas y emocionales y sugiriendo acciones, modos de hacer y prácticas (Giaccardi & Karana, 2015; Minuto et al., 2014). En este contexto, “interactivo” significa la capacidad de los materiales para establecer una relación mutua con otras entidades vivientes y no-vivientes (Saffer, 2009) mediante el intercambio de información a través de las cualidades y

Hybrid, Dynamic, and Interactive Materials

The materiality of artifacts and built environment is shifting towards a novel dimension: one characterized by hybridization, dynamism, and interactivity. ‘Hybrid’ identifies complex entities made up of interdependent components belonging to diversified, even contrasting, nature: the natural and the synthetic; the physical and the digital; the analog and the computational; the inert and the living (Antonelli, 2008; Parisi et al., 2020). ‘Dynamic’ refers to all types of materials – even the traditional ones – since they are not static entities. Attributes and characteristics fluctuate over time, for example, manufacturing processes, availability, price, but also emotional and value associations. Dynamism also relates to all the physical changes occurring over time – e.g., due to contamination by the environment and the user –, altering the material aesthetics and perception (Rognoli, 2015). Dynamism can be capitalized on for functional and aesthetic purposes by smart materials – i.e., reactive materials (Ritter, 2006) – or embedded with micro-electronics. ‘Smartness’ is defined as the capability to adapt to external circumstances. Smart materials indeed respond to external stimuli by reversibly changing their qualities. The concept of *becoming materials* (Bergström et al., 2010) focuses on smart materials as transformative entities having multiple states of expression over time that can be controlled by designers to intentionally shape experiences.

On the other hand, materials are transformational agents, producing new affordances, stimulating new communication languages, and triggering new interactions with the user, playing a fundamental role in shaping people’s social behavior and practices by promoting affective and emotional interactions and suggesting actions, ways of doing, and practices (Giaccardi & Karana, 2015; Minuto et al., 2014). In this context, ‘interactive’ stands for the ability of materials to establish a mutual relationship with other non-living and living entities (Saffer, 2009) by exchanging

los comportamientos de los materiales. El concepto de *information materials* (Kretzer, 2017)

quiere establecer una conciencia de una nueva materialidad que puede cambiar activamente sus propiedades a lo largo del tiempo, que puede ser producida y programada para mostrar un desempeño particular, y que emerge a través de múltiples disciplinas (...) atribuyendo valor a los procesos, la temporalidad y la transitoriedad (Kretzer, 2017, p. 15).

Editado por Skylar Tibbits, el libro *Active Matter* recopila ejemplos de materiales basados en diversos componentes interactivos, desde micro-robótica hasta bacterias sensibles a estímulos, definiendo «un campo emergente enfocado en materiales físicos que se pueden ensamblar por sí mismos, transformar de forma autónoma, y sentir, reaccionar o calcular en base a información interna y externa» (Tibbits, 2017, p. 11).

Computadoras electrónicas, biológicas e híbridas

Podemos ver las manifestaciones de esta materialidad híbrida, interactiva y dinámica en los materiales mejorados y aumentados (Razzaque et al., 2013) y en los materiales compuestos (Barati et al., 2019; Vallgård & Redström, 2007), basados en la integración de materiales inteligentes y electrónica en la fabricación del material, lo que arroja como resultado un sistema material con capacidades de detección, respuesta e interacción (Brownell, 2016). La definición inclusiva de *materiales interactivos, conectados e inteligentes* (materiales ICS, por sus siglas en inglés) (Parisi, Spallazzo, et al., 2018) abarca una amplia gama de materiales que establecen un intercambio mutuo de información con otras entidades. Los materiales ICS responden de manera simultánea y reversible a estímulos externos cambiando sus propiedades y cualidades, están vinculados a una fuente de energía externa o integrada, se comunican con una fuente de información y se pueden programar a través de cables, redes digitales y *software*, entre otros medios.

Al teorizar sobre ellos, los materiales ICS son considerados sistemas híbridos hechos de la combinación de bloques constructivos que les permiten lograr

information through the material qualities and behaviors. The concept of *information materials* (Kretzer, 2017),

wants to establish an awareness of a new materiality that can actively change its properties over time, that can be produced and programmed to display a particular performance, and that emerges across multiple disciplines (...) attributing value to processes, temporality, and transience. (Kretzer, 2017, p. 15)

The book *Active Matter*, edited by Skylar Tibbits, collects examples of materials based on diversity of interactive components, from micro-robotics to stimuli-responsive bacteria, defining “a newly emerging field focused on physical materials that can assemble themselves, transform autonomously, and sense, react or compute based on internal and external information” (Tibbits, 2017, p. 11).

Electronic, Biological, and Hybrid Computers

The manifestations of this hybrid, interactive, and dynamic materiality are seen in enhanced and augmented materials (Razzaque et al., 2013) and composites (Barati et al., 2019; Vallgård & Redström, 2007) based on the integration of smart materials and electronics in the fabrication of the material itself, resulting in a material system that has sensing, responding, and interacting capabilities (Brownell, 2016). The inclusive definition of *Interactive, Connected, and Smart materials* (ICS materials) (Parisi, Spallazzo, et al., 2018) encompasses a broad range of materials establishing a mutual exchange of information with other entities. ICS materials respond simultaneously and reversibly to external stimuli by changing their properties and qualities, they are linked to an external or integrated source of energy, and they communicate with a source of information and can be programmed through cables, digital networks, and software, among others.

diferentes grados de interacción. Estos grados pueden clasificarse en tres categorías:

1. *Materiales inactivos*: hechos solo de componentes inactivos, es decir, materiales convencionales y latentes para ser utilizados como sustrato o estructura. Pueden cambiar con el tiempo (por ej., envejecer) pero no poseen ninguna cualidad inteligente o interactiva.
2. *Materiales reactivos*: hechos de la combinación de componentes inactivos y reactivos, es decir, materiales inteligentes que responden a estímulos. Responden a los estímulos externos cambiando reversiblemente sus cualidades.
- 3: *Materiales proactivos*: hechos de una combinación de componentes inactivos y activos, es decir, tecnologías de detección, actuación y procesamiento, a menudo con la adición de componentes reactivos para aumentar las expresiones y las interacciones. No solo responden a los estímulos, sino que se adaptan constantemente en una relación de diálogo mutuo con el usuario y el entorno. Solo esta última categoría integra todos los atributos de los materiales ICS.

La definición de materiales bio-inteligentes (Ferrara et al., 2019; Lucibello et al., 2018) se basa en las respuestas biológicas y mecánicas a los estímulos que son capaces de dar los materiales de base natural como medio para comportamientos inteligentes. Los materiales bio-inteligentes se definen en función de cuatro principios: (1) sostenibilidad, (2) adaptabilidad, (3) capacidad de evolucionar para sobrevivir y (4) capacidad de desarrollo (autoorganizarse, vivir y crecer). Camere y Karana (2017) adoptan un enfoque más holístico que va más allá de los materiales destinados al bio-diseño, y toman en consideración un enfoque más conceptual y especulativo para diseñar con organismos vivos, identificando cuatro categorías: (1) diseño de crecimiento, (2) biología aumentada, (3) bio-fabricación digital y (4) ficción de bio-diseño. Los *growing materials* (Camere & Karana, 2017, 2018a; Karana et al., 2018) se enfocan en el control, por parte de los diseñadores, de la forma en que crecen los sistemas vivos. Los materiales comúnmente utilizados en esta categoría son los hongos, las

When theorizing about them, ICS materials are considered to be hybrid systems made from the combination of building blocks that allow them to achieve different degrees of interaction. These degrees can be classified into three categories:

1. *Inactive materials*: made only of inactive components, i.e., conventional and latent materials to be used as substrate or structure. They can change over time – e.g., aging – but they do not possess any smart or interactive quality.
2. *Reactive materials*: made of the combination of inactive and reactive components, i.e., stimuli-responsive smart materials. They respond to external stimuli by reversibly changing their qualities.
- 3: *Proactive materials*: made of the combination of inactive and active components, i.e., sensing, actuating, and computing technologies, often with the addition of reactive components to increase expressions and interactions. Not only do they respond to stimuli, but they constantly adapt in a mutual relationship and dialogue with the user and the environment. Only this last category integrates all the attributes of ICS materials.

The definition of Bio-smart materials (Ferrara et al., 2019; Lucibello et al., 2018) grounds on the biological and mechanical responses to stimuli of natural-based materials as a medium of smart behaviors. Bio-smart materials are defined based on four principles: (1) sustainability, (2) adaptability, (3) capacity to evolve to survive, and (4) ability to develop (self-organizing, living, and growing). Camere and Karana (2017) take a more holistic approach that goes beyond materials meant for bio-design, and take into consideration a more conceptual and speculative approach to designing with living organisms, identifying four categories: (1) growing design, (2) augmented biology, (3) digital bio-fabrication, and (4) bio-design fiction. Growing materials (Camere & Karana, 2017, 2018a; Karana et al., 2018) focus on designers controlling

algas y las bacterias. Aquí, los diseñadores asumen varios roles, como el de químico, ingeniero, científico de materiales, biólogo, artista y artesano. El “diseño de crecimiento” incorpora la agencia del organismo en la fase de crecimiento, que es precedida por el proceso de secado y modelado. A pesar de lidiar con materia viva e impredecible, la capacidad de programación es una característica clave del diseño de crecimiento, ya que permite a los diseñadores dirigir y controlar el crecimiento del material para obtener propiedades variables. La taxonomía de Camere y Karana está inspirada en la propuesta de Carole Collet (2013), quien identifica cinco categorías de prácticas de diseño de base biológica según su relación con la naturaleza: (1) la naturaleza como modelo, es decir, los diseñadores como “los plagiaristas”; (2) la naturaleza como colaboradora en el proceso de diseño, es decir, “los nuevos artesanos”; (3) la naturaleza como reprogramada y sintética, es decir, “los bio-hackers”; (4) la naturaleza como hibridación con tecnologías no vivientes, es decir, “los nuevos alquimistas”; (5) la naturaleza conceptualizada e imaginada en un futuro lejano y provocador, es decir “los agentes provocadores” (Camere & Karana, 2017).

El marco conceptual de los materiales ICS es totalmente inclusivo: prioriza los materiales de base electrónica, pero también está abierto a las cualidades interactivas de los materiales vivos y bio-basados. De hecho, en un futuro cercano, la integración o sustitución de componentes inteligentes tradicionales y electrónicos por componentes bio-basados es un escenario plausible, como ha sido demostrado por la experimentación y los prototipos desarrollados por diversos laboratorios, universidades y diseñadores de todo el mundo. Autoras como Camere y Karana (2017) han insinuado sinergias como “biología aumentada”. Estos incluyen bio-sensores y bio-actuadores, como bacterias, algas y microorganismos bioluminiscentes o cromogénicos, cultivados como fuentes para materiales, bloques constructivos o incluso productos completos a través del bio-diseño y la bio-fabricación. La hibridación de organismos vivos con productos electrónicos y materiales tradicionales conduce a definir una relación sinérgica entre partes pertenecientes a diferen-

the shape of how living systems grow. Commonly used materials in this category are fungi, algae, and bacteria. In this approach, designers take on several roles such as that of a chemist, engineer, material scientist, biologist, artist, and craftsman. Growing design incorporates the agency of the organism in the growing phase of the process, which is preceded by the drying and shaping process. Despite being alive and unpredictable, programmability is a key feature of growing design, enabling designers to steer and control the material growth in order to obtain variable material properties. Camere and Karana’s taxonomy is inspired by what Carole Collet (2013) proposed by identifying five categories of bio-based design practices according to their relation to nature: (1) Nature as a model, i.e., designers as “The Plagiarists”; (2) Nature as a co-worker in the design process, i.e., “The New Artisans”; (3) Nature as reprogrammed and synthetic, i.e., “The BioHackers”; (4) Nature as hybridized with non-living technologies, i.e., “The New Alchemists”; (5) Nature as conceptualized and imagined in a provocative far future, i.e., “The Agents Provocateur” (Camere & Karana, 2017).

The framework of ICS materials is totally inclusive, prioritizing electronic-based materials, but also open to the interactive qualities of bio-based and living materials. Indeed, in the near future, integrating or substituting electronic and traditional smart components with bio-based ones is a plausible scenario, as experimentation and prototypes developed by labs, universities, and designers all around the world have demonstrated. Authors such as Camere and Karana (2017) have hinted on such synergies as ‘Augmented biology’. These include bio-sensors and bio-actuators, such as bio-luminescent or chromogenic bacteria, algae, and microorganisms, grown as sources for materials, building blocks, or even entire products through bio-design and bio-fabrication. The hybridization of living organisms with electronics and traditional materials leads to the definition of a synergistic relationship between

tes dominios. Nos referimos a estos materiales como *materiales bio-sinérgicos*, en los que los organismos vivos actúan como una computadora biológica y contribuyen a detectar, procesar y comunicar información en estrecha colaboración con la electrónica.

MATERIALES BIO-SINÉRGICOS: DEFINICIÓN

TENTATIVA Y TAXONOMÍA

Definimos tentativamente los materiales bio-sinérgicos como aquellos que adoptan un enfoque sistémico de los materiales interactivos y requieren el funcionamiento colectivo y el trabajo conjunto del usuario, la tecnología y el organismo. Mientras la interacción se refiere al efecto resultante de dos o más entidades que actúan entre sí, la sinergia alude al comportamiento colectivo de un sistema que no se puede predecir en función del comportamiento de entidades individuales.

Esta sección presenta algunos conceptos y ejemplos de materiales bio-sinérgicos, desarrollados en la intersección de la fabricación de materiales, la biología sintética y la computación. Los ejemplos han sido seleccionados de acuerdo con los siguientes criterios: (1) haber sido materializados en la forma de un producto o prototipo; (2) haber sido desarrollados por diseñadores, universidades o laboratorios; y (3) combinar electrónica y biología. Los ejemplos elegidos son paradigmáticos en función de las categorías definidas en la taxonomía. La revisión de los ejemplos ayudó a definir y refinar la taxonomía, lo que significa que existe reciprocidad entre ella y los ejemplos. Se categorizan y discuten para identificar patrones experienciales recurrentes y significativos que desencadenen emociones, sentimientos, afectos y significados cuando el usuario interactúa con ellos. Para la categorización, nos inspiramos en categorías existentes identificadas por nosotros y en trabajos previos de otros investigadores, como se menciona en el estado del arte: materiales ICS (Parisi, Spallazzo, et al., 2018), materiales bio-inteligentes (Lucibello et al., 2018) y las categorías de Camere y Karana (2017) y Collet (2013). Relacionamos estos diferentes marcos conceptuales y los integramos en una categorización única para materiales bio-sinérgicos, de la siguiente manera (Tabla 1):

parts belonging to different domains. We refer to such materials as *Bio-Synergistic materials*, where living organisms perform as a biological computer and contribute to sensing, processing, and communicating information in close collaboration with electronics.

BIO-SYNERGISTIC MATERIALS: TENTATIVE

DEFINITION AND TAXONOMY

We tentatively define Bio-Synergistic materials as those that take a systemic approach to interactive materials and require the collective functioning and joint work of the user, technology, and the organism. While interaction refers to the effect resulting from two or more entities acting upon one another, synergy refers to the collective behavior of a system that cannot be predicted based on the behavior of individual entities.

This section presents some examples and concepts of Bio-Synergistic materials, developed in the intersection of materials making, synthetic biology, and computing. The examples have been selected according to the following criteria: (1) being materialized in the form of a product or prototype; (2) been developed by designers, universities, or labs; and (3) combining electronics and biology. The chosen examples are paradigmatic based on the defined categories of the taxonomy. The review of the examples helped to define and refine the taxonomy, meaning that there is reciprocity between it and the examples. They are categorized and discussed in order to identify recurrent and significant experiential patterns constituting emotions, feeling, affections, and meanings elicited when the user interacts with them. For the categorization, we were inspired by existing categories identified by us and previous works by other scholars, as mentioned in the state of the art: ICS materials (Parisi, Spallazzo, et al., 2018), Bio-smart materials (Lucibello et al., 2018) and the ones by Camere and Karana (2017) and Collet (2013). We related these different frameworks and integrated them in a unique categorization for

1. Materiales bio-sinérgicos proactivos: materiales proactivos, en evolución y en desarrollo, donde la naturaleza a menudo se conceptualiza e imagina en un futuro lejano y provocador como ficciones de bio-diseño.
2. Materiales bio-sinérgicos reactivos: materiales reactivos y adaptables, donde la naturaleza se reprograma como biología aumentada.
3. La sinergia de los materiales bio-basados como soportes para la electrónica: materiales inactivos y sostenibles, donde la naturaleza es colaboradora en el proceso de diseño mediante el diseño de crecimiento o la bio-fabricación digital.

Bio-Synergistic materials, as follows (Table 1):

1. Bio-Synergistic Proactive Materials: proactive, evolving, and developing materials, where nature is often conceptualized and imagined in a provocative far future as bio-design fictions.
2. Bio-Synergistic Reactive Materials: reactive and adaptable materials, where nature is reprogrammed as augmented biology.
3. The Synergy of Bio-based Materials as Supports for Electronics: inactive and sustainable materials, where nature is a co-worker in the design process by growing design or digital bio-fabrication.

TAXONOMÍA DE MATERIALES BIO-SINÉRGICOS	PARISI, ROGNOLI, ET AL., 2018	LUCIBELLO ET AL., 2018	CAMERE Y KARANA, 2017	COLLET, 2013	EJEMPLOS SELECCIONADOS
Materiales Bio-sinérgicos Proactivos	Proactivos	En evolución y en desarrollo	Ficción de Bio-diseño	Los Agentes Provocadores y los Nuevos Alquimistas	Tranceflora, de Sputniko; Silk Leaf, de Julian Melchiorri
Materiales Bio-sinérgicos Reactivos	Reactivos	Adaptables	Biología aumentada	Los Bio-Hackers	Self-healing Concrete, de Hendrik Jonkers; Proyecto AeR, de Shonali Shetty; Biogarmentry; Post-Carbon Lab; BioLogic, de MIT Media Lab; Organic Primitives, de MIT Mediated Matter Lab; Programmable Knitting, de Jane Scott; Transformative Paper, de Florian Hundt
Materiales Bio-basados como Soportes para la Electrónica	Inactivos	Sustentables	Fabricación Digital y Diseño de Crecimiento	Los Nuevos Artesanos y Los Plagiarios	Pulp-based Computing, de Marcelo Coelho, et al.; Bio DIY Electronics, de Eldy Lázaro y Katia Vega; Conductive Bio Skin, de Giulia Tomasello; Transient Electronics

Tabla 1: Taxonomía tentativa de materiales bio-sinérgicos en relación con otras taxonomías.

BIO-SYNERGISTIC MATERIALS TAXONOMY	PARISI, ROGNOLI, ET AL. 2018	LUCIBELLO ET AL., 2018	CAMERE AND KARANA, 2017	COLLET 2013	SELECTED EXAMPLES
Bio-Synergistic Proactive Materials	Proactive	Evolving and Developing	Bio-design Fiction	The Agents Provocateur and The New Alchemists	Tranceflora by Sputniko; Silk Leaf by Julian Melchiorri
Bio-Synergistic Reactive Materials	Reactive	Adaptable	Augmented biology	The BioHackers	Self-healing Concrete by Hendrik Jonkers; Project AeR by Shonali Shetty; Biogarmentry; Post-Carbon Lab; BioLogic by MIT Media Lab; Organic Primitives by MIT Mediated Matter Lab; Programmable Knitting by Jane Scott; Transformative Paper by Florian Hundt
Bio-based Materials as Supports for Electronics	Inactive	Sustainable	Digital Fabrication and Growing Design	The New Artisans and The Plagiarists	Pulp-based Computing by Marcelo Coelho, et al.; Bio DIY Electronics by Eldy Lázaro and Katia Vega; Conductive Bio Skin by Giulia Tomasello; Transient Electronics

Table 1: The tentative taxonomy of Bio-Synergistic materials in relation to other taxonomies.

Si bien la última categoría es menos significativa en términos de la dinámica estética desplegada por la interacción, las dos categorías de interés en este artículo son los materiales bio-sinérgicos proactivos (es decir, la combinación de organismos vivos y electrónica) y los materiales bio-sinérgicos reactivos (esto es, el uso de bio-materiales como sensores y actuadores). En ambas categorías analizamos ejemplos que incluyen la fabricación, el cultivo, el aumento y la especulación con materiales bio-sinérgicos. Al enmarcar los materiales bio-sinérgicos, también tenemos en cuenta la perspectiva más que humana, aprovechando la interdependencia de los materiales ICS y extendiéndola a los sistemas vivos que son parte integral de los materiales de diseño biológico. Adoptar el enfoque material del post-humanismo significa incluir las dimensiones

While the latter category is less significant in terms of dynamic aesthetic unfolded by interaction, the two categories of interest in the article are Bio-Synergistic proactive materials, i.e. combining living organisms and electronics; and Bio-Synergistic reactive materials, i.e. using the bio-based materials as sensors and actuators. In both categories, we analyze examples that include the fabrication, growing, augmentation, and speculation of Bio-Synergistic materials. In framing Bio-Synergistic materials, we also take into account the more-than-human perspective, leveraging on the interdependency of ICS materials and extending it to living systems that are integral to bio-design materials. Taking a materialist approach to post-humanism means including

ambientales, socioeconómicas, afectivas y psíquicas de nuestras ecologías de pertenencia (Braidotti, 2019). Ciertamente, los materiales bio-sinérgicos proactivos y reactivos tienen un requisito de tales cualidades, derivadas de la temporalidad y la agencia de los componentes biológicos, y se prestan naturalmente para una perspectiva de diseño más que humano, es decir, interdependiente y transicional.

Materiales bio-sinérgicos proactivos

La definición de materiales bio-inteligentes tiende a desdibujar el límite entre lo biológico y lo sintético y artificial. La inclusión de la ingeniería de tejidos y la ingeniería genética en el diseño de materiales bio-inteligentes hibrida lo natural y lo artificial, lo que requiere diferentes interacciones de usuario (Lucibello et al., 2018). En el proyecto Tranceflora se puede observar un ejemplo de tal sinergia híbrida. Los huevos de gusanos de seda se inyectan con ADN de coral para crear una seda brillante. El usuario debe ponerse gafas para ver realzado el color de Tranceflora. Un tipo de interacción con el usuario muy diferente a la ofrecida por los materiales convencionales. La diseñadora Sputniko describe su trabajo a través de un personaje ficticio llamado Amy, que está peligrosamente enamorada y quiere un vestido que controle los deseos más profundos de su amante, dando al diseño un nivel completamente nuevo de emociones y significados. Otro ejemplo de estos materiales híbridos bio-sinérgicos es “Silk Leaf”, del diseñador Julian Melchiorri (Figura 1), en la que se inyectan proteínas de seda con cloroplastos extraídos de plantas. Esto da como resultado un material fotosintético llamado “Hoja de seda”, que reacciona a su entorno natural intercambiando oxígeno y dióxido de carbono. En este caso, el usuario debe asegurar que el organismo cuente con luz y humedad para que sobreviva realizando el intercambio de gases. Este tipo de interacción interdependiente con los materiales bio-sinérgicos conduce a una relación completamente nueva de significado emocional entre el usuario y el material.

the environmental, socio-economic, affective, and psychic dimensions of our ecologies of belonging (Braidotti, 2019). It is safe to say that proactive and reactive Bio-Synergistic materials have a requirement of such qualities, derived from the temporality and agency of the biological components and lends themselves naturally towards a more-than-human – i.e. interdependent and transitional – perspective of design.

Bio-Synergistic Proactive Materials

The definition of Bio-smart materials tends to blur the boundary between what is biological and what is synthetic and artificial. The inclusion of tissue engineering and genetic engineering in the design of Bio-smart materials leads to the hybrid of the natural and artificial, which requires different user interactions (Lucibello et al., 2018). An example of such hybrid synergy can be observed in the project Tranceflora. Silkworm eggs are injected with coral DNA to create glowing silk. The user needs to put on a pair of glasses, in order to enhance the color of Tranceflora. A kind of user interaction that is very different from conventional materials. Designer Sputniko describes her work through a fictional character named Amy, who is dangerously in love and wants a dress that will control the deepest desires of her lover, giving the design a whole new level of emotions and meaning. Another example of such hybrid Bio-Synergistic materials is the ‘Silk Leaf’ by designer Julian Melchiorri (Figure 1), in which silk proteins are injected with chloroplasts taken from plants. This results in a photosynthetic material called Silk Leaf, which reacts to its natural environment in exchange for oxygen and carbon dioxide. In this case, the user needs to ensure light and moisture for the organism to survive and exchange gases. This type of interdependent interaction in Bio-Synergistic materials leads to a whole new level of emotional meaning between the user and the material.

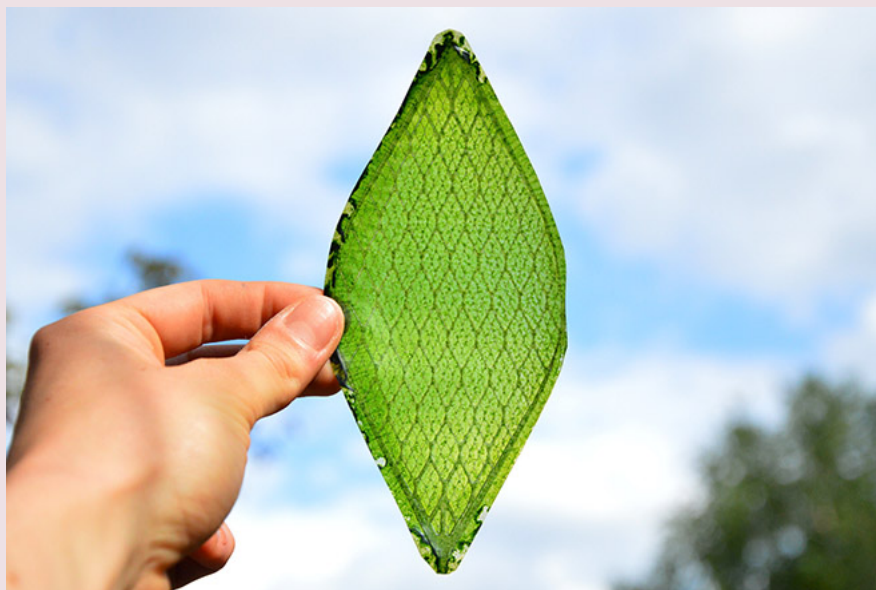


Figura 1: "Silk Leaf", del diseñador Julian Melchiorri (Melchiorri, 2014).
Fuente: <https://www.flickr.com/photos/arselectronica/19863531773>

Figure 1: "Silk Leaf" by designer Julian Melchiorri (Melchiorri, 2014).
Source: <https://www.flickr.com/photos/arselectronica/19863531773>

Materiales bio-sinérgicos reactivos

Los materiales bio-inteligentes que son reactivos a estímulos externos utilizan circuitos de retroalimentación para comunicarse (Lucibello et al., 2018; Parisi, Spallazzo, et al., 2018). En este sentido, los organismos biológicos también pueden ser utilizados como bio-sensores y bio-actuadores para sustituir a los sintéticos. Los materiales con capacidad de repararse a sí mismos, como el hormigón autorreparable desarrollado por el científico Jenk Honkers (Figura 2), entran en esta categoría. Las bacterias alcalófilas son bacterias que precipitan la calcita y pueden sobrevivir al alto nivel de pH del hormigón. Cuando se mezclan con hormigón, sus propiedades de auto reparación se derivan por precipitación. Las bacterias tienen el potencial de reparar grietas a medida que crecen y se mantienen vivas en el hormigón. Los materiales de esta categoría son resilientes y capaces de construir relaciones de colaboración para crecer en determinadas condiciones. El proyecto especulativo AeR (Figura 3), de la diseñadora Shonali Shetty (2018), entra en esta categoría. Al utilizar un organismo fotosintético, como las algas y los líquenes, se establece una relación de colaboración con el hidrogel a través de un proceso de bio-impresión, que incrusta al organismo dentro de andamiajes predeterminados, es decir, formas y estruc-

Bio-Synergistic Reactive Materials

Bio-smart materials that are reactive to external stimuli use feedback loops to communicate (Lucibello et al., 2018; Parisi, Spallazzo, et al., 2018). In this respect, biological organisms can also be used as biosensors and bio-actuators in order to replace synthetic ones. Self-healing materials such as self-healing concrete (Figure 2), developed by scientist Jenk Honkers, come under this category. Alkaliphilic bacteria are calcite-precipitating bacteria and can survive the high pH level of concrete. When mixed with concrete, its self-healing properties by precipitation are derived. The bacteria have the potential to conceal cracks, as they grow and stay alive in the concrete. Materials in this category are resilient and capable of building collaborative relations in order to grow under certain conditions. The speculative project Aer (Figure 3) by designer Shonali Shetty (2018) comes under this category. By using a photosynthetic organism like algae and lichens, a collaborative relationship with hydrogel is established through the process of bioprinting, which embeds the organism within predetermined scaffolds – i.e. shapes and structures – enabling the organism to take shape

turas, lo que permite que el organismo tome forma durante su ciclo de vida. Este proyecto fue expuesto a los usuarios a través de un sitio *web* que les permite seleccionar patrones de andamiajes y organismos como paneles modulares de pared. Dicha interacción involucró al usuario en el proceso de producción y crecimiento, estableciendo una nueva dimensión en la conexión emocional con el material. Al igual que la seda brillante, la fluorescencia es una forma de comunicar la vitalidad de la experiencia con los materiales. Ejemplos similares son los de Biogarmentry (v) y Post-Carbon Lab (<http://www.postcarbonlab.com/>).

during its lifecycle. This project was exposed to users through a website that allows them to select pattern scaffolds and organisms as modular wall panels. Such interaction involved the user in the production and growing process, establishing a new dimension of emotional connection to the material. Just like the glowing silk, light-emitting fluorescence is a way to communicate the aliveness of the materials' experience. Similar examples are the ones by Biogarmentry (<http://www.royaaghghi.com/biogarmentry.html>) and Post-Carbon Lab (<http://www.postcarbonlab.com/>).

Figura 2: Hormigón autorreparable desarrollado por Hendrik Jonkers. © ucl, Institute of Making/Robert Eagle. Fuente: <https://www.flickr.com/photos/uclnews/8518049675>

Figure 2: Self-healing concrete by Hendrik Jonkers. © ucl, Institute of Making/Robert Eagle. Source: <https://www.flickr.com/photos/uclnews/8518049675>

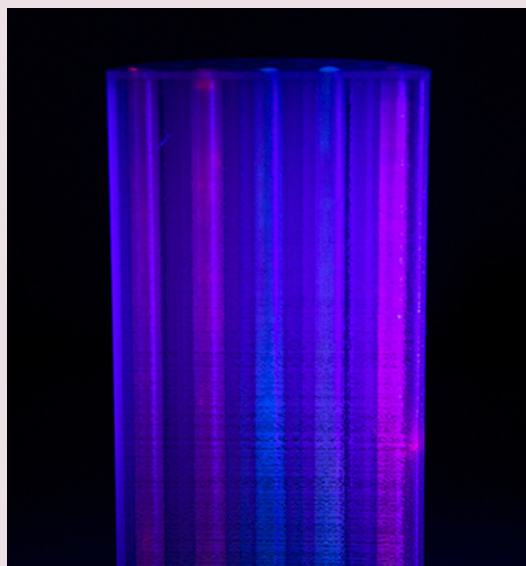
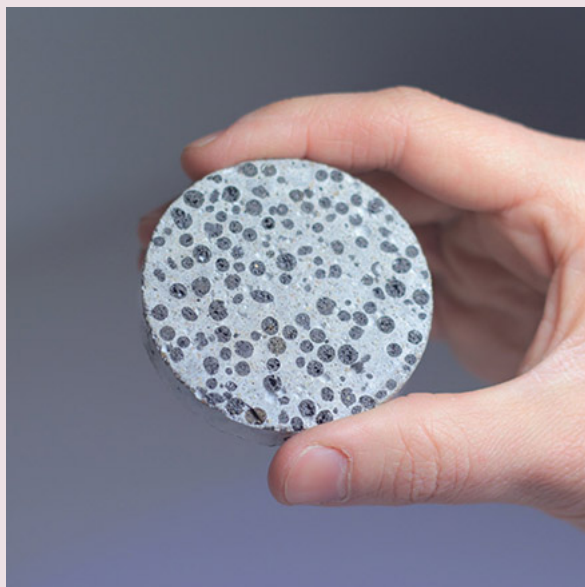


Figura 3: Proyecto AeR, de Shonali Shetty (Shetty, 2018). Fotografía: Marco Mega.

Figure 3: Project AeR by Shonali Shetty (Shetty, 2018). Photograph: Marco Mega.



Figura 4: Biologic, de MIT Media Lab, Lining Yao, 2015. Fotografía: Rob Chron. Cortesía de Lining Yao. Fuente: <https://tangible.media.mit.edu/project/biologic/>

Figure 4: Biologic by MIT Media Lab, Lining Yao, 2015. Photograph: Rob Chron. Courtesy of Lining Yao. Source: <https://tangible.media.mit.edu/project/biologic/>

BioLogic (Figura 4) es un tejido que responde a la humedad utilizando el comportamiento mecánico de las masas de las bacterias natto, depositadas en porciones del tejido. El cuerpo de la bacteria se agranda con la humedad, permitiendo que el tejido cambie de forma (Yao et al., 2015). “Organic Primitives” (Figura 5), por su parte, es un material orgánico reactivo al pH que se utiliza para la detección, la actuación y la interacción (Kan et al., 2017). Como afirma Ritter (2006), se pueden encontrar comportamientos receptivos en materiales orgánicos naturales, de modo que no son una invención actual. Algunos ejemplos son las superficies y fibras a base de pulpa orgánica que reaccionan a la humedad, como “Programmable Knitting” (Figura 6) (Scott, 2012, 2018) y “Transformative Paper” (Figura 7) (Holzbach & Kellner, 2014).

BioLogic (Figure 4) is a textile that uses the mechanical behavior of Natto bacteria masses, deposited on portions of textile, to respond to moisture. The bacteria’s body enlarges with humidity enabling the textile to change shape (Yao et al., 2015). Organic Primitives (Figure 5) is a pH-reactive organic material used for sensing, actuation, and interaction (Kan et al., 2017). As Ritter (2006) affirms, responsive behaviors can be found in nature in organic materials and are not an invention of modern times. Examples are organic pulp-based surfaces and fibers reacting to moisture – i.e. Programmable Knitting (Figure 6) (Scott, 2012, 2018) and Transformative Paper (Figure 7) (Holzbach & Kellner, 2014).

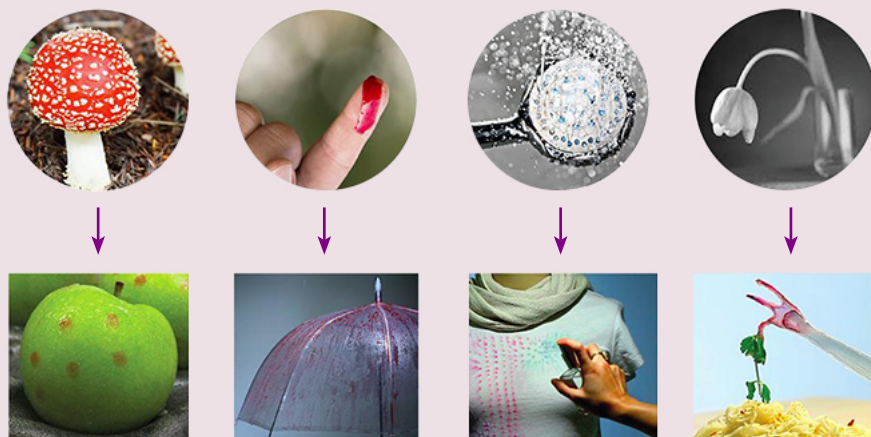


Figura 5: Organic Primitives, de MIT Mediated Matter Lab/ Primitives, Viirj Kan, 2017. Cortesía de Viirj Kan (www.primitives.io). Fuente: <http://www.media.mit.edu/projects/organic-primitives/overview/>

Figure 5: Organic Primitives by MIT Mediated Matter Lab / Primitives, Viirj Kan, 2017. Courtesy of Viirj Kan (www.primitives.io). Source: <http://www.media.mit.edu/projects/organic-primitives/overview/>



Figura 6: "Programmable Knitting" (perfil del medio de cultivo), de Jane Scott, 2018. Cortesía de Jane Scott. Fuente: <http://responsiveknit.com/>

Figure 6: Programmable Knitting (growing medium profile) by Jane Scott, 2018. Courtesy of Jane Scott. Source: <http://responsiveknit.com/>

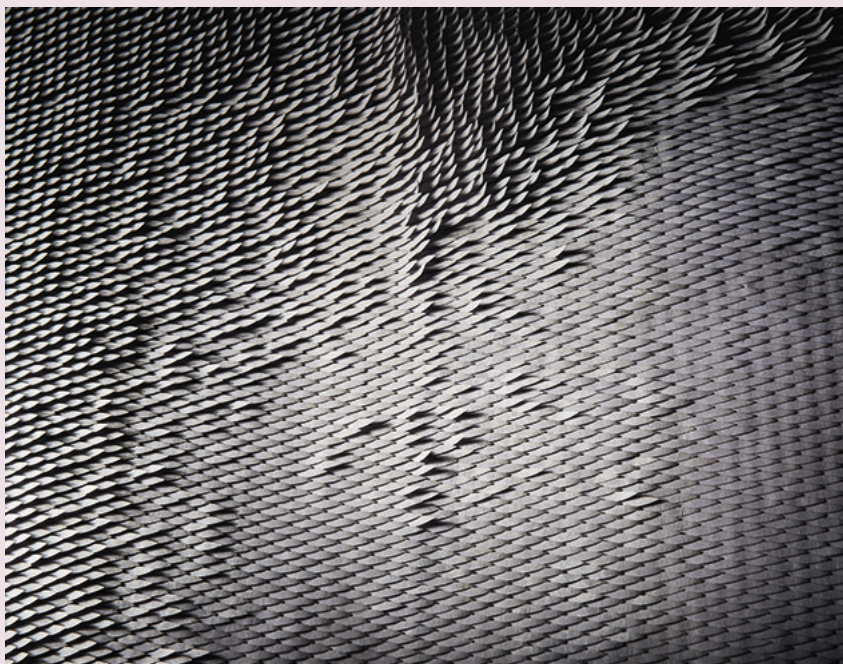


Figura 7: "Transformative Paper", de Florian Hundt, resultado de la cooperación "Intuitive Brain" entre el Prof. Dr.-Ing. Markus Holzbach (Institute for Material Design IMD, HfG Offenbach) y BMW AG, 2015. Cortesía de Markus Holzbach. Fuente: <http://materialdistrict.com/article/transformative-paper-by-florian-hundt/>

Figure 7: Transformative Paper by Florian Hundt, a result of the cooperation 'Intuitive Brain' between Prof. Dr.-Ing. Markus Holzbach (Institute for Material Design IMD, HfG Offenbach) and BMW AG, 2015. Courtesy of Markus Holzbach. Source: <http://materialdistrict.com/article/transformative-paper-by-florian-hundt/>

Materiales bio-basados como soportes para la electrónica

Esta es una categoría menos significativa en términos de materiales bio-basados como medio de interacción y experiencias dinámicas. Aquí, los bio-materiales no se utilizan por sus cualidades dinámicas, sino como soporte inactivo, carcasa o estructura para tecnologías interactivas y materiales funcionales. Con el uso de materiales no tóxicos, renovables y biodegradables, los ejemplos de esta categoría abordan el desafío de los materiales interactivos sostenibles. La integración de tecnologías interactivas con materiales y fibras biodegradables puede permitir la separación de componentes, como en la computación basada en pulpa de Coelho et al. (2009), en los objetos interactivos a base de micelio de Eldy Lázaro y Katia Vega (2019) (Figura 8) y en la electrónica transitoria, por ejemplo, los dispositivos electrónicos biodegradables y las placas de circuitos solubles fabricados con proteínas de seda (Tao et al., 2012). Otro ejemplo de experimentación es la bio-piel conductora hecha a partir del cultivo de celulosa bacteriana con compuestos de material conductor, creada por la diseñadora Giulia Tomasello (Figura 9).

Bio-based Materials as Supports for Electronics

This is a less significant category in terms of bio-based materials as a medium of interaction and dynamic experiences. Here, biomaterials are not used because of their dynamic qualities, but as inactive support, case, or structure for interactive technologies and functional materials. With the use of non-toxic, renewable, and biodegradable materials, the examples in this category approach the challenge of sustainable interactive materials. The integration of interactive technologies with biodegradable materials and fibers may enable the separation of components, as in the pulp-based computing by Coelho et al. (2009), in the mycelium-based interactive objects by Eldy Lázaro and Katia Vega (2019) (Figure 8) and in transient electronics, e.g., biodegradable electronic devices and dissolvable circuit boards made of silk proteins (Tao et al., 2012). Another example of experimentation is a conductive bio-skin made by growing bacterial cellulose with conductive material compounds created by designer Giulia Tomasello (Figure 9).

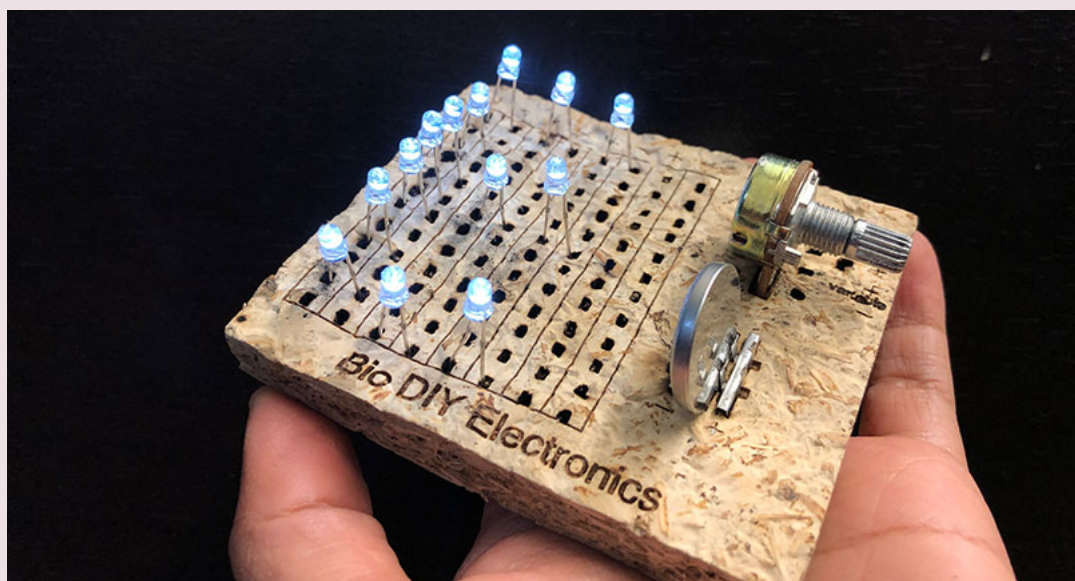


Figura 8: Bio-electrónica DIY basada en micelio, de Eldy Lázaro Vásquez y Katia Vega, 2019. Cortesía de Eldy Lázaro Vásquez. Fuente: <http://www.eldylazaro.com/>

Figure 8: Mycelium-based Bio DIY Electronics by Eldy Lázaro Vásquez and Katia Vega, 2019. Courtesy of Eldy Lázaro Vásquez. Source: <http://www.eldylazaro.com/>

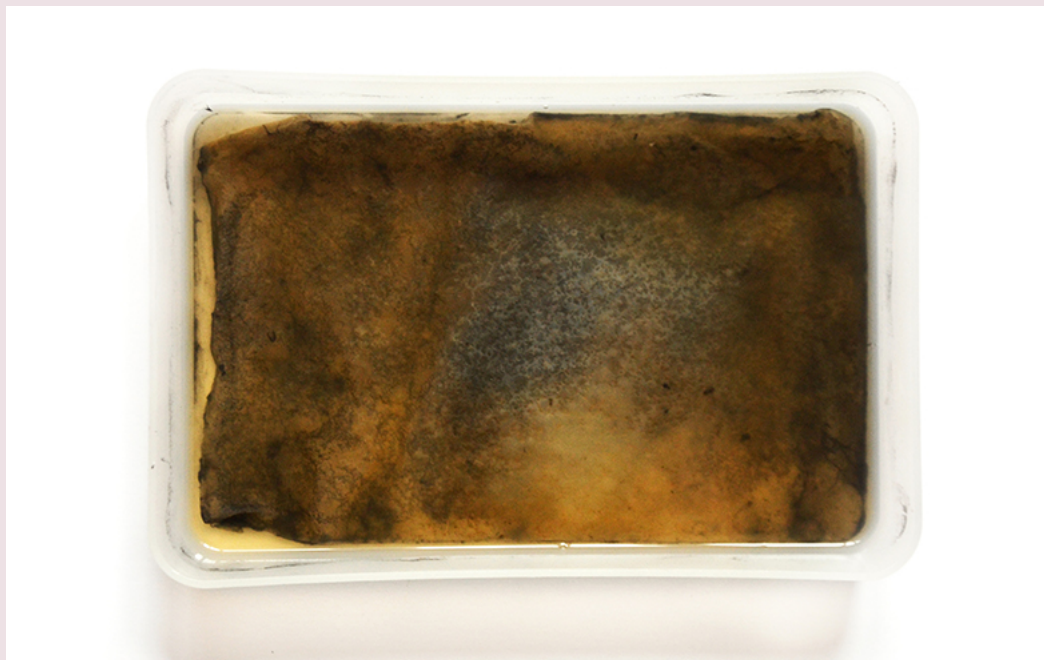


Figura 9: Bio-piel conductiva basada en scoby, de Giulia Tomasello, proyecto en curso. Cortesía de Giulia Tomasello. Fuente: <http://gitomasello.com/>

Figure 9: scoby-based Conductive Bio Skin by Giulia Tomasello, ongoing project. Courtesy of Giulia Tomasello. Source: <http://gitomasello.com/>

DISCUSIÓN

Al utilizar las categorías y los ejemplos de materiales bio-sinérgicos, en tanto materiales dinámicos con un alto potencial para desencadenar emociones y sentimientos, discutimos las principales estéticas y experiencias que tales materiales permiten y conllevan, apuntando hacia el cambio de valores y comportamientos sociales.

Los hallazgos están respaldados por los resultados de estudios previos que llevamos a cabo individualmente en nuestra práctica y en actividades de investigación, como estudios de usuarios, *workshops* con estudiantes de diseño, manipulación directa y autoobservación (Parisi et al., 2020, 2019; Parisi, Rognoli, et al., 2018; Parisi & Rognoli, 2016, 2017; Shetty, 2018). En Parisi y Rognoli (2017) se presentan los principales problemas relacionados con el manejo de materiales vivos y en crecimiento, también desde una perspectiva experiencial, mediante la presentación de un estudio de caso del autor sobre experimentación y cacharreo

DISCUSSION

By using the categories and examples of Bio-Synergistic materials as dynamic materials with a high emotional potential to trigger emotions and feelings, we discuss the main aesthetics and experience that such materials enable and entail, towards changing societal values and behaviors.

The findings are supported by results from prior studies we individually carried out in our practice and research activities, such as user studies, workshops with design students, direct manipulation, and self-observation (Parisi et al., 2020, 2019; Parisi, Rognoli, et al., 2018; Parisi & Rognoli, 2016, 2017; Shetty, 2018). In Parisi and Rognoli (2017) the main issues of dealing with growing and living materials are presented, also from an experiential perspective, by the presentation of an author case study of tinkering and experimentation with mycelium-based materials. In the observations, the agency, dynamism, and

(*tinkering*) con materiales basados en micelio. En las observaciones se enfatiza la agencia, el dinamismo y la espontaneidad de la materia viva: el diseñador debe abandonar las formas convencionales de tratar la materia y adoptar nuevos comportamientos caracterizados por ceder el control a la vitalidad de los materiales, abrirse a lo inesperado y a la interdependencia, y respetar un marco temporal nuevo y más lento para que el recurso se convierta en objeto. Parisi, Holzbach y Rognoli (2020) propusieron una definición del diseño de materiales como una práctica híbrida, presentando experimentos de materiales desarrollados por los autores y sus alumnos como estudios de caso para respaldar la proposición. Estas exploraciones materiales se centraron en aumentar las propiedades de los materiales tradicionales con componentes interactivos y demostraron el potencial de la hibridación para llevar la imaginación a nuevos horizontes para interfaces efímeras y abiertas. En Parisi et al. (2019) se presentó la aplicación de una metodología tentativa y se analizaron las herramientas de apoyo para que los estudiantes de diseño conceptualicen y contextualicen sistemas de materiales interactivos e híbridos basados en la electrónica. La metodología integró el diseño de la experiencia habilitada e implicada por dichos materiales como elemento clave en el proceso de diseño. El disfrute multisensorial, la materialización de datos ocultos y el sentimiento de sorpresa surgieron como los patrones experienciales más relevantes que los estudiantes pretendían manifestar en sus conceptos de diseño.

Parisi, Rognoli et al. (2018) presentan un análisis por autoobservación de los mejores ejemplos de materiales interactivos de diferente naturaleza, utilizando como modelo las capas de experiencia con los materiales. Dos de los ejemplos observados se mencionan en este artículo como modelos de material bio-sinérgico, a saber, Transformative Paper y BioLogic. En todos estos ejemplos, las contradicciones experienciales y las provocaciones relacionadas con el contraste entre los comportamientos dinámicos y las cualidades materiales se presentan como uno de los principales resultados. Un estudio adicional involucra el prototipo físico de uno de los ejemplos descritos en el artículo

spontaneity of the living material are emphasized: the designer needs to abandon conventional ways of dealing with matter and adopt new behaviors characterized by ceding control to materials vitality, opening to the unexpected and interdependence, and respecting a novel and slower timeframe for the resource to become an object. Parisi, Holzbach, and Rognoli (2020) proposed a definition of material design as a hybrid practice, presenting materials experimentations developed by the authors and their students as case studies to support the assumption. Such materials explorations were focused on augmenting the properties of traditional materials with interactive components and demonstrated the potential of hybridization in pushing the imagination to new horizons for open-ended and ephemeral interfaces. Parisi et al. (2019) presented the application of a tentative methodology and supporting tools for design students to conceptualize and contextualize interactive and hybrid material systems based on electronics. The methodology integrated the design of the experience enabled and entailed by such materials, as a key element in the design process. Multi-sensory enjoyment, a materialization of hidden data, and the feeling of surprise emerged as the most relevant experiential patterns students aimed to manifest in their concepts.

Parisi, Rognoli, et al. (2018) present the analysis by self-observation of best examples of interactive materials of different nature, using the layers of materials experience as a model. Two of the observed examples are mentioned in this article as examples of Bio-Synergetic material, namely Transformative Paper and BioLogic. The experiential contradictions and provocations related to the contrast between the dynamic behaviors and the material qualities of the examples are presented as one of the main results. A further study involves the physical prototype of one of the examples described in the article, i.e. Transformative Paper. User studies on this novel typology of material interface carried out by the author, arose

(Transformative Paper). En los estudios de usuario llevados a cabo por el autor sobre esta novedosa tipología de interfaz material surgieron cuestiones críticas relacionadas con la percepción y valoración de los usuarios. El estudio utiliza la perspectiva de la experiencia con los materiales para superar la falta de comprensión de las experiencias habilitadas e implicadas por esta interfaz. Los hallazgos más destacados revelan la relación entre expresiones temporales y estáticas. Los participantes en el estudio definieron los comportamientos y la experiencia relacionada como “viva”, “provocativa” y “sorprendente”. Finalmente, la biomímesis y el uso de materiales bio-basados surgen como una estrategia para crear una interacción más intuitiva y más “cálida”. En un estudio de caso similar en torno al proyecto AeR (Shetty, 2018), los consumidores fueron expuestos al concepto de auto crecimiento del material en andamiajes prediseñados. Se observaron nociones de interdependencia y un gran interés por una participación más activa de parte del consumidor con el mundo material vivo.

Surgen tres atributos principales que caracterizan a estos materiales desde la perspectiva estética: (1) vivo, (2) provocador y (3) sorprendente.

Vivo

“Estar vivo” provoca emociones activas y personales en el usuario. Mantenerse vivo es un proceso activo y, por lo tanto, el rol del usuario también cambia: de ser un consumidor pasivo, pasa a establecer una codependencia activa con el organismo. En el caso de “Silk Leaf” (Figura 1) y el proyecto AeR (Figura 3), el usuario debe mantener vivo el organismo para experimentar el beneficio funcional del material. Esto puede conducir a experiencias afectivas con este. La experiencia con los materiales es definida por Giaccardi y Karana (2015) como sensorial, afectiva, interpretativa y performativa. Todo ello cobra vida en la relación de codependencia entre las entidades vivientes. Estas experiencias condicionales con los materiales conducen a nuevas relaciones cognitivas e interdependientes entre el usuario y el material. Las «cualidades superficiales únicas, más los “ingredientes” con los que están hechos los materiales, se convertirán en estímulos activos para la cognición de los usuarios y, por

the critical issues related to users’ perception and appreciation. The study uses the lens of materials experience to overcome the missing understanding of the experiences enabled and entailed by this interface. Prominent findings unfold the relationship between temporal and static expressions. Participants in the study articulated the behaviors and related experience as ‘alive’, ‘provocative’, and ‘surprising’. Finally, biomimicry and the use of bio-based materials arise as a strategy to create a more intuitive and ‘warmer’ interaction. In a similar case study of project AeR (Shetty, 2018), consumers were exposed to the concept of self-growing the material on pre-designed scaffolds. In doing this, notions of interdependence and a keen interest in a more active consumer involvement with the living material world were observed.

Three main attributes characterizing such materials from the aesthetic perspective are emerging. They are (1) alive, (2) provocative, (3) surprising.

Alive

‘Being alive’ elicits emotions from the user that are active and personal. Staying alive is an active process and hence the role of the user also changes from being a passive consumer to an active co-dependent of the organism. In the case of the Silk Leaf (Figure 1) and project Aer (Figure 3), the user is required to keep the organism alive, in order to experience the functional benefit of the material. This can further lead to affective experiences with the material. The materials experience is defined by Giaccardi and Karana (2015) as sensorial, affective, interpretative, and performative. All of these are brought to life in the co-dependent relationship between living entities. These conditional materials experience leads to new cognitive and interdependent relations between the user and the material. The “unique surface qualities plus the ‘ingredients’ by which the materials are made of will become active stimuli to users’ cognition and, hence, elicit various kinds of emotions”

lo tanto, provocarán varios tipos de emociones» (Bahrudin & Aurisicchio, 2018). Los aspectos personales se derivan del componente interpretativo de la experiencia con los materiales. Interactuar con materiales vivos y dinámicos puede conducir a relaciones personalizadas con el material. Este es especialmente el caso de los materiales bio-sinérgicos proactivos que son modificados para adaptarse a diferentes condiciones.

Provocador

A pesar de que los comportamientos típicos en la naturaleza o inspirados por ella son generalmente percibidos por los usuarios como positivos, evocadores y relajantes, el comportamiento “vivo” causado por los componentes digitales o biológicos de estos materiales también puede provocar malestar emocional. Un material con agencia puede ser percibido como molesto, es decir, puede evidenciarse física y sensorialmente de una manera no deseada o invasiva, causando angustia física y emocional. En este sentido, estos materiales deben considerarse inciertos y provocadores. Fuera de su zona de confort, los usuarios son desafiados a encontrar formas personales y únicas de interactuar con los materiales y los objetos. Estos materiales son provocadores no solo por su comportamiento, sino también por las cualidades sensoriales de sus superficies: orgánicas, desiguales, a menudo porosas y en descomposición. Catalizan una transición desde la estética establecida de la perfección, caracterizada por superficies lisas, limpias y minimalistas, a la de la imperfección, reforzando su significado social y reflejando nuevos valores para la sociedad (Parisi & Rognoli, 2016; Rognoli & Karana, 2014). Como se ve en el caso del hormigón autorreparable (Figura 2), el usuario debe cultivar las bacterias para sellar las superficies agrietadas, que pueden no ser lisas o perfectas. Este “comportamiento vivo” puede provocar incomodidad en un usuario, quien, por el contrario, está condicionado a ejercer un control total sobre tales aplicaciones de superficie.

Sorprendente

Al igual que en la naturaleza, la biología ofrece un elemento de sorpresa e imprevisibilidad que impul-

(Bahrudin & Aurisicchio, 2018). The personal aspects are derived from the interpretative component of the materials experience. Interacting with living and dynamic materials can lead to personalized relations with the material. This is especially the case in Bio-Synergistic materials that are proactive and modified to suit different conditions.

Provocative

Even though behaviors typical or inspired by nature are generally perceived as positive, evoking, and relaxing, by users; the ‘living’ behavior, caused either by the digital or biological components of these materials, can also cause emotional discomfort. A material with agency can be perceived as obtrusive, i.e., physically and sensorially evident in an unwelcome and intrusive way, causing physical and emotional distress. To this extent, they have to be considered as uncertain and provocative. Out of their comfort zone, users are challenged to find personal and unique ways to interact with the materials and objects. These materials are provocative not only for their behaviors, but also for the sensorial qualities of their surface: organic, uneven, often porous, and decaying. They catalyze the transition from the established aesthetic of perfection, characterized by smooth, clean, and minimal surfaces, to the one of imperfection, reinforcing their social meaning and reflecting new value for society (Parisi & Rognoli, 2016; Rognoli & Karana, 2014). As seen in the case of the self-healing concrete (Figure 2) the user is required to grow the bacteria in order to seal cracked surfaces, which may or may not be smooth or perfect. This ‘living behavior’ can lead to discomfort in a user who otherwise is conditioned to exercising full control on such surface applications.

Surprising

Much like in nature, biology offers an element of surprise and unpredictability, which drives our curiosity. Digital technology, on the other

sa nuestra curiosidad. La tecnología digital, por otro lado, nos permite controlar tal imprevisibilidad. Los materiales bio-sinérgicos combinan la agencia de los organismos con la controlabilidad de las tecnologías digitales, permitiendo experiencias novedosas y sorprendentes. La investigación realizada por Bahrudin y Aurisicchio (2018) sobre las emociones evocadas por materiales sostenibles muestra que la experiencia positiva más reportada es la “sorpresa” y la emoción negativa más reportada es el “disgusto”. Los materiales bio-sinérgicos “integran lo inesperado”, como en el caso de Tranceflora y Silk Leaf (Figura 1). El ADN de coral y los cloroplastos se inyectan en la proteína de la seda, lo que produce propiedades sorprendentes. El vestido de seda proporciona al usuario una experiencia apasionante con los materiales. En la investigación realizada por Crippa et al. (2012), la emoción de sorpresa fue explorada utilizando PrEmo y se enfatizó la incongruencia visual-táctil como una conexión subyacente entre la emoción de sorpresa y los materiales (Ludden et al., 2008, 2012). A veces, esta incongruencia incluso se ve reforzada por el contraste entre la sensación y aspecto familiar del material en su forma estática y la expresión inesperada y dinámica en su forma temporal. Esta incongruencia se puede experimentar en materiales dinámicos como Transformative Paper (Figura 7) o BioLogic (Figura 4) (Parisi, Rognoli, et al., 2018).

Este nuevo enfoque orientado a dar forma a nuestra cultura en torno a “nuevos valores” a través de materiales bio-sinérgicos, podría resonar bien con la noción de “devenir humano” (*being human*). En su trabajo, Fetscher (1973) reflexiona sobre la definición que ofrece Marx de las “actividades de la especie” humana como la transformación creativa de la naturaleza. Fetscher se refiere al argumento de Marx de que los seres humanos se han alienado de la actividad de su especie y se han reducido a su mera existencia física, refiriéndose al estado actual del ser humano como “empobrecido” (1973). Como solución, Marx habla de una sociedad que regula «su metabolismo con la naturaleza de la manera más racional» y tiene su propia organización social bajo su control consciente (como se citó en Fetscher, 1973, p. 465).

hand, allows us to control such unpredictability. Bio-Synergistic materials combine the agency of the organisms with the controllability of digital technologies, allowing for novel and surprising experiences. Research conducted by Bahrudin and Aurisicchio (2018) on emotions evoked by sustainable materials shows the most reported positive experience is ‘surprise’ and the most reported negative emotion is ‘disgust’. Bio-Synergistic materials ‘integrate the unexpected’ like in the case of Tranceflora and Silk Leaf (Figure 1). Coral DNA and Chloroplasts are injected in silk protein leading to surprising properties. The silk dress provides the user with a gripping materials experience. In the research conducted by Crippa et al. (2012) the emotion of surprise was explored using PrEmo and emphasized the visual-touching incongruence as an underlying connection between the emotion of surprise in materials (Ludden et al., 2008, 2012). Sometimes, this incongruence is even enhanced by the contrast between the familiar look and feel of the material in its static form, and the unexpected and dynamic expression in its temporal form. This incongruence can be experienced in dynamic materials such as Transformative Paper (Figure 7) or BioLogic (Figure 4) (Parisi, Rognoli, et al., 2018).

This new approach towards shaping our culture around ‘new values’ through Bio-Synergistic materials might also resonate well with the notion of ‘being human’. In his work, Fetscher (1973) reflects on Marx’s definition of human ‘species activity’ as the creative transformation of nature. Fetscher refers to Marx’s argument that human beings have alienated themselves from their species activity and have been reduced to their sheer physical existence, referring to the current state of the human being as ‘impoverished’ (1973). As a solution, Marx talks about a society that regulates “its metabolism with nature in the most rational way” and has its own social organization under its conscious control (as cited in Fetscher, 1973, p. 465).

Esto resuena aún más con los hallazgos del diseño positivo (Desmet, 2013): el 40 por ciento de la felicidad humana se deriva de las actividades, en contraste con las circunstancias individuales y los puntos de referencia genéticos. En los materiales bio-sinérgicos, la sinergia dinámica entre el organismo, el usuario, el material y la tecnología hace que el usuario asuma un papel más activo para nutrir, crecer e interactuar con el material a fin de obtener sus propiedades funcionales. Estas actividades que surgen de los materiales bio-sinérgicos pueden sacarnos de las ideas simplificadas, perfectas y racionales en las que se basa nuestra cultura, y normalizar nuevos valores relacionados con la sorpresa, la imperfección, la provocación y la mutabilidad. La relación de interdependencia entre el organismo, la tecnología y el usuario en el mantenimiento —y en muchos casos, la reparación— del material puede aumentar nuestra conciencia sobre la agencia de la naturaleza y su temporalidad, abordando la conciencia ambiental y las colaboraciones multi-especies (Gatto & McCardle, 2019), lo que lleva al cambio de un diseño antropocéntrico “centrado en las personas” y conduce al reconocimiento de nuestra interdependencia radical con la naturaleza y permite asumir un enfoque más que humano del diseño (Escobar, 2018; Puig de la Bellacasa, 2017). A partir de estas observaciones y esta discusión, surgió un marco original (Figura 10) que representa el rol de los materiales bio-sinérgicos en su potencial de sugerir nuevos valores mediante un diseño socialmente significativo.

CONCLUSIONES

El artículo presentó una discusión preliminar y exploratoria sobre nuevos materiales híbridos, dinámicos e interactivos en la intersección de la electrónica y el bio-diseño, y propuso una definición tentativa de *materiales bio-sinérgicos* y su taxonomía, enmarcada en modelos existentes provenientes de trabajos previos de los autores y otros investigadores. El análisis y la discusión de la categoría revelaron algunas experiencias relevantes, caracterizadas como vivas, provocadoras y sorprendentes, las que promueven un cambio en los valores sociales.

This further resonates with the findings of positive design (Desmet, 2013): 40 percent of human happiness is derived from activities, in comparison to individual circumstances and genetic set points. In Bio-Synergistic materials, the dynamic synergy between organism, user, material, and technology results in the user taking on a more active role to nurture, grow, and interact with the material in order to derive its functional properties. Such activities that emerge out of Bio-Synergistic materials might bring us out of the simplified, perfect, and rational ideas on which our culture is based, and normalize new values of surprise, imperfection, provocation, and impermanence. The interdependent relationship between organism, technology, and user in the maintenance and in many cases, healing of the material can increase our awareness towards the agency of nature and its temporality, addressing environmental consciousness, and multi-species collaborations (Gatto & McCardle, 2019), leading to a shift away from an anthropocentric ‘human-centered’ design towards acknowledging our radical interdependence with nature to take on a more-than-human approach to design (Escobar, 2018; Puig de la Bellacasa, 2017). From these observations and discussion, an original framework emerged (Figure 10), representing the role of Bio-Synergistic materials in suggesting new values by socially meaningful design.

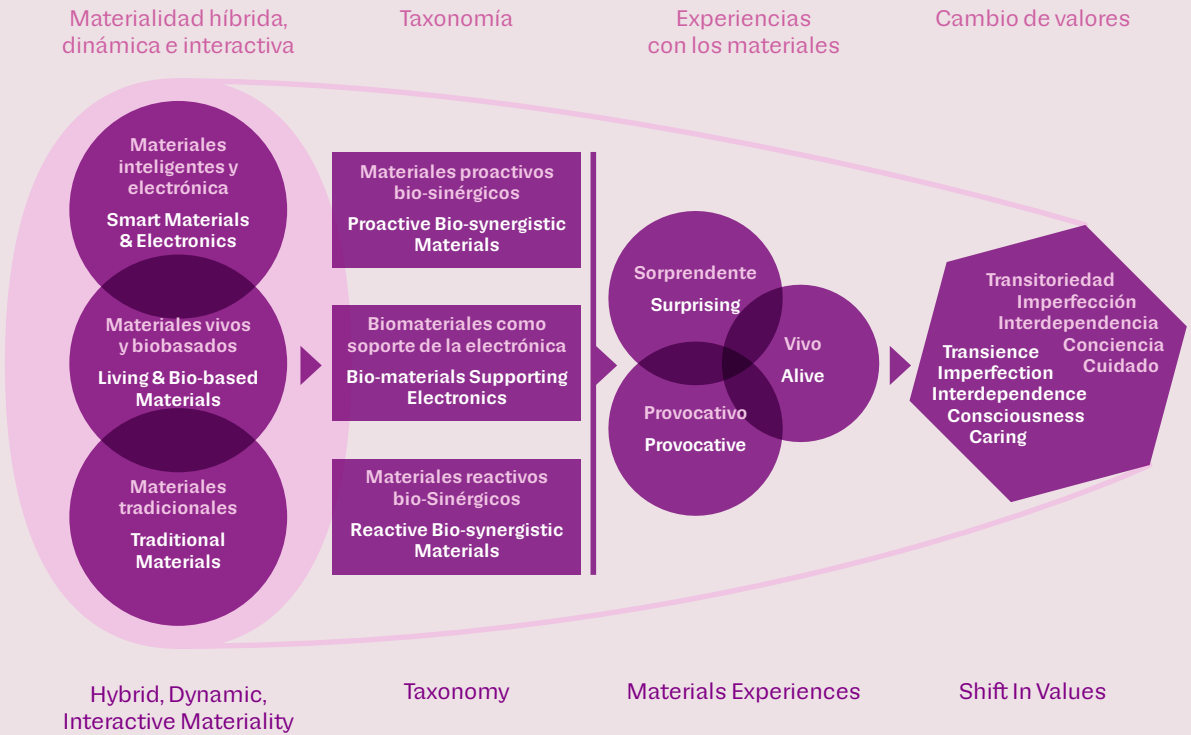
CONCLUSIONS

The article presented a preliminary and explorative discussion about novel hybrid, dynamic, and interactive materials in the intersection of electronics and bio-design, and proposed a tentative definition of Bio-Synergistic materials and their taxonomy, framed upon existing models from previous work by the authors and other researchers. The analysis and discussion of the category revealed some relevant experiences – namely, alive, provocative, and surprising – promoting a shift in social values.

Figura 10: Esquema original de materiales bio-sinérgicos que conducen a un diseño socialmente significativo por medio de las experiencias materiales que provocan. Fuente: los autores.

Figure 10: Original framework of Bio-Synergistic materials leading to socially meaningful design, by means of the materials experiences they elicit. Source: The authors.

Marco referencial de materiales bio-sinérgicos para un diseño socialmente significativo
Framework of Bio-synergistic Materials for Socially Meaningful Design



Las limitaciones de la investigación llevada a cabo hasta el momento están relacionadas con la ausencia de muestras físicas de los materiales involucrados en el análisis de casos, salvo un caso de estudio desarrollado por la segunda autora de este artículo (Shetty, 2018) y un caso de estudio previamente investigado por el primero (inédito). Otra limitación de la investigación se refiere a la falta de participación de los usuarios para obtener datos sobre las experiencias resultantes. De hecho, esta observación preliminar y su correspondiente análisis son realizados únicamente por los autores a través de la autoobservación. Sin embargo, este artículo constituye el primer intento de proponer un marco original y tentativo en torno a las

Limitations of the research carried out so far are related to the absence of physical samples involved in the case analysis, except for one case study developed by one of us (Shetty, 2018) and one case study previously investigated by the other one (unpublished). Another limitation of the research regards the lack of the involvement of users to retrieve data about the resulting experiences. Indeed, this preliminary observation and analysis are solely carried out by the authors through self-observation. However, this article is the first attempt to propose an original and tentative framework around the social implications of Bio-Synergistic materials enhanced by

implicaciones sociales de los materiales bio-sinérgicos potenciados por experiencias materiales. Los hallazgos serán medidos y validados en estudios posteriores, posiblemente con muestras físicas y participación de usuarios.

Prevedemos que, por sus alcances, este marco conduzca la investigación hacia la elaboración de recomendaciones y pautas para el desarrollo y el diseño de materiales bio-sinérgicos, con el fin de facilitar la aceptación, la apreciación y la integración en la vida diaria de las personas, abordando experiencias específicamente positivas y valores sociales significativos. De hecho, la intención de transferir, incorporar y potenciar nuevos valores y experiencias en las etapas iniciales del diseño de materiales no solo hará que el resultado final sea más apropiado para los usuarios en el contexto sociocultural actual (Camere & Karana, 2018b; Karana et al., 2015), sino también que el mismo resultado final se convierta en un catalizador para la transición hacia un futuro más ético e interdependiente. La existencia de pautas de diseño, en forma de sugerencias y consejos textuales y visuales, combinadas con la nueva taxonomía y el marco conceptual presentado, pueden proporcionar procedimientos heurísticos o herramientas para guiar a los profesionales del diseño o a los estudiantes en el desarrollo o la aplicación de estos nuevos materiales interactivos, tal como se sugiere en Parisi et al. (2019) y Parisi, Rognoli, et al. (2018), y también pueden emplearse en la educación, mediante el desarrollo de metodologías, contenidos y formatos para programas educativos orientados a materiales bio-sinérgicos. De hecho, podemos concluir que los materiales bio-sinérgicos tienen el potencial de acercar a los seres humanos a los organismos y restablecer la interdependencia entre el hombre y la naturaleza. Futuras investigaciones sabrán explorar las maneras en que los diseñadores pueden reformular el “marco ético” que actualmente gira en torno a los valores culturales de perfección y simetría, para crear nuevas normas en torno a lo vivo, lo sorprendente y lo provocador. □

materials experiences. Findings will be measured and validated in further studies, possibly involving physical samples and user engagement.

We envision that in the scope of this framework the research would result in the development of recommendations and guidelines for Bio-Synergistic materials development and design in order to facilitate people's acceptance, appreciation, and integration in their daily life, addressing specifically positive experiences and meaningful social values. In fact, the intention to transfer, incorporate, and enhance new values and experiences in the very initial stages of material design will not only make the final result more appropriate for users in the current socio-cultural context, but that same final result renders as a catalyst for the transition into a more ethical and interdependent future. Guidelines in the form of textual and visual suggestions and tips, combined with the new taxonomy and the original framework, can practically result in providing heuristics – through methods or tools – to guide design practitioners or students in developing or applying these new materials, as suggested in Parisi et al. (2019) and Parisi, Rognoli, et al. (2018) for interactive materials, or can also be applied in education, by developing methodologies, contents, and formats for educational programs that are targeted towards Bio-Synergistic materials. In fact, we can conclude that Bio-Synergistic materials have the potential to bring human beings close to organisms and re-establish the interdependence between man and nature. Further research can be done on how designers can reshape the ‘ethical framework’ around cultural values of perfection and symmetry, to create new norms around being alive, surprising, and provocative. □

REFERENCIAS / REFERENCES

- ANTONELLI, P. (Ed.). (2008). *Design and the Elastic Mind*. The Museum of Modern Art, New York.
- ASHBY, M. F., & JOHNSON, K. (2002). *Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design*. Butterworth-Heinemann.
- ASHBY, M. F., SHERCLIFF, H., & CEBON, D. (2007). *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*. Elsevier.
- BAHRUDIN, F. I., & AURISICCHIO, M. (2018). 'Is this Wallet Made of Real Leaves?': A Study of Sustainable Materials' Emotional Experiences. In P. Ekströmer, S. Schütte, & J. Ölvander (Eds.), *DS 91: Proceedings of NordDesign 2018, Design in the Era of Digitalization*. <https://www.designsociety.org/publication/40880/%E2%80%98Is+this+wallet+made+of+real+leaves%3F%E2%80%99%3A+A+Study+of+Sustainable+Materials%27+Emotional+Experiences>
- BARAD, K. (2007). *Meeting the Universe Halfway: Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning*. Duke University Press.
- BARATI, B., KARANA, E., & HEKKERT, P. (2019). Prototyping Materials Experience: Towards a Shared Understanding of Underdeveloped Smart Material Composites. *International Journal of Design*, 13(2), 21–38.
- BERGSTRÖM, J., CLARK, B., FRIGO, A., MAZÉ, R., REDSTRÖM, J., & VALLGÅRDA, A. (2010). Becoming Materials: Material Forms and Forms of Practice. *Digital Creativity*, 21(3), 155–172. <https://doi.org/10.1080/14626268.2010.502235>
- BRAIDOTTI, R. (2019). A Theoretical Framework for the Critical Posthumanities. *Theory, Culture & Society*, 36(6), 31–61. <https://doi.org/10.1177/0263276418771486>
- BROWNELL, B. (2016). From Matter to X-matter: Exploring the Newfound Capacities of Information-enhanced Materials. *Materials & Design*, 90, 1238–1247. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.027>
- BUETOW, S., & WALLIS, K. (2019). The Beauty in Perfect Imperfection. *Journal of Medical Humanities*, 40(3), 389–394. <https://doi.org/10.1007/s10912-017-9500-2>
- CAMERE, S., & KARANA, E. (2017). Growing Materials for Product Design. In E. Karana, E. Giaccardi, N. Nimkulrat, K. Niedderer, & S. Camere (Eds.), *Alive. Active. Adaptive: Proceedings of International Conference on Experiential Knowledge and Emerging Materials (EKSIG 2017)* (pp. 101–115). TU Delft Open.
- CAMERE, S., & KARANA, E. (2018a). Fabricating Materials from Living Organisms: An Emerging Design Practice. *Journal of Cleaner Production*, 186, 570–584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.081>
- CAMERE, S., & KARANA, E. (2018b). Experiential Characterization of Materials: Toward a Toolkit. In C. Storni, K. Leahy, M. McMahon, E. Bohemia, & P. Lloyd (Eds.), *Proceedings of DRS 2018 International Conference: Catalyst* (Vol. 4, pp. 1685–1705). <https://doi.org/10.21606/drs.2018.508>
- CAPRA, F., & LUISI, P. L. (2014). *The Systems View of Life: A Unifying Vision*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511895555>
- COELHO, M., HALL, L., BERZOWSKA, J., & MAES, P. (2009). Pulp-based Computing: A Framework for Building Computers out of Paper. *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 3527–3528. <https://doi.org/10.1145/1520340.1520525>
- COLLET, C. (2013). *This is Alive*. <http://thisisalive.com/>
- CORNISH, E. H. (1987). *Materials and the Designer*. Cambridge University Press.
- CRIPPA, G., ROGNOLI, V., & LEVI, M. (2012). Materials and Emotions: A Study on the Relations Between Materials and Emotions in Industrial Products. In J. Brassett, P. P. M. Hekkert, G. D. S. Ludden, M. Malpass, & J. Mc-Donnell (Eds.), *Proceedings of the Eighth International Conference on Design & Emotion*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2598370>
- DESMET, P. M. A. (2013). *Positive Design. Inaugural Lecture*. TU Delft.
- DESMET, P. M. A., & HEKKERT, P. (2007). Framework of Product Experience. *International Journal of Design*, 1(1), 57–66.
- ESCOBAR, A. (2018). *Designs for the Pluriverse: Radical Interdependence, Autonomy, and the Making of Worlds*. Duke University Press.
- FERRARA, M., LANGELLA, C., & LUCIBELLO, S. (2019). Bio-smart Materials for Product Design Innovation: Going Through Qualities and Applications. In W. Karwowski & T. Ahram (Eds.), *Intelligent Human Systems Integration 2019* (pp. 634–640). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11051-2_96
- FETSCHER, I. (1973). Karl Marx on Human Nature. *Social Research*, 40(3), 443–467.
- GAMBLE, C. N., HANAN, J. S., & NAIL, T. (2019). What Is New Materialism? *Angelaki*, 24(6), 111–134. <https://doi.org/10.1080/0969725X.2019.1684704>
- GATTO, G., & MCCARDLE, J. R. (2019). Multispecies Design and Ethnographic Practice: Following Other-Than-Humans as a Mode of Exploring Environmental Issues. *Sustainability*, 11(18), 5032. <https://doi.org/10.3390/su11185032>
- GIACCARDI, E., & KARANA, E. (2015). Foundations of Materials Experience: An Approach for HCI. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2447–2456. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702337>
- GUATTARI, F. (2000). *The Three Ecologies* (I. Pindar & P. Sutton, Trans.). The Athlone Press.
- HOLZBACH, M., & KELLNER, P. (2014). *Materialdesign: Analog and Digital Design Processes Exploring the World Between Material and Structure* (J. Gaines, Trans.). Hochschule für Gestaltung.

- INGOLD, T. (2000). *The Perception of the Environment: Essays on Livelihood, Dwelling and Skill*. Routledge.
- KAGAN, S. (2011). Aesthetics of Sustainability: A Transdisciplinary Sensibility for Transformative Practices. *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*, 2. <https://doi.org/10.22545/2011/00014>
- KAN, V., VARGO, E., MACHOVER, N., ISHII, H., PAN, S., CHEN, W., & KAKEHI, Y. (2017). Organic Primitives: Synthesis and Design of pH-Reactive Materials using Molecular I/O for Sensing, Actuation, and Interaction. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 989–1000. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025952>
- KARANA, E., BARATI, B., ROGNOLI, V., & ZEEUW VAN DER LAAN, A. (2015). Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences. *International Journal of Design*, 9(2), 35–54.
- KARANA, E., BLAUWHOFF, D., HULTINK, E.-J., & CAMERE, S. (2018). When the Material Grows: A Case Study on Designing (with) Mycelium-based Materials. *International Journal of Design*, 12(2), 119–136.
- KARANA, E., HEKKERT, P., & KANDACHAR, P. (2008). Materials Experience: Descriptive Categories in Material Appraisals. In I. Horvath & Z. Rusak (Eds.), *Seventh International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE 2008)* (pp. 399–412). Delft University of Technology.
- KARANA, E., PEDGLEY, O., & ROGNOLI, V. (2015). On Materials Experience. *Design Issues*, 31(3), 16–27. https://doi.org/10.1162/DESI_a_00335
- KRETZER, M. (2017). *Information Materials: Smart Materials for Adaptive Architecture*. Springer.
- LATOUR, B. (2005). *Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory*. Oxford University Press.
- LAZARO VÁSQUEZ, E. S., & VEGA, K. (2019). From Plastic to Biomaterials: Prototyping DIY Electronics with Mycelium. *Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers*, 308–311. <https://doi.org/10.1145/3341162.3343808>
- LOVELOCK, J. (2000). *Gaia: A New Look at Life on Earth*. Oxford University Press.
- LUCIBELLO, S., FERRARA, M., LANGELLA, C., CECCHINI, C., & CARULLO, R. (2018). Bio-smart Materials: The Binomial of the Future. In W. Karwowski & T. Ahrm (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2018)* (Vol. 722, pp. 745–750). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73888-8_115
- LUDDEN, G. D. S., SCHIFFERSTEIN, H. N. J., & HEKKERT, P. (2008). Surprise as a Design Strategy. *Design Issues*, 24(2), 28–38. <https://doi.org/10.1162/desi.2008.24.2.28>
- LUDDEN, G. D. S., SCHIFFERSTEIN, H. N. J., & HEKKERT, P. (2012). Beyond Surprise: A Longitudinal Study on the Experience of Visual-Tactual Incongruities in Products. *International Journal of Design*, 6(1), 1–10.
- MANZINI, E. (1986). *The Material of Invention: Materials and Design*. Arcadia.
- MELCHIORRI, J. (2014). *Silk Leaf*. <https://www.julianmelchiorri.com/Silk-Leaf>
- MINUTO, A., PITTARELLO, F., & NIJHOLT, A. (2014). New Materials = New Expressive Powers: Smart Material Interfaces and Arts, An Interactive Experience Made Possible Thanks to Smart Materials. *Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, 141–144. <https://doi.org/10.1145/2598153.2598198>
- MORTON, T. (2010). *The Ecological Thought*. Harvard University Press.
- PARISI, S., BIONDA, A., RATTI, A., & ROGNOLI, V. (2019). Design for ICS Materials: A Tentative Methodology for Interactive, Connected, and Smart Materials Applied to Yacht Design. In W. Karwowski & T. Ahrm (Eds.), *Intelligent Human Systems Integration 2019. IHSI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 903, pp. 661–666). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11051-2_100
- PARISI, S., HOLZBACH, M., & ROGNOLI, V. (2020). The Hybrid Dimension of Material Design: Two Case Studies of a Do-It-Yourself Approach for the Development of Interactive, Connected, and Smart Materials. In T. Ahrm, W. Karwowski, A. Vergnano, F. Leali, & R. Taiar (Eds.), *Intelligent Human Systems Integration 2020. IHSI 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1131, pp. 916–921). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39512-4_140
- PARISI, S., & ROGNOLI, V. (2016). Superfici imperfette. *Material Design Journal*, 1, 78–92.
- PARISI, S., & ROGNOLI, V. (2017). Tinkering with Mycelium. A Case Study. In E. Karana, E. Giaccardi, N. Nimkulrat, K. Niedderer, & S. Camere (Eds.), *Alive. Active. Adaptive: Proceedings of International Conference on Experiential Knowledge and Emerging Materials (EKSIG 2017)* (pp. 66–78). TU Delft Open.
- PARISI, S., ROGNOLI, V., SPALLAZZO, D., & PETRELLI, D. (2018). ICS Materials. Towards a Re-Interpretation of Material Qualities Through Interactive, Connected, and Smart Materials. In C. Storni, K. Leahy, M. McMahon, E. Bohemia, & P. Lloyd (Eds.), *Proceedings of DRS 2018 International Conference: Catalyst* (Vol. 4, pp. 1747–1761). <https://doi.org/10.21606/drs.2018.521>

- PARISI, S., SPALLAZZO, D., FERRARO, V., FERRARA, M., CECONELLO, M. A., AYALA GARCÍA, C., & ROGNOLI, V. (2018). Mapping ICS Materials: Interactive, Connected, and Smart Materials. In W. Karwowski & T. Ahram (Eds.), *Intelligent Human Systems Integration IHSI 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 722, pp. 739–744). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73888-8_114
- PUIG DE LA BELLACASA, M. (2017). *Matters of Care: Speculative Ethics in More Than Human Worlds*. University of Minnesota Press.
- RAZZAQUE, M. A., DOBSON, S., & DELANEY, K. (2013). Augmented Materials: Spatially Embodied Sensor Networks. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 11(4), 453–477. <https://doi.org/10.1504/IJCND.2013.057721>
- RITTER, A. (2006). *Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design*. Birkhäuser.
- ROGNOLI, V. (2004). *I materiali per il design: Un atlante espressivo-sensoriale* [Doctoral Dissertation. Politecnico di Milano].
- ROGNOLI, V. (2010). A Broad Survey on Expressive-sensorial Characterization of Materials for Design Education. *METU Journal of the Faculty of Architecture*, 27(2), 287–300. <https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2010.2.16>
- ROGNOLI, V. (2015). Dynamic and Imperfect as Emerging Material Experiences. A Case Study. In L.-L. Chen, T. Djajadiningrat, L. M. G. Feijs, J. Hu, S. H. M. Kyffin, L. Rampino, E. Rodríguez, & D. Steffen (Eds.), *Design and Semantics of Form and Movement (DeSForM 2015): Aesthetics of Interaction: Dynamic, Multisensory, Wise* (pp. 66–76). Koninklijke Philips Electronics.
- ROGNOLI, V., & AYALA GARCÍA, C. (2018). Materia emocional. Los materiales en nuestra relación emocional con los objetos. *RChD: Creación y Pensamiento*, 3(4), 1–15. <https://doi.org/10.5354/0719-837X.2018.50297>
- ROGNOLI, V., & KARANA, E. (2014). Toward a New Materials Aesthetic Based on Imperfection and Graceful Aging. In E. Karana, O. Pedgley, & V. Rognoli (Eds.), *Materials Experience: Fundamentals of Materials and Design* (pp. 145–154). Butterworth-Heinemann.
- SAFFER, D. (2009). *Designing for Interaction: Creating Innovative Applications and Devices*. New Riders.
- SCOTT, J. (2012). Knitting Moves: Bio-inspired Transformable Textiles for Knitted Architecture. *Studies in Material Thinking*, 7, Paper 08.
- SCOTT, J. (2018). Responsive Knit: The Evolution of a Programmable Material System. In C. Storni, K. Leahy, M. McMahon, P. Lloyd, & E. Bohemia (Eds.), *Proceedings of DRS 2018 International Conference: Catalyst* (Vol. 4, pp. 1800–1811). <https://doi.org/10.21606/drs.2018.566>
- SHETTY, S. (2018). *Project AeR: A Process Driven Approach to Bio-design*. Köln International School of Design.
- SPUTNIKO. (2015). *Trancefflora*. <https://sputniko.com/Trancefflora>
- TAO, H., KAPLAN, D. L., & OMENETTO, F. G. (2012). Silk Materials – A Road to Sustainable High Technology. *Advanced Materials*, 24(21), 2824–2837. <https://doi.org/10.1002/adma.201104477>
- TIBBITS, S. (Ed.). (2017). *Active Matter*. MIT Press.
- VALLGÅRDA, A., & REDSTRÖM, J. (2007). Computational Composites. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1, 513–522. <https://doi.org/10.1145/1240624.1240706>
- YAO, L., OU, J., CHENG, C.-Y., STEINER, H., WANG, W., WANG, G., & ISHII, H. (2015). bioLogic: Natto Cells as Nanoactuators for Shape Changing Interfaces. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–10. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702611>